

добычу и переработку минерального сырья. При этом необходимо учитывать весь спектр источников и объектов воздействия для создания системы медико-экологической безопасности территорий производства работ (рис. 9) [11].

В заключение следует подчеркнуть, что экологические последствия от накопленных горно-промышленных отходов масштабнее, чем это декларируется в различных материалах, так или иначе касающихся рассматриваемой проблемы, и носят глобальный характер. Масштабы потерь земель, водных, лесных, рекреационных и других ресурсов при недропользовании в целом и от неиспользованных отходов в частности ставят эти процессы в один ряд с негативными факторами, несущими угрозу безопасности страны.

В сложившейся ситуации с учетом общего состояния МСБ страны, минерально-ресурсного потенциала горно-промышленных отходов, их негативного влияния на окружающую природную среду настоятельной необходимостью является развитие единого технологического цикла добычи и переработки полезных ископаемых до уровня вовлечения в хозяйственный оборот техногенных отходов (месторождений): «добыча — переработка — размещение отходов — утилизация». Предприятия повышенного класса опасности, внедряя современные разработки, могут понизить риски для окружающей среды и населения.

При обсуждении, создании и реализации различных региональных программ экономического роста на основе использования минерально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, разрабатываемых Правительством Российской Федерации, необходимо учитывать опыт экологического обеспечения проектов, уделяя самое пристальное внимание решению задач социального обеспечения населения, здравоохранению и экологии. Связанные воедино, они в конечном счете определяют экономический эффект и перспективы программ создания территорий опережающего развития (ТОР) и минерально-сырьевых центров экономического развития (МСЦЭР).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александрова, Т.Н.* Эколого-геохимическая оценка техногенных отходов горно-металлургического комплекса России / Т.Н. Александрова, Н.В. Николаева. — СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015. — 180 с.
2. *Быховский, Л.З.* Техногенные образования и месторождения редкоземельных металлов и скандия России / Л.З. Быховский, С.Д. Потанин, Е.И. Котельников, С.И. Ануфриева и др. // Редкоземельное и скандиевое сырье России. Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — М.: ВИМС, 2016. — № 31. — С. 112–120.
3. *Вдовина, О.К.* Химический состав фракций обломочного материала горнопородных отвалов и хвостохранилищ, как основа оценки потенциальной геоэкологической опасности районов деятельности горнорудных предприятий / О.К. Вдовина, А.А. Лаврусевич и др. // Вестник МГСУ. — 2014. — № 12. — С. 152–161.
4. *Водяницкий, Ю.Н.* Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах / Ю.Н. Водяницкий // Почвоведение. — 2012. — № 3. — С. 368–378.
5. *Доклад об экологической ситуации в Забайкальском крае за 2011 г.* — Чита, 2012. — 134 с.
6. *Замана, Л.В.* Гидрогеохимические особенности зоны техногенеза полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья / Л.В. Замана, Л.П. Чечель // Успехи современного естествознания. — 2015. — № 1. — С. 33–38.

