

## ОТХОДЫ РАЗРАБОТКИ ОЛОВОПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАБАЙКАЛЬЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА РЕДКИХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Л.В. Шумилова<sup>1</sup>, Г.А. Юргенсон<sup>2</sup>, А.Н. Хатькова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет, Чита, Россия, e-mail: shumilovalv@mail.ru

<sup>2</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

**Аннотация:** Целью исследования является разработка технологии извлечения комплекса редких и цветных металлов из техногенных отходов на основе физико-химической геотехнологии, что в комплексе с изучением вещественного состава отходов переработки оловополиметаллических руд Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений Забайкалья представляется актуальной научной задачей. Руды Хапчерангинского месторождения сложены арсенопиритом, галенитом, сфалеритом, пирротином, касситеритом, присутствует пирит, станнин, жильный материал представлен кварцем, мусковитом, топазом, хлоритом, карбонатами, турмалином. Определено, что отходы обогащения руд оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья представляют собою комплексные техногенные месторождения, содержащие скандий, бериллий, индий, висмут, кадмий, тантал и ниобий, а также цветные металлы – свинец, цинк, олово и вольфрам. Разработана комбинированная технология извлечения редких и цветных металлов из техногенных отходов хвостохранилищ Восточного Забайкалья на базе физико-химической геотехнологии (скважинное подземное выщелачивание в ложе хвостохранилища, химическое вскрытие, поэтапное выщелачивание по локальным технологиям, включающим отмывку, регенерацию, выщелачивание, сорбцию, экстракцию, регенерацию, осаждение), которая позволит получать высокочистые соединения редких элементов и повысить экологический уровень хозяйственной деятельности предприятий.

**Ключевые слова:** хвостохранилище, редкие и цветные металлы, месторождение, запасы, Восточное Забайкалье, физико-химическая геотехнология, выщелачивание, сорбция, экстракция, регенерация.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований в 2022-2023 годах, соглашение номер 22-17-00040. Работа выполнена в рамках госзадания по теме № FUFР-2021-0005.

**Для цитирования:** Шумилова Л. В., Юргенсон Г. А., Хатькова А. Н. Отходы разработки оловополиметаллических месторождений Забайкалья и физико-химическая геотехнология извлечения комплекса редких и цветных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 156–168. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_156.

---

## Tin-bearing polymetallic ore mining in Transbaikalia and physicochemical geotechnology of extraction of rare and nonferrous metals

L.V. Shumilova<sup>1</sup>, G.A. Yurgenson<sup>2</sup>, A.N. Khatkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Transbaikal State University, Chita, Russia, e-mail: shumilovalv@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Chita, Russia

---

**Abstract:** The research aims to develop a technology for extraction of rare and nonferrous metals from mining waste using a physicochemical geotechnology, which, in combination with the analysis of material constitution of tin-bearing polymetallic ore processing waste at Khapcheranga and Sherlovaya Gora deposits in Transbaikalia, is a relevant scientific problem. Khapcheranga ore contains arsenopyrite, galena, sphalerite, pyrrhotine, cassiterite, pyrite and stannite; the vein material represents quartz, muscovite, topaz, chlorite, carbonates and tourmaline. The waste of tin-bearing polymetallic ore processing in East Transbaikalia is compound manmade deposits containing scandium, beryllium, indium, bismuth, cadmium, tantalum and niobium, as well as nonferrous metals of lead, zinc, tin and tungsten. The mixed-type technology of extraction of rare and nonferrous metals from tailings in East Transbaikalia is developed on the basis of the physicochemical geotechnology (in-situ leaching at the bottom of tailings ponds, chemical dissociation, local stage-wise leaching, including washing, regeneration, leaching, sorption, extraction, regeneration and precipitation). The application of the mixed-type technology can enable production of high-purity compounds of rare elements at the increased eco-friendliness of the activities.

**Key words:** tailings pond, rare and nonferrous metals, mineral deposit, mineral resources, East Transbaikalia, physicochemical geotechnology, leaching, sorption, extraction, regeneration.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-17-00040 for basic and exploratory research in 2022–2023, under the state contract on Topic No. FUFР-2021-0005.

**For citation:** Shumilova L. V., Yurgenson G. A., Khatkova A. N. Tin-bearing polymetallic ore mining in Transbaikalia and physicochemical geotechnology of extraction of rare and nonferrous metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):156-168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_156.

---

### Введение

Сырьевая отрасль промышленности обеспечивает инновационный путь развития России. Однако в настоящее время в области горного дела складывается конспирологическое мышление при постоянном увеличении направлений исследований [1, с. 4 – 17; 2, с. 384 – 394]. Для оценки возможности создания физико-химической геотехнологии (ФХГ) необходимо получить объективные ис-

ходные данные (правовые, природные, технологические) [3, с. 82 – 89].

В период технической модернизации действующих горных предприятий и создания новых производств редких элементов следует оценить возможности организации малых и средних технологических комплексов на базе доступных месторождений, которыми являются техногенные объекты с большим периодом консервации.

Организация редкометального импортозамещения имеет свою специфику, и поэтому должна проводиться с учетом мировых тенденций, возможностей и перспектив создания эффективных технологий извлечения редких элементов.

