

УДК 553.43:622.7(571.54)

DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-44-56

АССОЦИАЦИИ МИНЕРАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ В РУДАХ И ПРОДУКТАХ ОБОГАЩЕНИЯ ВОСТОЧНОЗАБАЙКАЛЬСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

© А.И. Трубачев¹, А.Г. Секисов², А.Ю. Лавров³¹⁻³Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30.

Рассмотрено распределение и разнообразие (главные, второстепенные, редковстречающиеся) основных ассоциаций минералов и элементов в рудах и продуктах обогащения (концентраты, хвосты обогащения, кеки и др.) важнейших месторождений цветных и благородных металлов Восточного Забайкалья: Дарасунского, Ключевского, Балейско-Тасеевского, Новоширокинское, Удоканского, Бугдаинского. Установлены значения накопления в концентратах и рассеяния в хвостах рудных элементов в сравнении с первичными (содержаниями) в рудах. Эти данные получены на основе изучения количественного распределения минералов и элементов. Основной формой проявления элементов в рудах и концентратах является минеральная с участием изоморфных примесей, металлорганических соединений (биогенных) и не до конца выясненной ролью рассеянных (дисперсных) их форм; в хвостах преобладают техногенные формы. Для извлечения минеральных форм рассмотрены традиционные методы (гравитация, флотация, кучное выщелачивание и др.), а других, в том числе дисперсных, – инновационные физико-химические, основанные на многоступенчатом подходе, включающем специальную подготовку руд и реагентов и проведение самого технологического процесса, специфического для каждого элемента. Разработанные технологии включают ряд операций: взрывная подготовка и впрыск реагента, двухступенчатая электрообработка в хлоридно-пероксидной среде, стадийное сорбционное выщелачивание; для извлечения дисперсного золота – механохимическая подготовка, окисление с использованием различных реагентов.

Ключевые слова: ассоциации минералов, элементов, месторождения цветных и благородных металлов, формы нахождения элементов, геотехнологии извлечения.

Формат цитирования: Трубачёв А.И., Секисов А.Г., Лавров А.Ю. Ассоциации минералов и элементов в рудах и продуктах обогащения восточнозабайкальских месторождений цветных и благородных металлов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 44–56. DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-44-56.

ASSOCIATIONS OF MINERALS AND ELEMENTS IN ORES AND DRESSING PRODUCTS OF EAST BAIKAL BASE AND PRECIOUS METAL DEPOSITS

A.I. Trubachev, A.G. Sekisov, A.Yu. Lavrov

Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, 672039, Russia.

The article considers the distribution and variety (major, minor, of rare occurrence) of main associations of minerals and elements in ores and dressing products (concentrates, tailings, cakes, etc.) of the most important deposits of base and precious metals in Eastern Transbaikalia: Darasunskoe, Klyuchevskoe, Baleisko-Taseevskoe, Novoshirokinskoe, Udokan, Bugdainskoe. The accumulation values in the concentrates and dissemination values in the tailings of ore elements are determined in comparison with the primary contents in ores. These data are obtained on the basis of the study of the quantitative distribution of minerals and elements. The main form of element occurrence in ores and concentrates is mineral one with the participation of isomorphous impurities, organometallic compounds (biogenic) and still unclear role of the disseminated (dispersed) forms; technogenic forms

¹Трубачев Алексей Иванович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, e-mail: Sekisovag@mail.ru

Trubachev Aleksei, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, e-mail: Sekisovag@mail.ru.

²Секисов Артур Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: sekisovag@mail.ru

Sekisov Artur, Doctor of technical sciences, Professor, e-mail: sekisovag@mail.ru

³Лавров Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: Sekisovag@mail.ru

Lavrov Alexander, Candidate of technical sciences, Associate Professor, e-mail: Sekisovag@mail.ru

predominate in the tailings. Traditional methods (gravity concentration, flotation, heap leaching, etc.) are considered for the extraction of mineral forms. For other forms including dispersion ones an innovative physico-chemical method and the method based on a multistage approach including special preparation of ores and reagents and conducting of the technological process specifically for each element are discussed. The developed technologies include a number of operations: explosive preparation and reagent injection, two-stage electric treatment in the peroxide-chloride environment, staged sorption leaching; mechanic and chemical preparation for dispersed gold extraction, oxidation with the use of various reagents.

Keywords: association of minerals and elements, deposits of base and precious metals, occurrence forms of elements, extraction geotechnology

For citation: Trubachev A.I., Sekisov A.G., Lavrov A.Yu. Associations of minerals and elements in ores and dressing products of east Baikal base and precious metal deposits. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 3 (56). Pp. 44–56. DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-44-56.

Введение

В геохимическом цикле геологических наук существует два важнейших понятия: «минеральный парагенезис (парагенезис минералов, парагенетическая ассоциация минералов)» и «минеральная ассоциация». В 1966 г. на коллоквиуме в г. Фрайберге [1] были предложены следующие их определения, которых мы и будем придерживаться.

Минеральный парагенезис – это минеральная ассоциация, возникшая закономерно в течение определенного ограниченного в пространстве и времени процесса, обусловленного, прежде всего, физико-химическими законами.

Минеральная ассоциация – это сообщество минералов, происхождение которого вызвано несколькими генетически различными действиями, и сочетание которых может быть случайным.

Изучение парагенезиса минералов крайне важно для выяснения генезиса минералов и руд в месторождениях, особенно в расшифровке этапов и стадий формирования, так как в каждую из них образуются только ей присущие минералы.

Минеральная ассоциация – это совокупность всех минералов, сформированных за всю историю становления месторождения. В одном образце (штуфе, пробе) могут находиться все минералы, образованные в этом месторождении. Изучение минеральных ассоциаций крайне важно для геотехнологов, поскольку они разрабатывают технологические схемы, реагентные режимы и оборудование для руд, представленных

именно минеральными (а не парагенетическими) ассоциациями.