7. *Криночкина, О.К.* Проявления техногенных и рудогенных аномальных геохимических полей и критерии их дифференциации / О.К. Криночкина, А.А. Лаврусевич // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 1. — С. 16–19.
8. *Левченко, Е.Н.* Техногенное минеральное сырье: особенности вещественного состава и технологических свойств, геолого-технологическое картирование / Е.Н. Левченко, Л.И. Веремеева, О.Е. Горлова // Руды и металлы. — 2018. — № 1. — С. 64–75.
9. *Менчинская, О.В.* Экологические проблемы Владикавказа / О.В. Менчинская // Геоэкологические исследования состояния окружающей среды. — М.: ИМГРЭ, 2017. — С. 136–147.
10. *Мязин, В.П.* Разработка природоохранных мероприятий по рекультивации хвостохранилищ с целью снижения загрязнения территории Забайкалья отходами горно-перерабатывающего комплекса / В.П. Мязин, В.Т. Шекиладзе // Вестник ЧитГУ, 2013. — № 06 (97). — С. 30–38.
11. *Орлов, В.П.* Современное состояние и перспективы медицинской геологии (к итогам VII конференции Международной медико-геологической ассоциации МедГео-2017) / В.П. Орлов, Е.Г. Фаррахов, И.Ф. Вольфсон, В.М. Алексеев, М.В. Прозорова // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 1. — С. 3–8.
12. *Помеляйко, И.С.* Эколого-геохимическое ранжирование селитренных зон ряда курортных и промышленных городов РФ по трем оценочным показателям загрязнения почв / И.С. Помеляйко // Геоэкология. — 2017. — № 1. — С. 28–39.
13. *Соколов, Л.С.* Выявление территорий экологического неблагополучия по результатам биогеохимических исследований / Л.С. Соколов, И.А. Морозова, С.Б. Самаев // Экология большого города. — Вып. 4. — М.: Прима-Пресс, 2000. — С. 58–63.
14. *Соколова, В.И.* Редкие металлы из техногенного сырья / В.И. Соколова, Л.З. Быховский, С.И. Ануфриева // Металлы Евразии. — 2017. — № 5. — С. 40–43.
15. *Спиридонов, И.Г.* Эколого-геохимические исследования — основа комплексной оценки и мониторинга экологического состояния территорий / И.Г. Спиридонов // Геоэкологические исследования состояния окружающей среды. — М.: ИМГРЭ, 2017. — С. 5–8.
16. *Чантурия, В.А.* Проблемы геотехнологии и недроведения: (Мельниковские чтения): Докл. междунар. конф. / В.А. Чантурия, Б.М. Корюкин // — Екатеринбург: УрО РАН, 1998. — Т. 3. — С. 26–34.
17. *Чечель, Л.П.* Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья / Л.П. Чечель // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328. — № 6. — С. 52–63.
18. *Янин, Е.Н.* Техногенез и окружающая среда: эколого-геохимические аспекты / Е.Н. Янин // Геоэкологические исследования состояния окружающей среды. — М.: ИМГРЭ, 2017. — С. 8–45.

© Спиридонов И.Г., Левченко Е.Н., 2018

Спиридонов Игорь Геннадьевич // imgre@imgre.ru
Левченко Елена Николаевна // levchenko@imgre.ru

УДК 548[549:669]85.86

Лихникевич Е.Г. (ФГБУ «ВИМС»)

ОПЕРЕЖАЮЩИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ — ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Данные о минеральном составе исходного сырья и продуктов его химико-металлургической переработки с диагностикой всех минеральных фаз, количественной оценкой их содержания, форм нахождения в исследуемом продукте полезного компонента позволяют прогнозировать выбор технологии извлечения полезных компонентов, а также технологические показатели переработки руд. Приведены различные пиро-гидрометаллургические схемы

переработки минерального сырья. **Ключевые слова:** минералогия, гидрометаллургические технологии, пирометаллургические технологии, спекание, выщелачивание.

Likhnikovich E.G. (VIMS)

ANTICIPATORY MINERALOGY RESEARCH — BASIS FOR PREDICTING THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES AND CHOICE OF OPTIMUM TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

*Data on mineral composition of initial raw materials and products of his chemical-metallurgical processing with diagnostics of all mineral phases, quantitative assessment of their contents, stay forms in the studied product of a useful component allow to predict the choice of technology of extraction of useful components, as well as technological indicators of ore processing. Given the various pyro-hydrometallurgical scheme of processing of mineral raw materials. **Keywords:** mineralogy, hydrometallurgical technologies, pyrometallurgical technologies, sintering, leaching.*

Существующая минерально-сырьевая база России значительна по ресурсному потенциалу и представлена преимущественно низкокачественными полиминеральными рудами со сложным текстурно-структурным рисунком и переменным содержанием полезных минералов. Повышенная сложность вещественного состава приводит к ухудшению показателей обогащения и к значительным потерям как ценных, так и сопутст-

вующих компонентов на стадиях селекции металлов и доводки концентратов (~ 40–50 %) и делает неэффективным применение классических методов обогащения. В связи с этим возникает необходимость в гибком изменении технологического цикла и приспособлении его к менее богатому и более сложному природному сырью — к накопившимся промпродуктам и отвалам металлургического производства. Этим целям, а также целям комплексного использования сырья наиболее полно отвечают химико-металлургические технологии, располагающие богатым арсеналом разнообразных приемов, способных во многих случаях эффективно перерабатывать сложные по составу продукты и являющиеся завершающим этапом получения металлов и их соединений.

Широко используемыми в химической технологии промышленными методами переработки руд цветных, редких, радиоактивных и рассеянных элементов и продуктов их обогащения являются гидрометаллургические (выщелачивание, в том числе и автоклавное, сульфатизация, сорбционные и экстракционные процессы) и пирометаллургические методы (фьюминование, хлорирование, обжиг, спекание и плавка).