### **Актуальность исследований**

Забайкальский край относится к историческим горнопромышленным регионам России. Здесь добыты первые российские серебро, рудное золото, флюорит, олово, вольфрам, молибден, висмут и литий. Более 300 лет с перерывами в Восточном Забайкалье обрабатывались полиметаллические месторождения, руды которых содержали наряду с цинком, свинцом, золотом и серебром висмут, кадмий, таллий, галлий. С 1811 г. Забайкалье стало важнейшим источником олова в России, основная масса которого добыта из крупных Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений в XX в.

Добыча висмута начата в 1916 г. на Шерловой Горе. Литий в составе его главного минерала сподумена ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) начали извлекать из сподуменовых руд пегматитовых даек Завитинского месторождения в 1942 г., получение тантал-ниобиевого концентрата началось в 1962 г. [4, с. 345]. В это же время началась добыча танталовых руд Орловского месторождения, хвосты обогащения которых складировались в хвостохранилище № 1 вместе с отходами обогащения вольфрамовых руд Спокойнинского месторождения [4, с. 347].

Гидро- и пирометаллургия редких металлов в основном базируется на общих принципах построения технологических схем, но в то же время отличается спецификой химико-металлургических локальных технологий. Поэтому изучение вещественного состава техногенных отходов переработки руд оловополиметаллических месторождений Забайкалья и

разработка технологии извлечения комплекса редких и цветных металлов, является актуальной научной задачей.

Цель исследования — разработка технологии извлечения комплекса редких и цветных металлов на основе ФХГ.

Задачи исследования:

- изучить вещественный состав олово-полиметаллических руд Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений и техногенных отходов горного производства;
- оценить массы отходов горного производства и содержание в них редких элементов;
- оценить запасы редких металлов в хвостохранилищах обогатительных фабрик, перерабатывавших ранее руды олово-полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья;
- оценить запасы сопутствующих полезных компонентов в хвостохранилищах обогатительных фабрик, перерабатывавших ранее руды оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья;
- разработать комбинированную технологию извлечения редких и цветных металлов на основе современных способов физико-химической геотехнологии.

Объект исследования — отходы обогащения оловополиметаллических руд Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений (Забайкальский край).

### **Современное состояние вопроса**

К оловополиметаллическому минеральному промышленному типу в России (Приморье, Восточное Забайкалье), известному также в Боливии (Ла-Пулька, Катави и др.) относятся месторождения касситерит-сульфидно-силикатной формации. Они давали и дают существенное количество олова. Месторождения этого типа впервые на территории современной России открыты в Забай-

калье в 1926 г. С.С. Смирновым [4, с. 345–347; 5, с. 101–105] во время полевых работ по изучению полиметаллических месторождений. Им впервые найден касситерит в свинцово-цинковых рудах Хапчерангинского месторождения [5, с. 128].

Руды Хапчерангинского месторождения по данным ряда авторов [5, с. 128; 6, с. 101–105] сложены арсенопиритом, галенитом, сфалеритом, пирротинном, касситеритом, присутствует пирит, станнин, жильный материал представлен кварцем, мусковитом, топазом, хлоритом, карбонатами, турмалином.

В 1930 г. в результате одного из первых опытов использования геохимического метода поисков Н.В. Иониным обнаружено оловополиметаллическое оруденение на северо-восточном фланге известного с 1723 г. месторождения грейзеновой формации Шерловая Гора [4, с. 345–347; 7, с. 130–133; 8, pp. 12–93].

Средние содержания в руде составляли (мас.%): Sn – 0,08–1; Pb – 0,3–25; Zn – 1–25; Cd – 0,01–0,17; In – 0,0009–0,0056 [9, с. 39–43]. Согласно данным Д.О. Онтоева [6, с. 102], сфалерит содержал до 1% олова. Олово содержалось также и во вмещающих горных породах. Д.О. Онтоев указывает на содержание до 0,09% SnO<sub>2</sub> в песчанике по жиле Восточная. Цинк (0,18% ZnO) и свинец (0,14% PbO) присутствуют в

апоглинистом микросланце, вмещающем сульфидно-касситерит-хлоритовые руды.

### Методы исследований

Минералогический анализ руд и легалых хвостов обогащения осуществлялся с помощью комплекса физических, химических и физико-химических методов с использованием современного инструментария: оптической и электронной микроскопии (с использованием растрового электронного микроскопа LEO EVO 40HV с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350), спектрохимического и эмиссионного спектрального анализа, рентгенофлуоресцентного анализа. Также применялись масс-спектрометрический с ионизацией в индуктивно связанной плазме и атомно-абсорбционные методы.

### Результаты исследований и их обсуждение

В карбонатно-сфалерит-галенитовой ассоциации серебро и сурьма частично связана с галенитом. Распределение ряда элементов в качестве примесей в главных сульфидных минералах руд Хапчерангинского месторождения представлено в табл. 1.

К редким элементам, кроме традиционных бериллия, лития, тантала и ниобия, отнесены также малораспространенные кадмий, висмут, индий, скандий,

Таблица 1

**Средние содержания химических элементов в главных сульфидах руд Хапчерангинского месторождения**

*Average contents of chemical elements in basic sulfides in Khapcheranga ore*

Минерал	Элемент и его содержание, мас.%							
	Ag	As	Sb	Bi	Sn	In	Cd	Cu
Сфалерит	56	955	н.д.	н.д.	738	220	1265	4975
Арсенопирит	12	46,0	21	26	н.д.	н.д.	н.д.	21
Галенит	1175	н.д.	1170	396	1645	н.д.	н.д.	120

Примечание: н.д. — нет данных.