Для элементов, находящихся в рудах, также важно различать их парагенезисы и ассоциации, формы проявления которых весьма разнообразны.

В свете вышесказанного нами проанализированы как собственные материалы, так и материалы, полученные другими исследователями по восточнозабайкальским месторождениям различных рудно-формационных и минеральных типов [2–8].

Актуальность рассматриваемой проблемы вызвана выяснением состояния дел по важнейшим месторождениям Восточного Забайкалья, в недрах которых сосредоточены значительные запасы полезных компонентов, выявлением форм их накопления и рассмотрением технологий извлечения по возможности всех элементов (особенно дисперсных их форм) из руд и техногенных отходов с применением физико-химических (инновационных) способов. Предложенные подходы к данной проблеме в зарубежной литературе не освещались.

Ассоциации минералов и элементов в рудах месторождений

Дарасунское месторождение принадлежит к золото-сульфидно-кварцевому рудно-формационному типу сложного сульфидно-сульфосольного состава. Главная минеральная ассоциация представлена следующими рудообразующими минералами: пирит – арсенопирит – халькопирит – пирротин – галенит – сфалерит – блеклые руды – бурнонит – золото – тетрадимит с ассоциирующими

элементами: Fe – As – Cu – Pb – Zn – Sb – Au – В I – Te – S. Во второстепенной ассоциации преобладают: марказит – антимонит – цинкениит – джемсонит – буланжерит – бертьерит – электрум – висмут самородный – козалиит – виттихенит – айкинит – халькостибит – густавит – верлит – гессит со следующими элементами: Fe – Sb – Au – Pb – Ag – Bi – Cu – S [3–5].

В редковстречающейся ассоциации развиты молибденит – реальгар – мышьяк самородный – гематит – вольфрамит – серебро самородное – теллур самородный – кубанит – валлериит – грейгит – смайтит – виллемит – геокронит – плагионит – семсейит со следующими элементами: As – Mo – Fe – W – Mn – Ag – Te – Cu – Zn – Pb – Se – S.

Средние содержания рудообразующих минералов в рудах таковы: пирит и марказит – 3,8%, арсенопирит – 1,72%, пирротин – 0,05%, сфалерит – 0,18%, галенит – 0,06%, блеклые руды – 0,01%, висмутин – знаки, магнетит – 0,026%; средние содержания элементов в рудах: As – 0,81%, Cu – 0,11%, Pb – 0,08%, Zn – 0,04%, S – 2,9%, Bi – 0,002%, Au – 5,3 г/т, Ag – 8,3 г/т; в рудообразующих сульфидах содержания элементов колеблется в широких пределах (табл. 1).

Ключевское месторождение того же рудно-формационного типа, что и Дарасунское, но специфического пирит-турмалинового минерального состава, характеризуется разнообразием минералов. Главная ассоциация руд: пирит – арсенопирит – халькопирит – гематит – галенит – сфалерит – золото самородное с преобладающими элементами: Fe – As – Cu – Pb – Zn – Au – S – O. Во второстепенной ассоциации развиты: фрейбергит – рутил – золото – энаргит – теннантит – молибденит – магнетит с элементами: Fe – Ti – Cu – As – Sb – Mo – Ag – S – O. Редко встречающаяся ассоциация разнообразна по набору минералов: ильменит – макинавит – хромит – мушкетовит – пирротин – глаукоdot – петцит – акантит – люционит – фаматинит – тетраэдрит – висмутин – висмут самородный –

сульфовисмутин – тетрадимит – антимонит-марказит – борнит – альгодонит – валлериит – калаверит – шеелит, где также широк набор элементов: Fe – Ti – N – Cr – Co – As – Au – Ag – Te – Pb – Cu – Sb – Bi – W – S – O.

Содержание минералов в рудах месторождения, %: пирит – 12,2, арсенопирит – 0,22, халькопирит – 0,3, магнетит – 0,1, гематит, сфалерит, галенит, теннантит – 0,02, остальные вышеназванные минералы – от знаков до 0,005.

Содержание элементов в рудах: Cu – 0,12%, Zn – 0,13%, Sb – 0,03%, Co – 0,06%, Ni – 0,06%, Pb – 0,03%, S – 7,9%, Au – 2,15 г/т, Ag – 2,12 г/т. В пирите содержания элементов колеблются: As – 0,1–1,0%, Cu – 0,05–1%, Co – 0,01–0,1%, Bi – 0,001–0,02%, Mo – 0,001–0,02%, V – 0,005%, Au – 5–20 г/т, Ag – 1–200 г/т; в халькопирите: As – 0,1–0,7%, Bi – 0,005%, Zn – 0,05%, Sb – 0,1–0,2%, Pb – 0,01%, Au – 10–50 г/т, Ag – 20–100 г/т [3, 5, 9].

Балейско-Тасеевское месторождение относится к золото-серебряной рудной формации с преобладающим золото-халцедон-кварцевым минеральным типом. В их рудах главную роль играют порообразующие минералы – кварц, халцедон, кальцит, доломит, каолинит, слюды, гидрослюды (1–99% всей массы руд), рудообразующие минералы (их доля в рудах составляет от следов до 1–2%) относятся к второстепенным и редким: пирит – марказит – бертьерит – арсенопирит – халькопирит – бурнонит – пираргирит – фрейбергит – стефанит – антимонит – тетраэдрит – галенит – сфалерит – геокронит – гессит – калаверит – золото – серебро – висмутин – пирротин – теллуриды серебра, висмута – киноварь – реальгар – аурипигмент – халькозин – ковеллин – скородит – малахит – азурит с элементной ассоциацией: Fe – As – Cu – Au – Ag – Sb – Pb – Zn – Bi – Hg – S. Содержания элементов в рудах: Pb – 0,008–0,36%, As – 0,04–0,86%, Sb – 0,009–0,2%, Bi – 0,016%, Cu – 0,003–0,1%, Au – 1,5–6,8 г/т (известны содержания в десятки-сотни кг/т), Ag – 1,3–12