Для полного комплексного использования сырья при разработке технологических гидро- и пирометаллургических схем, прежде всего, необходимы данные о минеральном составе исходного сырья и продуктов его химико-металлургической переработки с диагностикой всех минеральных фаз, количественной оцен-



Рис. 1. Минералого-технологические факторы, определяющие выбор способа переработки минерального сырья

кой их содержания, форм нахождения в исследуемом продукте полезного компонента (образование собственной минеральной фазы или соединения, изоморфное вхождение в состав другой фазы).

Значительную роль при химической переработке руд играют минералы породообразующего комплекса — их состав, количественные соотношения, поэтому необходимо иметь четкое представление о характере фазовых преобразований в минералах, чтобы оценить их влияние на технологические показатели [5]. На рис. 1 приведены минералого-технологические факторы, определяющие выбор способа переработки минерального сырья.

Спекание с гидроксидами и карбонатами щелочных и щелочноземельных металлов является эффективным средством воздействия на структуру рудных и породообразующих минералов. Разложение концентратов спеканием сопровождается образованием новых твердых фаз, состав и свойства которых зависят от условий спекания (температура, продолжительность и расход реагентов). Различие в растворимости продуктов разложения минеральных компонентов в составе сырья позволяет спрогнозировать степень концентрирования извлекаемого компонента в нерастворимом остатке и полноту отделения от сопутствующих рудных и породообразующих минералов, а также выбор оптимальных режимов на стадии вскрытия и выщелачивания для получения продуктов заданного состава.

Цирконийсодержащие руды Алгаминского рудопоявления характеризуются одновременным присутствием двух главных циркониевых минералов, встречающихся в тесной ассоциации друг с другом [2]. Бадделеит присутствует в руде в виде полиминеральных агрегатов, в которых он тесно ассоциирует с породообразующими минералами и иногда с цирконом, а также образует колломорфные выделения. Циркон отмечается в виде индивидуализированных зерен и колломорфных образований, представлен двумя разновидностями: неизменным цирконом, содержание которого в руде незначительно, и измененным в различной степени, количество которого варьирует от 5 до 30 % (рис. 2). Для бадделеит-цирконовых концентратов Алгаминского рудопоявления была разработана термохимическая технология, основанная на спекании концентратов с карбонатом кальция. Различие в растворимости соединений, получаемых при термохимическом вскрытии