Таблица 2

**Содержание основных элементов в рудах месторождений**  
**Contents of basic elements in ore of test deposits**

Месторождение	Элемент и его содержание, %						
	Sn	Pb	Zn	Cu	As	Bi	S
Хапчерангинское	0,54	3,9	6,8	0,57	1,2	0,004	9,86
Шерловогорское	0,12	1,71	0,79	0,056	3,79	0,006	11,12

имеющие стратегическое значение, использование которых в современных промышленных технологиях неизменно возрастает. Они образуют относительно высокие концентрации в отходах обогащения оловополиметаллических Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений в связи с тем, что не извлекались из руд в процессе разработки этих месторождений на олово. Хапчерангинское месторождение до открытия в его рудах касситерита разрабатывалось как свинцово-цинковое, но насколько полно было извлечение минералов-носителей указанных элементов, неизвестно.

Содержание основных элементов в рудах месторождений представлено в табл. 2.

В табл. 3 приведены массы отходов и среднее содержание указанных редких элементов-спутников в отходах обогатительных фабрик, находящихся в хвостохранилищах. Используются уточненные данные относительно массы отходов в хвостохранилищах, полученные Ю.Ф. Харитоновым и В.Г. Васильевым в 1997 г. и частично опубликованные в

работе [10, с. 63 – 69], а также результаты новых аналитических данных, полученных авторами в процессе изучения минерального сырья хвостохранилищ.

Как видно из анализа табл. 3, наибольшие массы отходов находятся в хвостохранилище Шерловогорского горнообогатительного комбината (ГОК), разрабатывавшего Шерловогорское месторождение. Из рассматриваемых химических элементов наибольшим содержанием для хвостохранилища Хапчерангинского ГОК характеризуется кадмий, а для лежалых хвостов Шерловогорского ГОК – висмут, скандий, индий, ниобий и бериллий.

В лежалых хвостах Хапчерангинского ГОК также относительно высокое содержание лития. Оценка запасов рассматриваемых химических элементов дана в табл. 4. Анализ данных показывает, что максимальными запасами висмута, кадмия, скандия, индия, бериллия и ниобия обладает хвостохранилище Шерловогорского ГОК, хотя содержание лития и кадмия в лежалых хвостах Хапчерангинского ГОК выше.

Таблица 3

**Оценка массы отходов горного производства и содержания в них редких элементов**  
**Mining waste mass and contents of rare elements**

Промышленный тип руды, месторождение	Отходы, тыс. т	Элемент и его содержание, г/т							
		Bi	Cd	Sc	In	Be	Li	Nb	Ta
Оловополиметаллический, Хапчерангинское	6201	2,8	27,8	35,3	1,8	<5	397	7	2,3
Оловополиметаллический, Шерловогорское	17 618	22,5	10,9	118	3,8	10,7	40	32	3

Таблица 4

**Оценка запасов редких металлов в хвостохранилищах обогатительных фабрик, перерабатывавших руды оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья**  
**Resources of rare metals in tailings ponds of tin-bearing polymetallic ore processing in East Transbaikalia**

Месторождение, хвостохранилище	Отходы, тыс. т	Элемент и его запасы, т							
		Bi	Cd	Sc	In	Be	Li	Nb	Ta
Хапчерангинское	6201	17,4	172,4	218,9	11,2	н.д.	246,3	4,3	1,4
Шерловогорское	17 618	396,4	192,1	2079	67,	188,6	704,8	564,1	52,9
Сумма	23 819	413,8	364,5	2297,9	78,2	188,6	951,1	568,4	54,3

Примечание: н.д. — нет данных.

Кроме редких элементов в хвостах обогащения руд рассматриваемых месторождений присутствуют полезные компоненты, обеспечивающие комплексность этих геотехногенных руд и существенно увеличивающие эколого-экономическую целесообразность их переработки.

Оценка содержаний и запасов всех полезных компонентов, кроме редких элементов, дана в табл. 5. Анализ этих данных свидетельствует о значительных запасах свинца, цинка и олова в отходах обогащения руд Шерловогорского месторождения и меньших — Хапчерангинского. Отходы Шерловой Горы содержат также и серебро, запасы которого при среднем содержании 7,8 г/т составляют 137,4 т. Все рассматриваемые полезные компоненты, находящиеся в отходах обогатительных фабрик, связаны с определенными минеральными

ассоциациями, извлечение которых возможно с использованием единой комплексной технологии.

Выполненное ранее изучение минерального состава руд оловополиметаллических месторождений показало, что олово связано в основном с касситеритом, частью — со станнином. В касситерите находится и существенная часть индия, ниобия и скандия [9, с. 39 — 43; 10, с. 63 — 69].