Таблица 1

**Содержание рудных элементов в сульфидных минералах
Дарасунского месторождения, г/т [3, 5]**

Минерал	Элемент						
	Ag	Bi	Se	Te	In	Ge	Au
Пирит	30	167	25	20	–	31	55.5
Арсенопирит	49	384	10	43	1	14	65.5
Пирротин	26	550	2	95	–	–	–
Халькопирит	335	227	22	129	87	2	193
Галенит	2180	2060	14	49	–	2	19.4
Сфалерит	54	24	–	–	129	–	–
Блеклые руды	3190	500	–	4	58	7.5	139
Бурнонит	1490	2200	4.5	8.5	35	–	–
Антимонит	15	55	–	–	–	–	–

г/т. В пирите содержатся (п. 10^{-3}): Ag – 0,3–1,0%, As – 100–220%, Sb – 15–29%, Pb – 2–41%, Cu – 5–24%, Zn – 12–22%, Co – 1,3–3,9%, Ni – 1,1–2,1%, Au – 0,01–0,03 г/т, Bi – 0,001–0,01%, Tl – 0,001–1% [2, 3, 5, 9].

В рудах *Новоширокинского месторождения* главная ассоциация минералов представлена галенитом, сфалеритом и пиритом с ассоциацией четырех элементов – Pb – Zn – Fe – S; второстепенная – блеклыми рудами, халькопиритом, антимонитом с элементами: As – Sb – Cu – Fe – S – O; редковстречающаяся ассоциация более многочисленна как по минералам (гематит – бурнонит – золото – марказит – буланжерит – вюрцит – джемсонит – арсенопирит – молибденит – магнетит – аргентит – висмутин – галенобисмутит – киноварь – аурипигмент – реальгар – антимонит, так и элементов: Fe – As – Sb – Au – Ag – Zn – Mo – Bi – Hg – Pb – S – O [3, 5].

Содержания рудообразующих минералов на месторождении колеблются от 6 до 14%, в том числе, %: пирит – 2,4–7,5, галенит – 2,5–3,0, сфалерит – 1,0–1,5, блеклые руды – 0,2–0,4, халькопирит – 0,03–0,2, остальные вышеназванные минералы – от знаков до тысячных долей процента.

Содержания элементов в рудах: Pb – 0,78–5,77%, Zn – 0,53–1,25%, Cu – 0,1–1,28%, Fe – 4,72–8,9%, S – 1,27–17,2%,

Mn – 0,3–7,42%, As – 0,03–1,0%, Sb – 0,06–0,41%, Ni – 0,0001–0,05%, Co – 0,0001–0,003%; Au – 1,0–41,2 г/т, Ag – 49,7–128,05 г/т, In – 1–7 г/т, Cd – 5–54,4 г/т, Se – следы – 10 г/т, Te – следы – 10 г/т.

В главных минералах месторождения распределение элементов неравномерное (табл. 2).

В рудах *Удоканского месторождения* в главной ассоциации присутствуют: халькозин – борнит – джарлеит – магнетит с элементами Cu – Fe – Au – Ag – S – Hg – O; во второстепенной – халькопирит – пирит – анилит – гематит с элементами: Cu – Fe – Au – Ag – Co – Ni – Bi – S; в редковстречающейся: дигенит – блеклые руды – сфалерит – молибденит – галенит – идаит – пирротин – марказит – виттихенит – золото – серебро – киноварь – аргентит – валлеиит – пентландит – полидимит – карролит – кобальтин – арсенопирит – штромейерит – сульванит с элементами: Cu – Sb – As – Mo – Pd – Zn – Fe – Bi – Co – Ni – Ag – Au – Pt – Pd – S – O [3–5, 7].

Содержания основных рудообразующих минералов, %: группа халькозина (халькозин, анилит, джарлеит, дигенит) – 3,64, борнит – 3,44, халькопирит – 0,96, пирит – 0,32, магнетит и гематит – 5,0, остальные рудные минералы – десятые доли процента.

Таблица 2

Элементы-примеси в рудообразующих минералах месторождения, г/т [3, 5]

Минерал	Элемент								
	Se	Te	In	Ge	Ga	Tl	Bi	Au	Ag
Галенит	2	4,2	3	сл.	сл.	2	20	12,3	572,1
Сфалерит	19	9	30	сл.	4	сл.	сл.	3,4	113
Пирит	12	4	5	сл.	11	212	сл.	14,8	180,4

Примечание. «Сл.» – следы полезного компонента

Содержания элементов в рудах: Cu – 1,56%, Fe – 3,8–7,28%, S – 0,34%, Pb – следы – 0,13%, Zn – следы – 0,3%, Bi – 0,006%, Mo – 0,001–0,01%, Ni – следы – 0,03%, Co – следы – 0,03%; Re – 1–2 г/т, Se – следы – 7 г/т, Te – следы – 7 г/т, Au – 0,015–0,025 г/т, Ag – следы – 95,3 г/т [3–5, 7].

Бугдаинское месторождение является крупнейшим в Забайкалье и России по запасам молибдена, но в его рудах также содержатся в промышленных содержаниях свинец, цинк, вольфрам, серебро и золото.

Главную ассоциацию руд составляют: молибденит – пирит – галенит – сфалерит с элементами: Mo – Fe – Pb – золото с элементами: Cu – W – Au – Sb – As; в редковстречающейся: борнит – халькозин – шеелит – арсенопирит – висмутин – касситерит – магнетит с элементами: Cu – W – As – Sb – Bi – Fe – Au – Sn.

Содержания рудообразующих минералов, %: пирит – 2,24–2,56, молибденит – 0,13–0,18, галенит – 0,12–0,15, сфалерит – 0,1–0,24, халькопирит – 0,05–0,09, халькозин и борнит – 0,001–0,009, ферримолибдит – 0,001, вольфрамит – 0,056, шеелит – 0,009–0,03, арсенопирит – 0,001, висмутин – 0,12–0,86, касситерит – 0,004, ильменит – 0,04, мартит – 0,09–0,2.