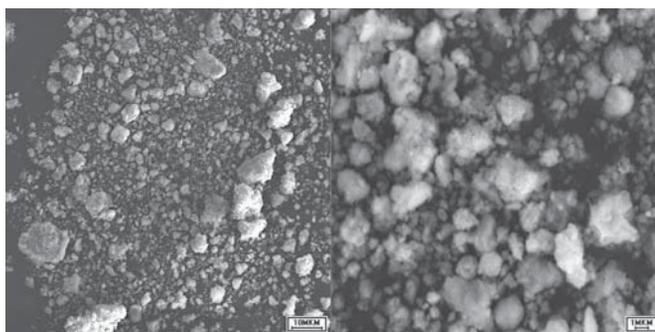


Рис. 2. Минералы циркония (общий вид). РЭМ

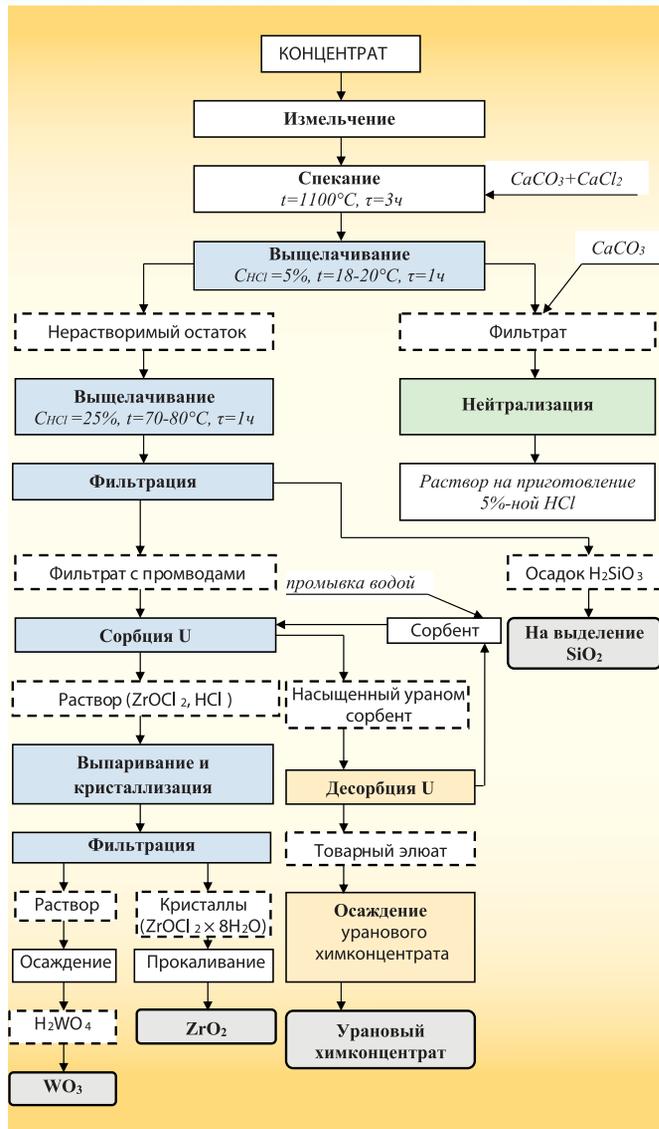


Рис. 3. Технологическая схема переработки бадделеит-цирконовых концентратов Алгаминского рудопоявления

концентратов, обеспечивает при последующем кислотном выщелачивании спека отделение циркония от основной массы продуктов разложения породообразующих, концентрирующихся в кеке от вскрытия, и переход в раствор циркония (рис. 3).

Выщелачивание — избирательное растворение одного или нескольких компонентов исходного сырья водным растворителем (водой, растворами кислот, щелочей, солей).

Для руды Томторского месторождения, основные ценные компоненты которой представлены пироксеном и монацитом, а также наличие в руде водных алюмофосфатов (минералов группы крадаллита), которые по содержанию значительно преобладают над пироксеном и монацитом была разработана последовательная щелочно-кислотная технология с выбором в качестве вскрывающего реагента гидроксида натрия, что определяется особенностями его взаимодействия с рудными минералами и обеспечивает эффективность и селекцию основных ценных компонентов (Nb, Y, Sc, и PЗЭ) (рис. 4).

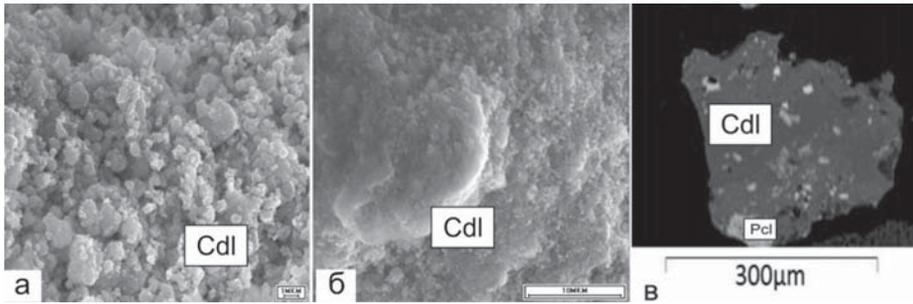


Рис. 4. а) кристаллически-зернистые агрегаты крандаллита; б) гелеподобные скрыто-кристаллические выделения крандаллита (РЭМ); в) агрегат крандаллита с включениями пирохлора

Щелочная обработка исходной руды сопровождается конверсией фосфатов редкоземельных элементов в гидроксиды и переходом основной части фосфора в раствор гидроксида натрия. Последующая кислотная обработка щелочного кека обеспечивает получение продуктивного раствора для извлечения РЗЭ. При этом ниобий концентрируется в нерастворимом остатке в виде пирохлорового концентрата, переработка которого может быть осуществлена сульфатизацией или выщелачиванием смесью раствора фтористоводородной и серной кислот при повышенных температурах, что сопровождается практически полным разрушением структуры пирохлорового концентрата и переходом ниобия в зависимости от использованного реагента в растворимые сернокислые, либо комплексные фтористые соединения (рис. 5) [3].

Широкое внедрение автоклавных процессов в гидрометаллургию объясняется их технологическими преимуществами: применение герметичной аппаратуры, уменьшающей потерю газообразных реагентов и существенно улучшающей условия труда и охрану окружающей среды от загрязнений.