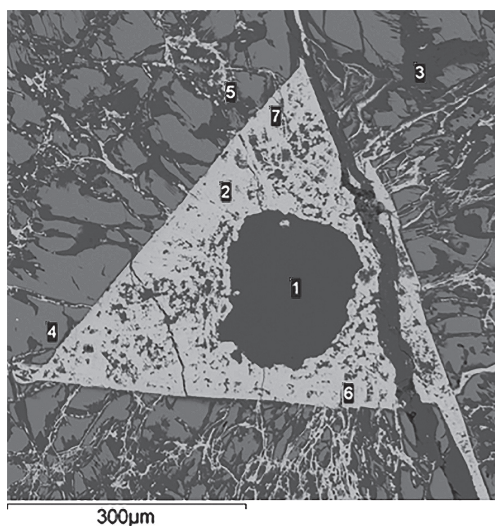
Часть индия и весь кадмий связаны со сфалеритом [11, с. 468 — 504], висмут в Шерловогорском (Сопка Большая) оловополиметаллическом месторождении связан как с галенитом и галеновисмутитом, так и с висмутином, частью с рузвельтитом.

Особенностью как первичных и окисленных руд, так и лежалых хвостов является высокое содержание мышьяка (см. табл. 1), который связан с арсено-

Таблица 5

**Оценка запасов сопутствующих полезных компонентов в хвостохранилищах обогатительных фабрик, перерабатывавших руды оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья**  
**Appraisal of associate useful components in tailings ponds at processing plants**

Месторождение, хвостохранилище	Отходы, тыс. т	Элемент, его содержание, %				Запасы, тыс. т			
		Pb	Zn	Sn	W	Pb	Zn	Sn	W
Хапчерангинское	6201	0,133	0,321	0,044	0,002	8,25	19,9	2,73	0,24
Шерловогорское	17 618	0,26	0,410	0,058	0,001	45,8	72,2	10,2	1,8



1 – скородит (до 9,47% Cu); 2, 5–7 – рузвельтит;  
3 – скородит с 0,48% Sb; 4 – арсенипирит

Рис. 1. Рузвельтит в фрагменте окисленной руды в песчаной фракции (электронно-микроскопический снимок)

Fig. 1. Rooseveltite in an oxidized ore piece in sand fraction (electron microscopy image)

пиритом и продуктами его гипергенных изменений — скородитом, рузвельтитом, миметитом и другими минералами [8, pp.12–93; 11, с. 468–504; 12, pp. 94–137]. Пример тонких сростаний арсенипирита, скородита и рузвельтита показан на рис. 1.

На основе электронно-зондовых исследований установлено, что висмут в шерловогорском рыхлом материале находится в висмутине ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), бисмутите ( $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ ), самородном висмуте, рузвельтите ( $\text{BiAsO}_4$ ), арсенипирите (до 1,78%) и галените. Свинец связан с галенитом, церусситом, англезитом, бедантитом ( $\text{PbH}_3\text{O})\text{Fe}_3^{3+}(\text{AsO}_4)(\text{OH})_6$ , коркитом  $\text{PbFe}_3[(\text{OH})_3\text{SO}_4\text{PO}_4]$ , пироморфитом,  $\text{Pb}_2\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$ , плюмбоярозитом  $\text{PbFe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3$ . Цинк связан не только со сфалеритом, но и адамитом  $\text{Zn}_2\text{AsO}_4(\text{OH})(\text{Co,Fe})$ , многими сульфатами, каламином. Серебро находится в галените, сульфосолях (тетаздрит и тен-

нантит), до 0,49% серебра обнаружено в арсенипирите, содержащем 1,76 сурьмы. Кроме того, установлен йодаргирит ( $\text{AgI}$ ) [8, p. 54]. Весь бериллий и часть скандия связаны с бериллом. В ассоциации с касситеритом и сфалеритом в отходах находится индий, с касситеритом связан также скандий, висмут находится частично в галените и висмутине, а литий — в слюдах.

Анализ всех полученных новых данных о составе отходов обогатительных фабрик рассматриваемых предприятий свидетельствует о том, что мы имеем дело с новыми геотехногенными месторождениями, формирующимися на протяжении многолетней истории горнодобывающей промышленности Восточного Забайкалья.

В результате рассмотрения горнопромышленных территорий как геосистем с особыми геохимическими свойствами выполнена их геохимическая типизация и определена их геохимическая унаследованность от рудноформационного типа обрабатываемых месторождений [11, с. 468–504] и установлено, что среди рассматриваемых горнопромышленных объектов наибольшую экологическую опасность представляют отходы переработки оловополиметаллических руд, ландшафтные системы территорий которых отличаются высоким содержанием мышьяка, свинца, кадмия, цинка (табл. 6).

Ландшафты Хапчерангинского и Шерловогорского месторождений относятся к наиболее опасному кадмий-олово-сурьмяно-висмут-мышьяково-свинцово-цинковому геохимическому типу. Отсюда следует, что в первую очередь для улучшения экологической обстановки и получения наиболее ценных индия, скандия и бериллия целесообразно разработать технологию извлечения этих элементов, а попутно с ними — висмута и кадмия. Как сказано выше, индий и скандий свя-

Таблица 6

**Типичные ассоциации химических элементов и их концентрации (г/т)  
в геотехногенных ландшафтах рассматриваемых месторождений**  
*Representative associations of chemical elements and their concentrations (g/t)  
on manmade landscapes of test deposits*