Содержания элементов в рудах, %: Mo – 0,083, Pb – 0,14, Zn – 1,52, Cu – 0,02, S – 0,003, Bi – 0,003, W – 0,2 Ga – 0,0017, Li – 0,005, Co – 0,008, As – 0,02, Ni – 0,008, Sn – 0,002, Cr – 0,002; в г/т; Au – 0,2, Ag – 4,3, Ge – 3,0, Cd – 6,0, La – 45,0, Nb – 10,0, Se – 9,0, Re – 1,0 [3, 5, 8, 10].

Анализ материалов по охарактеризованным месторождениям свидетельствует о том, что полный набор ассоциируемых элементов (от главных до редких) различен. Однако повсеместно во всех месторождениях представлены: Fe – As – Cu – Pb – Zn – Sb – Bi – Au – Ag – Mo – W – Hg – Co – Ni – Se – Te – S – O, в отдельных месторождениях – Sn – Ti – Mn – Pt – Pd.

Геохимическую ассоциируемость рудообразующих элементов объективно можно оценить близостью их ядерно-физических, а также химических и физико-химических свойств [11].

Ассоциации минералов и элементов в продуктах обогащения

Основными продуктами обогащения обычно являются различные концентраты (гравитационные, флотационные и др.), в которых сосредоточены главные рудообразующие минералы, целиком наследующие минеральный состав руд, а также хвосты, в которых накапливаются пороодообразующие минералы и в меньшей степени ряд рудообразующих. При эксплуатации отдельных месторождений скопились отвалы огарков, кеки цианирования, хвосты цианирования и др.

Ниже приводится краткая характеристика состава продуктов обогащения, полученных при эксплуатации вышерассмотренных месторождений [3–5, 7–10].

Дарасунское месторождение. При его эксплуатации применялась гравитационно-флотационная схема обогащения и амальгамация. Продуктами переработки руд были: концентрат (выход 9,5%), огарки подового обжига, кеки цианирования и хвосты обогащения.

В составе концентратов установлены почти все рудообразующие минералы, но их количественные соотношения не установлены. Химсостав концентрата таков: SiO_2 – 16,2%, S – 31,02%, As – 5,8%, Cu – 1,68%, Zn – 0,16%, Pb – 0,17%, Co – 0,02%, Mo – 0,0007%, Ni – 0,003%, Sn – 0,003%, Sb – 0,1%, Ti – 0,5%, W – 0,001%, Se – 0,0005%, Bi – 0,003%, Au – 40 г/т, Ag – 54 г/т.

В отвалах огарков подового обжига, занимающих площадь 0,7 га и массой 50 тыс. т содержания: Au – 7,2 г/т, Ag – 30 г/т, S – 4,1%, As – 0,75%; запасы в них: Au – 310 кг, Ag – 1500 кг, As – 475 т, S – 2050 т.

В отвалах кеков цианирования площадью 1,57 га и массой 100 тыс. т содержания: Au – 7 г/т, Ag – 9,3 г/т, S – 24,4%, As – 3,8%. Запасы: Au – 700 кг, Ag – 930 кг, S – 24400 т, As – 3900 т.

В хвостах обогащения площадью 80 га и массой 4710 тыс. т содержания: Au – 0,36 г/т, Ag – 1,18 г/т, Cu – 0,013%, As – 0,07%, Pb – 0,005%, Zn – 0,01%, запасы: Au – 1700 кг, Ag – 5,6 т, Cu – 61,2 т, Zn – 47 т [5].

При эксплуатации *Ключевского месторождения* основными продуктами были: гравииоконцентрат (извлечение золота 15%), флотоконцентрат (извлечение золота 20%), хвосты флотации (площадь 30 га, масса 11180 т) и хвосты цианирования (площадь 31 га, масса 1500 т).

Содержания элементов:

– во флотоконcentратах: Au – 27,2–32,1 г/т, Ag – 14,2–32 г/т, S – 26,8–34,5%, Cu – 0,06–0,5%, Pb – 0,8–0,37%, Zn – следы – 0,2%, Sb – 0,01–0,14%, As – 0,41–0,74%, Co – 0,002%, SiO_2 – 0,5–10,3%;

– в хвостах флотации: Au – 0,77 г/т, Ag – 1,2 г/т, S – 3,5%, запасы в них: золота – 8600 кг, серебра – 10060 кг, в тонкозернистом материале хвостов минералы представлены кварцем, слюдами, окисленными сульфидами;

– в хвостах цианирования: As – 0,6 г/т, Ag – 2,3 г/т, Au – 0,07%, золото находится в разных формах: покрытое окисными пленками (58%), в сульфидах

(23%), в кварце (20%), запасы золота – 900 кг [5].

Из руд *Балейско-Тасеевского месторождения* получали флотоконцентраты и хвосты обогатительных фабрик.

Содержания во флотоконcentратах: As – 0,78%, S – 16,74%, Zn – 0,12%, SiO_2 – 39,8%, Bi – 0,001%, Co – 0,01%, Cu – 0,1%, Cr – 0,005%, Mg – 1,0%, Mo – 0,05%, Ni – 0,02%, Pb – 0,01%, Sn – 0,005%, Se – 0,0003%, Sb – 0,02%, Ti – 0,3%, Zr – 0,01%, Li – 0,01%, Pt – 0,3 г/т, Pd – 1,3 г/т, Au – 58 г/т, Ag – 41,4 г/т; формы золота в концентрате: свободное – 34,17%, в сростках – 51,73%, нерастворимое в цианидах – 17,6%.