Месторождение и связанная с ним геосистема	Рудная формация	Геохимическая ассоциация	Геохимический тип
Хапчерангинское, Шерловогорское	оловополиметаллическая	As (650) Sb(40), Pb (1200), Mo(26), Zn (1750), Cd (18), Sn (260), W (50), Bi (16), F, Tl	кадмий-олово-сурьмяно-висмут-мышьяково-свинцово-цинковый
Спокойнинское	грейзеновая сульфидно-кварцевовольфрамитовая	Zn (400), Cd (8), Bi (240), W (988), Mo (38) Pb (51), Cu (214), Ag (12), Be (8)	висмут-кадмий-цинк-вольфрамовый
Орловское, Мало-Кулинднское, Завитинское	редкометаллических пегматитов	Ta (70), Nb (115), Li (1018), Cs (221), Be (18)	бериллий-тантал-ниобий-цезий-литиевый

заны с касситеритом, часть индия и кадмий находятся в сфалерите, а висмут находится в галените. Все эти элементы остались в отходах передела с использованием комбинированного гравитационно-флотационного способа в связи с нахождением в тонких сростках или в виде изоморфных примесей в обогащительном процессе, которые не были извлечены с применением этого способа.

С учетом комплексности новых геотехногенных месторождений и необходимости полного извлечения всех полезных компонентов при разработке технологии их извлечения возможно использование методов хлоридной пирометаллургии, разработанной еще в 1960-х гг. для Шерловогорского месторождения в ЗабКНИИ Мингео СССР В.И. Буяновым и его последователями [13, с. 80–85], которая, несмотря на подтверждение ее эффективности в ходе последующих испытаний, все же не была внедрена [4, с. 345–347]. Есть положительные предпосылки для усовершенствования этой пирометаллургической технологии. Однако эти способы переработки (применение хлора) в настоящее время в классическом варианте не отвечают экологическим требованиям, а также имеют достаточ-

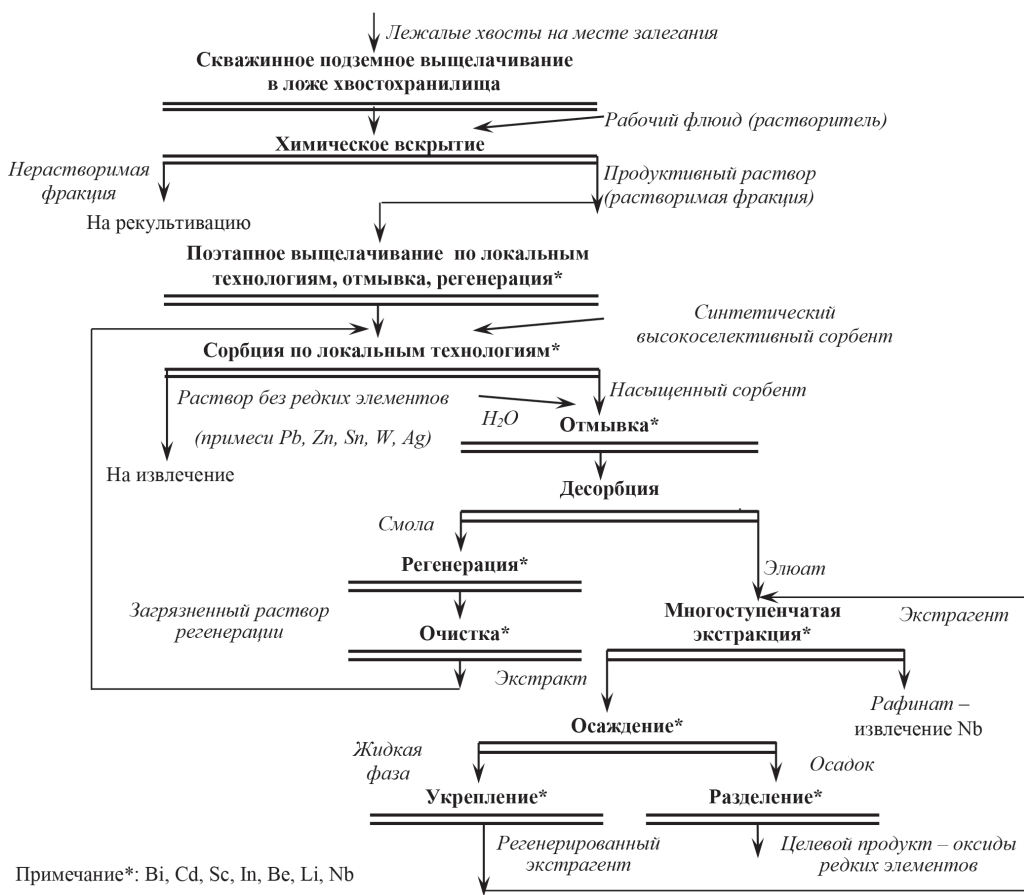
но большое количество выбросов запыленных газов, требующих многоступенчатых способов очистки перед выбросом в атмосферу.

При разработке технологии учтены исследования, проведенные рядом отечественных и зарубежных ученых, рассматривающих как физико-химические технологии скважинного подземного выщелачивания, так и физико-химические процессы, применяемые на стационарных горноперерабатывающих предприятиях [13, 80–85; 14, с. 328–339; 15; 16, с. 133–138; 17, с. 8–15; 18, с. 210; 19, с. 40–56; 20, pp. 835–840].

Разнообразие редких элементов в исследуемом техногенном сырье (Bi, Cd, Sc, In, Be, Li, Nb, Ta), а также наличие цветных металлов (Pb, Zn, Sn, W), определили необходимость создания комбинированной схемы, основные элементы которой могли быть положены в основу локальных технологий.

На рис. 2 представлена разработанная авторами комбинированная технология извлечения редких и цветных металлов из техногенных отходов хвостохранилищ обогатительных фабрик, перерабатывавших руды оловополиметаллических месторождений Восточного Забайкалья.





Примечание\*: Bi, Cd, Sc, In, Be, Li, Nb

Рис. 2. Комбинированная технология извлечения редких и цветных металлов из техногенных отходов хвостохранилищ (Восточное Забайкалье)

Fig. 2. Mixed-type technology for extraction of rare and nonferrous metals from tailings waste

Накопленный многолетний положительный опыт ФХГ урановой и золотодобывающей отраслей промышленности сыграл большое значение при разработке авторами технологии применительно к редким элементам. Базисом комбинированной технологии является инновационная экологоэдающая («зеленая») геотехнология XXI в. — скважинное подземное выщелачивание [21, pp. 14–15; 22, pp. 585–594; 23; 24, pp. 196–202; 25, pp. 64–68].

Из многочисленных методов очистки и извлечения ионов редких металлов из продуктивных растворов скважинного подземного выщелачивания предла-

гается использовать экологически чистые методы сорбции и экстракции.

Эти технологические приемы разделения близких по свойствам металлов при малых капитальных расходах и рациональном выборе сорбентов или ионообменных смол, позволят с высокой степенью извлекать комплекс редких элементов и получить их высокочистые (99,99%) соединения.

Включение сорбционных методов в комбинированную технологию также объясняется последними достижениями мировых разработчиков смол в области синтеза высокоселективных сорбентов (Великобритания, Германия и др.), в том

числе ионитов с регулируемой на стадии синтеза пористостью сорбентов. Расширение ассортимента смол позволяет существенно облегчить создание принципиально новой промышленной технологии с применением выпускаемых сорбентов.

Применение непрерывной экстракции, которую можно осуществлять в многоступенчатых аппаратах (экстракторах) при противотоке исходного раствора и экстрагента, позволит получить заданную степень экстракции, снизить расход экстрагента и повысить эффективность процесса разделения.

### Выводы

1. Результаты изучения вещественного состава оловополиметаллических руд Хапчерангинского и Шерловогорского

месторождений (Восточное Забайкалье) и техногенных отходов горного производства, оценки массы отходов и содержания в них редких элементов и цветных металлов однозначно свидетельствуют о целесообразности разработки программы переработки техногенных отходов для получения ценнейших химических элементов и решения проблем геоэтики.

2. Разработана комбинированная технология извлечения редких элементов из техногенных отходов, обладающая элементами новизны и включающая скважинное подземное выщелачивание, сорбцию и экстракцию по локальным технологиям. Данная технология позволит получать высокочистые соединения редких элементов и повысить экологический уровень хозяйственной деятельности предприятий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сурин С. Д. Перспективы развития физико-химической геотехнологии в России // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3-1. — С. 4—17. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-31-0-6.

2. Машковцев Г. А. Минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых, пригодная для освоения методами физико-химической геотехнологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3-1. — С. 384—394.

3. Аренс В. Ж., Шумилова Л. В., Фазлуллин М. И., Хчеян Г. Х. Перспективные направления химической и микробиологической переработки минерального сырья цветных и благородных металлов // Металлург. — 2017. — № 9. — С. 82—89.

4. Юргенсон Г. А., Четкин В. С., Асосков В. М., Чабан Н. Н., Константинова Т. А., Мязин В. П. Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья. — Новосибирск: Наука, 1999. — 574 с.

5. Онтоев Д. О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. — М.: Наука, 1974. — 224 с.

6. Гонгальский Б. И., Сергеев А. Д. Хапчерангинское оловорудное месторождение // Месторождения Забайкалья. Т. 1, кн. 1. — Чита-М., 1995. — С. 101—105.

7. Гайворонский Б. А. Шерловогорское месторождение // Месторождения Забайкалья. Т. 1, кн. 1. — Чита-М., 1995. — С. 130—133.

8. Yurgenson G. A., Kononov O. V. Sherlova Gora: a deposit for gemstones and rare metals // Mineralogical Almanac. 2014, vol. 19, no. 2, pp. 12—93.

9. Бойко С. М. Элементы-примеси в касситеритах оловорудных месторождений как индикатор зонального распределения компонентов в рудных телах. — Зап. Забайк. фил. Геогр. о-ва СССР, 1982. — Вып. 48. — С. 39—43.

10. Харитонов Ю. Ф., Васильев В. Г., Андрейчук Д. А., Глазунов А. П. Эколого-экономическая оценка отходов горнопромышленного комплекса Читинской области // Ресурсы Забайкалья. — 2002. — Специальный выпуск. — С. 63—69.

11. Доломанова Е. И. Свинцово-цинковая минерализация на некоторых касситеритово-кварцево-сульфидных месторождениях Восточного Забайкалья // Труды института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. — М., 1963. — Вып. 83. — С. 468—504.

12. Kasatkin A. V., Klopotov K. I., Plašil J. Supergene minerals of Sherlovaya Gora // Mineralogical Almanac. 2014, vol. 19, no. 2, pp. 94—137.