В хвостах обогатительной фабрики установлены, %: кварц и халцедон – 54,3, полевые шпаты – 16,1, кальцит и арагонит – 1,9, глинисто-сланцевые минералы – 23, апатит, рутил, циркон – 1,52, окислы и гидроокислы Fe, Mn – 1,2, пирит и марказит – 0,9, арсенопирит – 0,2, пирротин – 0,1, в знаковых содержаниях: халькопирит, галенит, сфалерит, антимонит. Химический состав хвостов: Al_2O_3 – 8,8–17,8%, MgO – 0,73–1,23%, FeO – 2,09–10,8%, CaO – 0,48–1,92%, SiO_2 – 52,44–66,7%, K_2O – 2,1–3,2%, MnO – 0,26–0,67%, Pb – 0,009%, Cu – 0,006%, As – 0,015–0,075%, TiO_2 – 0,35–0,57%, Co – 0,0002%, Ni – 0,006%; Au – 0,1–1,1 г/т, Ag – 2,6–3,1 г/т; формы золота в хвостах: свободное – 10,5%, в сростках – 29,9%, в кварце, слюдах, полевых шпатах – 59,6% [3, 5, 9].

Новоширокинские руды обогащались по флотационной схеме (селективная и коллективно-селективная) в различных организациях. В полученных трех концентратах – свинцовом, цинковом и пиритном – основные полезные компоненты представлены теми же минералами, что и в рудах. Хвосты обогащения сложены кварцем, полевыми шпатами, слюдами, карбонатами (96–97% объема), в них также присутствуют пирит (до 2,5–3%) и другие сульфиды (0,5–1%): халькопирит, блеклые руды, гидроокислы Fe, Mn и в небольших количествах золото и серебро. Полный набор

элементов в концентратах и хвостах приводится в табл. 3.

Руды *Бугдаинского месторождения* характеризуются весьма сложным минеральным и элементным составом и текстурно-структурными особенностями, особенно в гранулометрии и морфологии молибденита и золота. В связи с этим для его руд разрабатывалась сложная гравитационно-флотационно-гидрометаллургическая технологическая схема обогащения с получением молибденового, золото-свинцового, пиритного концентратов и других продуктов (табл. 4).

При исследовании обогатимости медных руд *Удоканского месторождения* главное внимание уделено флотационному методу, хотя проводились испы-

тания и другими методами [7]. В концентратах из сульфидных руд содержания: Cu – 32,24%, Ag – 161,3 г/т, Au – 0,27 г/т, S – 10,1%; в хвостах этих руд: Cu – 0,13%, Ag – 1,64 г/т. В концентратах из смешанных руд содержания Cu – 28,5%, Ag – 172,4 г/т, Au – 0,32 г/т, S – 8,01%; в хвостах из этих руд: Cu – 0,145%, Ag – 1,08 г/т. В концентратах из окисленных руд содержания: Cu – 24,8%, Ag – 96,2 г/т, Au – 0,3 г/т, S – 4,2%, в хвостах этих руд содержание Cu – 0,22%, Ag – 0,62 г/т.

Кроме меди, золота и серебра в концентратах содержатся другие элементы (табл. 5).

Известно [12], что в концентратах содержание элементов по сравнению с рудами увеличивается, а в хвостах уменьшается в несколько раз, что

Таблица 3

**Химический состав продуктов обогащения
Новоширокинского месторождения [3, 5]**

Элемент	Свинцовый концентрат (выход 3,38%)	Цинковый концентрат (выход 0,95%)	Пиритовый концентрат (выход 2,4%)	Хвосты обогащения (выход 93,2%)
Pb, %	61,9	1,0	0,34	0,12
Zn, %	2,0	55,3	0,74	0,06
Cu, %	2,93	1,1	0,7	0,02
Fe, %	6,7	5,32	36,4	3,15
As, %	0,28	0,07	0,3	0,02
Sb, %	1,1	0,13	0,04	0,01
Mn, %	0,04	0,12	0,09	0,54
Cd, %	0,015	0,2	0,4	0,001
Ni, %	0,007	0,012	0,05	0,001
Co, %	0,01	0,005	0,02	0,002
Sn, %	0,005	0,005	0,08	0,005
U, %	0,01	0,01	0,01	0,01
Bi, %	0,009	0,001	0,0008	0,0007
In, %	0,012	0,12	0,0008	сл.
Se, %	0,001	0,001	0,001	0,01
Te, %	0,001	0,001	0,001	0,001
Ga, %	0,0005	0,0006	0,0006	0,002
TiO ₂ , %	0,07	0,11	0,26	0,34
SiO ₂ , %	3,0	2,3	10,8	54,4
CaO, %	0,44	0,6	0,9	5,2
MgO, %	0,7	0,8	0,9	5,6
Al ₂ O ₃ , %	0,3	0,4	2,6	9,3
S, %	17,5	1,44	42,4	0,28
Au, г/т	67	7,6	13,44	0,4
Ag, г/т	1159,5	143,6	25,6	4,3

Примечание. «Сл.» – следы полезного компонента.

хорошо видно на примере конкретных месторождений (табл. 6). Об этом можно судить по величине коэффициентов: в концентратах $K_k = C_k/C_p$, в хвостах $K_p = C_{xв}/C_p$, где K_k – коэффициент концентрирования элемента; K_p – коэффициент рассеяния; C_k – содержание элемента в концентрате; C_p – содержание элемента в руде; $C_{xв}$ – содержание элемента в хвостах.

Пределы колебаний коэффициентов для различных элементов в целом по всем месторождениям весьма значительны. Так, соотношение K_k/K_p для As – 6–19,5/0,01–0,09, Cu – 2,3–33,3/0,12–

0,2, Pb – 2,2–10,8/0,02–0,06, Zn – 1,5–100/0,05–0,15, Au – 1,6–20/0,07–0,32, Ag – 3,2–10,7/0,07–0,43, S – 4,4–21,2/0,02–0,13, Sb – 4,7–18,8/0,16.