13. Дробышев В. Ф., Кулигин В. Я., Фатьянов А. В., Красникова Т. И., Ильин Ю. Д., Глотова Е. В., Дерябина Н. А., Пинигин С. А. Новые технологии переработки руд Забайкалья // Ресурсы Забайкалья. — 2002. — Специальный выпуск. — С. 80—85.

14. Федосеев В. В., Гаджиева Л. А. Опыт и результаты переоценки золоторудных месторождений Челябинской области для открытой разработки и выщелачивания путем понижения бортового содержания // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 328—339. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-328-339.

15. Kudryashov N. M., Udoratina O. V., Coble M., Steshenko E. N. Geochronological and geochemical study of zircon from tourmaline-muscovite granites of the archaean Kolmozero-Voronya Greenstone belt: insights into sources of the rare-metal peg-matites // Minerals. 2020, vol. 10, no. 9, article 760. DOI: 10.3390/min10090760.

16. Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Петрографические структуры и равновесия Харди-Вайнберга // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 133—138. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.133.

17. Нечаев А. В., Поляков Е. Г., Белоусова Е. Б., Пикалова В. С., Быховский Л. З. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2020. — № 4-5. — С. 8—15.

18. Фазлуллин М. И., Авдонин Г. И., Белоусов А. Б., Гуров В. А., Евтеева Л. И., Заблоцкий А. И., Золотенков И. А., Ковалев В. А., Колпаков Г. А., Кудряшов Н. А., Подолько М. Л., Савченко Г. А., Салтыков А. С., Ступин В. И. Скважинное подземное выщелачивание золота, монография. — Винпресс, 2017. — 335 с.

19. Шумилова Л. В., Юргенсон Г. А. Роль химии и микробиологии в сфере горного дела: состояние проблемы и перспективные задачи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3-1. — С. 40—56. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-31-0-40.

20. Lifton J. The global technology metals markets: a conference primer // Investor Intel. Aug.16, 2015, pp. 835—840.

21. Yurgenson G. A., Nemes V. Actual geoethical and geoenvironmental problems and history of developing geothics in the Russian Federation / Abstracts of the International Conference on geothics. Prague-Pribram, 2015, pp. 14—15.

22. Chopabayeva N. Sorption and description of rhenium ions by lignin sorbents // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2019, vol. 54, no. 3, pp. 585—594.

23. Krishnan S., Zulkapli N. S., Kamyab H., Taib S., Din M., Z. Majid A., Chairapat S., Kenzo I., Ichikawa Y., Nasrullah M., Chelliapan S., Othman N. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview // Environmental Technology and Innovation. 2021, vol. 22, article 101525. DOI: 10.1016/j.eti.2021.10152521.

24. Lotter N. O., Evans C. L., Sampling E. K. A key tool in modern process mineralogy // Minerals Engineering. 2018, vol. 116, pp. 196—202. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.07.013.

25. Gleeson D. Getting to the core // International Mining. February 2019, pp. 64—68. 

## REFERENCES

1. Surin S. D. Prospects for the development of physico-chemical geotechnology in Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3-1, pp. 4—17. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-31-0-6.

2. Mashkovtsev G. A. Mineral resource base of solid minerals suitable for development by methods of physico-chemical geotechnology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3-1, pp. 384—394.