Формы нахождения элементов в рудах и продуктах обогащения

Ученые, занимавшиеся исследованием форм нахождения элементов [12, 13], пришли к выводу, что в природе можно выделить следующие их формы: самостоятельные минеральные виды; изоморфные смеси (примеси) в минералах; биогенную форму; водные растворы; коллоиды с жидкой дисперсионной средой; газовые смеси; техногенные

Таблица 4

Технологические показатели руд Бугдаинского месторождения (в числителе – содержание, в знаменателе – извлечение) [3–5, 9]

Продукт	Выход	Mo, %	Au, г/т	Ag, г/т	Pb, %	Zn, %	Cu, %	WO ₃ , %	S, %
Молибденовый концентрат	0,156	$\frac{47,3}{83,8}$	$\frac{1,3}{0,72}$	$\frac{36,3}{0,9}$	$\frac{0,4}{0,5}$	$\frac{0,12}{0,13}$	$\frac{0,04}{0,3}$	$\frac{0,17}{1,57}$	$\frac{34}{5,9}$
Золото-свинцовый концентрат	0,095	$\frac{0,43}{0,46}$	$\frac{17,5}{58,2}$	$\frac{1919}{28,9}$	$\frac{45,4}{34,3}$	$\frac{8,2}{5,3}$	$\frac{3,31}{15}$	$\frac{0,12}{0,64}$	$\frac{29}{3}$
Пиритный концентрат	0,89	$\frac{0,51}{5,2}$	$\frac{0,49}{1,56}$	$\frac{19,5}{2,77}$	$\frac{0,08}{0,5}$	$\frac{0,66}{4,1}$	$\frac{0,44}{18,5}$	$\frac{0,01}{0,5}$	$\frac{48}{46}$
Кристаллический хлорид свинца	0,048	–	–	–	$\frac{70}{26,4}$	–	–	–	–
Медь цементационная	0,004	–	–	$\frac{35847}{22,76}$	–	–	$\frac{99,5}{18,5}$	–	–
Цинк катодный	0,032	–	–	–	–	$\frac{99,5}{22,45}$	–	–	–
Хвосты обогащения	98,77	$\frac{0,009}{10,54}$	$\frac{0,06}{21,3}$	$\frac{2,74}{43,1}$	$\frac{0,05}{38,2}$	$\frac{0,1}{68,0}$	$\frac{0,01}{47,2}$	$\frac{0,02}{97,3}$	$\frac{0,4}{45}$
Исходная руда	100	$\frac{0,09}{100}$	$\frac{0,28}{100}$	$\frac{6,3}{100}$	$\frac{0,13}{100}$	$\frac{0,15}{100}$	$\frac{0,02}{100}$	$\frac{0,017}{100}$	$\frac{0,9}{100}$

Таблица 5

Средние содержания элементов в Удоканских концентратах, г/т [3, 7]

Концентрат	Элемент							
	Bi	Mo	Pb	Zn	Co	Ni	Se	As
Халькозиновый	2	5	33	1000	–	–	–	сл.
Борнитовый	20	14	8	100	5	7	5,3	80
Халькопиритовый	3	25	6	300	52	20	–	100
Пиритовый	1	64	4	300	112	44	–	–

Примечание. «Сл.» – следы полезного компонента.

Таблица 6

Коэффициенты концентрирования (в числителе) и рассеяния (в знаменателе) элементов в месторождениях Восточного Забайкалья

Элемент	Месторождение				
	Дарасун	Ключевское	Новоширокинское	Балей-Тасей	Удокан
As	7,16/0,09	6,0/–	7,1/0,02	19,5/0,17	–
Cu	15,3/0,12	4,17/–	2,28/0,2	33,3/0,2	18,6/–
Pb	2,2/0,06	2,66/–	10,7/0,02	2,16/0,02	30/–
Zn	3,9/0,15	1,54/–	44,2/0,05	–	100/–
Au	7,6/0,07	14,9/0,32	1,62/0,18	8,5/0,12	20/–
Ag	6,8/0,14	15,2/0,43	9,3/0,08	3,15/0,21	10,7/–
S	10,7/0,13	4,4/0,04	13,8/0,02	–	21,2/–
Sb	–	4,7/0,16	18,3/0,16	–	–
Fe	–	–/0,35	1,32/0,35	–	–
Ni	–	–/0,002	12/0,002	–	80/–
Co	–	–/0,02	2,15/0,02	–	19/–

Примечание. Прочерк – нет данных.

соединения; магматические расплавы; состояние рассеяния.

Из названных форм нахождения элементов можно говорить о присутствии в месторождениях следующих форм (табл. 7).

В Забайкальских месторождениях наибольшее развитие получили самостоятельные минеральные виды, число которых для каждого элемента индивидуальное; изоморфные смеси выявляются у многих элементов, но их конкретное число в каждом месторождении также индивидуальное; биогенная форма предполагается в виде металлоорганических соединений для отдельных элементов, например Au, Ag, Cu, Pb, Zn и др.; коллоидная форма, в которой дисперсионная фаза представлена металлами, оксидами, сульфидами, карбонатами, сульфатами и может представлять интерес для руд, развитых в зонах окисления; техногенное соединение в виде сплавов металлов, цианидов, различных сульфатных, карбонатных, оксидных минералов и соединений, сформированных по сульфидам и находящихся в хвостохранилищах, особенно при длительной их существовании; к элементам, находящимся в состоянии рассеяния, следует отнести не улавливаемые современными аналитическими методами – это элементы дисперсные или наноразмерные, а по терми-

нологии Л.Н. Овчинникова [12] это элементы-следы, редкие элементы, малые элементы, элементы-примеси, микроэлементы.

Технология извлечения элементов

Технологические испытания руд рассматриваемых месторождений Восточного Забайкалья проводили специалисты многих организаций: Механобр, Гинцветмет, Иргиредмет, Уралмеханобр, Вниипрозолото, ЗабНИИ, ЧитПи, МИСИС, ЦЛ Читагеология, ППГХО и др. [3–5, 9]. Наиболее часто применяемые методы обогащения: гравитация, флотация, флотогравитация, гидрометаллургия, а в последнее время кучное выщелачивание, позволяют получать различные по составу концентраты с тем или иным выходом и с разным содержанием в них главных и сопутствующих элементов. В целом качество концентратов удовлетворяет требованиям государственных стандартов, технических условий. Учитывая, что почти во всех месторождениях выделяются различные геолого-технологические сорта руд – сульфидные, смешанные, окисленные, а по содержанию элементов – богатые, средние, бедные, в технологические схемы вносят различные усовершенствования. Предложенные схемы извлечения элементов из руд ориентированы на их минеральные формы. Другие формы –

Таблица 7

**Формы проявления элементов в рудах и продуктах обогащения
забайкальских месторождений цветных и благородных металлов**

Элемент	Минеральные виды и их количество (в скобках)	Изоморфные примеси	Биогенная	Коллоидная	Техногенная	Дисперсная
Cu	+ (21)		+	+	+	+
Fe	+ (21)		+	+	+	+
Pb	+ (10)		+	+	+	+
Zn	+ (3)		+	+	+	+
As	+ (13)	+		+	+	+
Sb	+ (15)	+		+	+	+
Co	+ (4)	+			+	
Ni	+ (4)	+			+	
Bi	+ (7)	+				+
Se	+ (2)	+				+
Te	+ (7)	+				+
Re		+				
Ge		+	+			
Cd		+				
Mo	+ (3)			+	+	
S	+ (57)			+	+	
Au	+ (4)	+		+		+
Ag	+ (11)	+				+
МППГ		+				+
Ga		+				
In		+				
W	+ (3)					
Hg	+ (1)					+

Примечание. Пустые клетки – формы не проявлены.

изоморфные, металлоорганические, коллоидные, рассеянные (дисперсные) – требуют разработки новых технологий. Особенно это касается извлечения дисперсного золота и других благородных металлов (Ag, Pt, Pd).

Длительное время в ЧФ ИГД СО РАН успешно разрабатываются технологии, включающие следующие операции:

1. Взрывная подготовка руд к выщелачиванию и впрыск в них по образовавшимся трещинам высокоактивных реагентов, в качестве которых используются кислотные и щелочные растворы, насыщенные газами O₂, H₂, CO₂, Cl₂ и др.

2. Система двухступенчатой электрообработки в хлоридно-пероксидной среде: первая ступень – электролиз с образованием активных форм кислорода и хлора; вторая – мягкий электроразряд, обеспечивающий протекание комплекса

реакций в плазмообразной форме с использованием фотоэлектрохимического реактора, который позволяет осуществлять синтез высокоактивных соединений кислорода, водорода, хлора и фотокаталитическое воздействие в процессы, протекающие на границе раздела фаз.

3. Стадийное сорбционное выщелачивание благородных металлов с активацией пульпы и сорбентов в чановом, кучном, кюветном, кюветно-кучном, подземном (шахтном и скважинном) вариантах [9, 11, 14].

Эти технологии в лабораторном варианте успешно апробированы на упорных рудах Дарасунского, Талатуйского, Новоширокинского, Амазарканского, Погромного месторождений Восточного Забайкалья [5, 9, 14], а в промышленном масштабе – на месторождениях Кокпата, Даугызтау [5, 9, 11]. Для удоканских

руд предложена патентнозащищенная эффективная технология переработки смешанных сульфидно-окисленных руд методом кучного выщелачивания со стадийным использованием активированных растворов с различной реагентной основой. По этой технологии возможно использование гидрометаллургических методов получения меди и других металлов, она имеет существенное преимущество по сравнению с пирометаллургией [9, 11, 14].

Для извлечения комплексных соединений дисперсного золота из руд рассмотренных месторождений предложены следующие геотехнологии [5, 11, 14]:

а) отделение золота от минералообразующих элементов путем окисления руд с использованием серно-кислотно-пероксидного комплекса;

б) механохимическая подготовка руд к выщелачиванию с использованием активных окислителей и тонкого измельчения материала;

в) для сложных золото-кремнистых, золото-углеродных форм рекомендованы растворы, содержащие активные компоненты, способные диффундировать в кристаллическую решетку минералов и трансформирующие кремнекислородные соединения в поликремниевые кислоты, а кластеризованный углерод – в карбонаты и поликарбонаты [5, 11].

Выводы

1. Ассоциации минералов и элементов в рудах забайкальских месторождений цветных и благородных металлов весьма разнообразны, имеют много сходных и отличительных черт, обуслов-

ленных геолого-генетическими особенностями этих месторождений. Элементы по их содержаниям в рудах и минералах разделены на главные, второстепенные и редко встречающиеся, что играет важную роль при геолого-технологической оценке месторождений. Геохимическая ассоциируемость элементов оценивается близостью их ядерно-физических, химических и физико-химических свойств.

2. В концентратах происходит увеличение содержаний рудообразующих минералов и элементов в несколько раз (см. табл. 6); в хвостах, наоборот, идет концентрирование породообразующих минералов и рассеяние рудообразующих минералов и элементов; нередко в рудах многие рудообразующие элементы не устанавливаются, тогда как в концентратах они дают повышенные содержания.

3. Из известных девяти форм нахождения элементов в рудах забайкальских месторождений основной формой является минеральная, реже изоморфная, биогенная, техногенная, дисперсная, количественная роль которых не ясна и для извлечения которых требуется разработка особых технологий.

4. Для извлечения минеральных форм элементов разработаны различные геотехнологии (гравитация, флотация, гидрометаллургия и др.), а для дисперсных и иных форм элементов предложены новые геотехнологии, основанные на многоступенчатом подходе, включающем подготовку руд и реагентов и проведение самого технологического процесса с конкретикой для каждого элемента.

Библиографический список

1. Смирнов Б.И. Парагенезис как система // Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. С. 57–62.
2. Петровская Н.В., Симонов Ю.И., Хомич В.Г. [и др.]. Балеysкое рудное поле (геология, минералогия, вопросы генезиса). М.: Изд-во ЦНИГРИ, 1984. 271 с.