3. Arens V. Zh., Shumilova L. V., Fazlullin M. I., Khcheyan G. H. Promising directions of chemical and microbiological processing of mineral raw materials of non-ferrous and precious metals. *Metallurg.* 2017, no. 9, pp. 82 – 89.
4. Yurgenson G. A., Chechetkin V. S., Asoskov V. M., Chaban N. N., Konstantinova T. A., Myazin V. P. *Geologicheskie issledovaniya i gornopromyshlennyy kompleks Zabaykal'ya* [Geological research and mining complex of Transbaikalia], Novosibirsk, Nauka, 1999, 574 p.
5. Ontoev D. O. *Stadiynost' mineralizatsii i zonal'nost' mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Stage mineralization and zonality of deposits of Transbaikalia], Moscow, Nauka, 1974, 224 p.
6. Gongal'skiy B. I., Sergeev A. D. Khapcheranginsky tin ore deposit. *Mestorozhdeniya Zabaykal'ya.* T. 1, kn. 1 [Deposits of Transbaikalia, vol. 1, book 1], Chita-Moscow, 1995, pp. 101 – 105.
7. Gayvoronskiy B. A. Sherlovogorskoye field. *Mestorozhdeniya Zabaykal'ya.* T. 1, kn. 1 [Deposits of Transbaikalia, vol. 1, book 1], Chita-Moscow, 1995, pp. 130 – 133.
8. Yurgenson G. A., Kononov O. V. Sherlova Gora: a deposit for gemstones and rare metals. *Mineralogical Almanac.* 2014, vol. 19, no. 2, pp. 12 – 93.
9. Boyko S. M. *Elementy-primesi v kassiteritakh olovorudnykh mestorozhdeniy kak indikator zonal'nogo raspredeleniya komponentov v rudnykh telakh* [Impurity elements in cassiterites of tin ore deposits as an indicator of the zonal distribution of components in ore bodies]. *Zap. Zabayk. phil. Geogr. o-va USSR,* 1982. issue 48, pp. 39 – 43.
10. Kharitonov Yu. F., Vasiliev V. G., Andreychuk D. A., Glazunov A. P. Ecological and economic assessment of waste from the mining complex of the Chita region. *Resursy Zabaykal'ya.* 2002, special edition, pp. 63 – 69.
11. Dolomanova E. I. Lead-zinc mineralization in some cassiterite-quartz-sulfide deposits of Eastern Transbaikalia. *Trudy instituta geologii rudnykh mestorozhdeniy, petrografii, mineralogii i geokhimii* [Proceedings of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry], Moscow, 1963, no. 83, pp. 468 – 504.
12. Kasatkin A. V., Klopotov K. I., Plašil J. Supergene minerals of Sherlovaya Gora. *Mineralogical Almanac.* 2014, vol. 19, issue 2. Pp. 94 – 137.
13. Drobyshev V. F., Kuligin V. Ya., Fatyanov A. V., Krasnikova T. I., Ilyin Yu. D., Glo-tova E. V., Deryabina N. A., Pinigin S. A. New technologies for processing ores of Transbaikalia. *Resursy Zabaykal'ya.* 2002, special edition, pp. 80 – 85.
14. Fedoseev V. V., Gadzhieva L. A. Experience and results of revaluation of gold deposits of the Chelyabinsk region for open-pit mining and leaching by lowering the onboard content. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth.* 2020, no. 1, pp. 328 – 339. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-328-339.
15. Kudryashov N. M., Udoratina O. V., Coble M., Steshenko E. N. Geochronological and geochemical study of zircon from tourmaline-muscovite granites of the archaean Kolmozero-Voronya Greenstone belt: insights into sources of the rare-metal peg-matites. *Minerals.* 2020, vol. 10, no. 9, article 760. DOI: 10.3390/min10090760.
16. Voitekhovskiy Y. L., Zakharova A. A. Petrographic structures and Hardy-Weinberg equilibrium. *Journal of Mining Institute.* 2020, vol. 242, pp. 133 – 138. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.133.
17. Nechaev A. V., Polyakov E. G., Belousova E. B., Pikalova V. S., Bykhovskiy L. Z. Mineral resource base of niobium of Russia: priorities of development. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie.* 2020, no. 4-5, pp. 8 – 15.
18. Fazlullin M. I., Avdonin G. I., Belousov A. B., Gurov V. A., Evteeva L. I., Zabolotskiy A. I., Zolotnikov I. A., Kovalev V. A., Kolpakov G. A., Kudryashov N. A., Podolyako M. L., Savchenko G. A., Saltykov A. S., Stupin V. I. *Skvazhinnoe podzemnoe vyshchelachivanie zolota*, monografiya [Borehole underground leaching of gold, monograph], Vinpress, 2017, 335 p.
19. Shumilova L. V., Yurgenson G. A. The role of chemistry and microbiology in the field of mining: the state of the problem and promising tasks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3-1, pp. 40 – 56. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-31-0-40.

20. Lifton J. The global technology metals markets: a conference primer. *Investor Intel.* Aug. 16, 2015, pp. 835 – 840.

21. Yurgenson G. A., Nemeč V. Actual geoethical and geoenvironmental problems and history of developing geoethics in the Russian Federation. *Abstracts of the International Conference on geoethics.* Prague-Přibram, 2015, pp. 14 – 15.

22. Chopabayeva N. Sorption and description of rhenium ions by lignin sorbents. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* 2019, vol. 54, no. 3, pp. 585 – 594.

23. Krishnan S., Zulkapli N. S., Kamyab H., Taib S., Din M., Z. Majid A., Chairapat S., Kenzo I., Ichikawa Y., Nasrullah M., Chelliapan S., Othman N. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology and Innovation.* 2021, vol. 22, article 101525. DOI: 10.1016/j.eti.2021.10152521.

24. Lotter N. O., Evans C. L., Sampling E. K. A key tool in modern process mineralogy. *Minerals Engineering.* 2018, vol. 116, pp. 196 – 202. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.07.013.

25. Gleeson D. Getting to the core. *International Mining.* February 2019, pp. 64 – 68. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шумилова Лидия Владимировна<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
доцент, профессор, e-mail: shumilovalv@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

Юргенсон Георгий Александрович – д-р геол.-минерал. наук,  
профессор, главный научный сотрудник,  
Институт природных ресурсов, экологии  
и криологии СО РАН, e-mail: yurgga@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-7818-7528,

Хатькова Алиса Николаевна<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
профессор, проректор по научной  
и инновационной работе,  
e-mail: alisa1965.65@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет.

**Для контактов:** Шумилова Л.В., e-mail: shumilovalv@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.V. Shumilova<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Professor, e-mail: shumilovalv@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

G.A. Yurgenson, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor,  
Chief Researcher, Institute of Natural Resources,  
Ecology and Cryology, Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, Chita, Russia,  
e-mail: yurgga@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-7818-7528,

A.N. Khatkova<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
e-mail: alisa1965.65@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

<sup>1</sup> Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia.

**Corresponding author:** L.V. Shumilova, e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Получена редакцией 04.07.2022; получена после рецензии 28.07.2022; принята к печати 10.08.2022.

Received by the editors 04.07.2022; received after the review 28.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.