3. Вещественный состав полезных ископаемых и основные результаты их обогащения (на материале месторождений Забайкалья): / под ред. Л.Ф. Наркелюна. Чита: Изд-во ЧитГТУ, 1998. Ч. 1. 91 с.. Ч. 2. 124 с.

4. Наркелюн Л.Ф. Геолого-технологическая оценка минерального сырья. Чита: Изд-во ЧитГУ, 2003. 366 с.

5. Секисов А.Г., Трубачев А.И., Салихов В.С. [и др.]. Геолого-технологическая оценка и новые геотехнологии освоения природного и техногенного золотосодержащего сырья Восточного Забайкалья. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2011. 312 с.

6. Тимофеевский Д.А. Геология и минералогия Дарасунского золоторудного месторождения. М.: Недра, 1972. 260 с.

7. Архангельская В.В., Быков Ю.В., Володин Р.Н. [и др.]. Удоканское медное и Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России. Чита: Поиск, 2004. 522 с.

8. Юргенсон Г.А. Минеральное сырье Забайкалья. Ч. 1., кн. 1. Чита: Поиск, 2006. 256 с. Ч. 1, кн. 3. Чита: Поиск, 2008. 256 с.

9. Секисов А.Г., Чечеткин В.С., Трубачев А.И. Новые геотехнологии

освоения минерального сырья цветных и благородных металлов Восточного Забайкалья // Вестник ЗабГУ. 2014. № 7. С. 28–38.

10. Чечеткин В.С., Трубачев А.И. Минеральные ресурсы Забайкальского края: монография. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2013. 231 с.

11. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Королев В.С. Дисперсное золото: геологический и технологический аспекты. М.: Горная книга, 2012. 224 с.

12. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.

13. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. 627 с.

14. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Мязин В.П. [и др.] Перспективы кучного выщелачивания золота из упорных руд и техногенного минерального сырья с использованием фотоэлектрохимического синтеза активных реагентных комплексов в рабочих растворах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С. 155–158.

References

1. Smirnov B.I. Paragenesis kak sistema [Paragenesis as a system]. *Teoriya mineralogii* [The theory of mineralogy]. Leningrad, Nauka Publ., 1988. P. 57–62.

2. Petrovskaya N.V., Simonov Yu.I., Khomich V.G. *Baleiskoe rudnoe pole (geologiya, mineralogiya, voprosy genezisa)* [Baleiskoe ore field (geology, mineralogy, genesis issues)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1984. 271 p.

3. Narkelyun L.F. *Veshchestvennyi sostav poleznykh iskopaemykh i osnovnye rezul'taty ikh obogashcheniya (na materiale mestorozhdenii Zabaikal'ya)* [Material composition of minerals and main results of their concentration (on example of Transbaikalian deposits material)]. Chita, ChitGTU Publ., 1998. V. 1, 91 p. V. 2, 124 p.

4. Narkelyun L.F. *Geologo-tekhnologicheskaya otsenka mineral'nogo syr'ya* [Geological and technological evaluation of mineral resources.] Chita, ChitGU, 2003. 366 p.

5. Sekisov A.G., Trubachev A.I., Salikhov V.S. *Geologo-tekhnologicheskaya otsenka i novye geotekhnologii osvoeniya prirodnogo i tekhnogennogo zolotosoderzhashchego syr'ya Vostochnogo Zabaikal'ya* [Geological and technological evaluation and new development geotechnologies of natural and technogenic gold-bearing raw materials of Eastern Transbaikalia.]. Chita, ZabGU Publ., 2011. 312 p.

6. Timofeevskii D.A. *Geologiya i mineralogiya Darasunskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya* [Geology and mineralogy of Darasunsky gold ore field]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 260 p.

7. Arkhangel'skaya V.V., Bykov Yu.V., Volodin R.N. *Udokanskoe mednoe i Katuginskoe redkometall'noe mestorozhdeniya Chitinskoj oblasti Rossii* [Udokan copper and Katunginskoe rare metal deposits in the Chita region of Russia]. Chita, Poisk Publ., 2004. 522 p.

8. Yurgenson G.A. *Mineral'noe syr'e Zabaikal'ya* [Transbaikalian mineral

raw materials]. V. 1, book 1. Chita, Poisk Publ., 2006, 256 p. V. 1, book 3. Chita, Poisk Publ., 2008, 256 p.

9. Sekisov A.G., Chechetkin V.S., Trubachev A.I. *Novye geotekhnologii osvoeniya mineral'nogo syr'ya tsvetnykh i blagorodnykh metallov Vostochnogo Zabaikal'ya* [New development geotechnologies of mineral raw materials of non-ferrous and precious metals of East Transbaikalia]. Vestnik ZabGU [Bulletin of ZabGU], 2014, no. 7, pp. 28–38.

10. Chechetkin V.S., Trubachev A.I. *Mineral'nye resursy Zabaikal'skogo kraya* [Mineral resources of the Trans-Baikal territory:]. Chita: ZabGU Publ., 2013. 231 p.

11. Sekisov A.G., Zykov N.V., Korolev V.S. *Dispersnoe zoloto: geologicheskii i tekhnologicheskii aspekty* [Dispersed gold: geological and technological aspects]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2012. 224 p.

12. Ovchinnikov L.N. *Prikladnaya geokhimiya* [Applied Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 248 p.

13. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Environmental Geochemistry]. Moscow, Logos Publ., 2000. 627 p.

14. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Myazin V.P. *Perspektivy kuchnogo vyshchelachivaniya zolota iz upornykh rud i tekhnogenogo mineral'nogo syr'ya s ispol'zovaniem fotoelektrokhimicheskogo sinteza aktivnykh reagentnykh kompleksov v rabochikh rastvorakh* [Prospects for gold heap leaching from refractory ores and technogenic mineral raw materials using a photoelectrochemical synthesis of active reagent complexes in working solutions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2015, no. 5, pp. 155–158.

*Статья поступила 09.06.2016 г.
Article received 09.06.2016.*