Главными породообразующими минералами руды Чукотконского рудного поля являются оксиды и гидроксиды железа (гётит, гематит) и марганца (пиролюзит, псиломелан). Минералы редких земель представлены флоренситом и монацитом. Ниобиевую минерализацию несут минералы группы пирохлора, представленные стронциевой, бариевой и цериевой разновидностями. Железистые минералы по содержанию значительно преобладают над пирохлором и монацитом (рис. 6).

Руды являются практически небогатными гравитационными и флотационными методами вследствие высокой дисперсности всех слагающих минералов, образо-

вания сложных типов сростаний гидроксидов железа с пирохлором, монацитом, тонких прорастаний с минералами группы крандаллита, повышенной хрупкости пирохлора и склонности его к переизмельчению.

Одной из наиболее важных задач, которая решается на стадии гидрометаллургической переработки пирохлор-монацит-гётитовых руд, является отделение редкоземельных металлов от

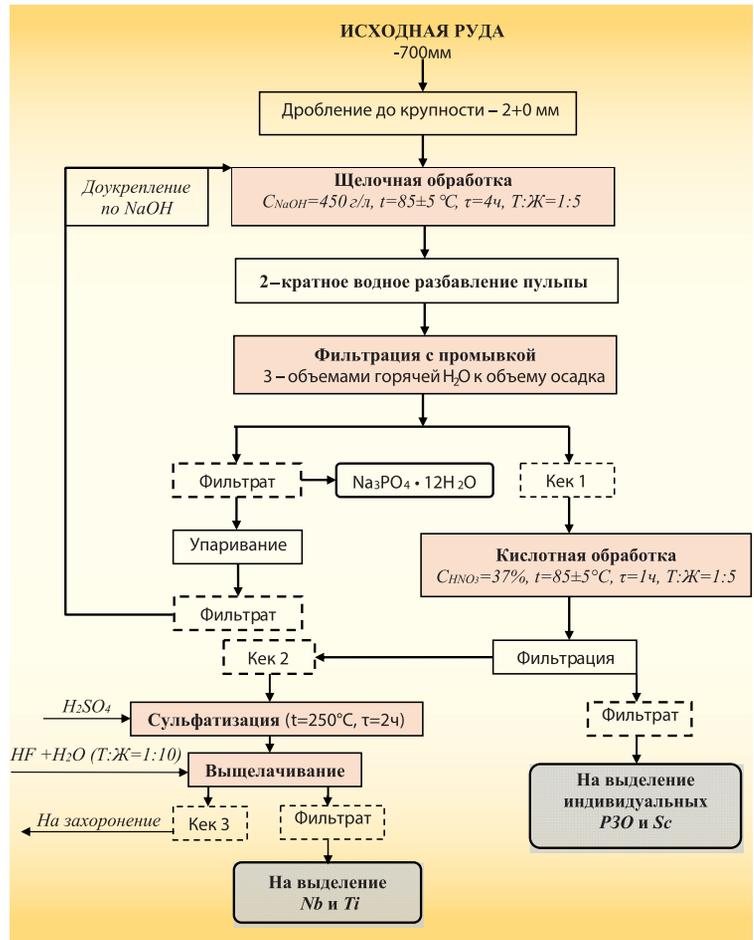


Рис. 5. Технологическая схема переработки пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского месторождения

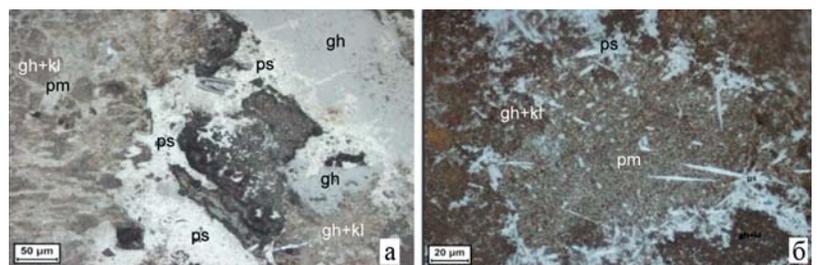


Рис. 6. а) тонкие сростания псиломелана (pm) с гётитом (gt) и каолинитом (kl) в левой части снимка; замещение гётита пиролюзитом (ps) в центральной и правой части снимка; б) тесные сростания пиролюзита с псиломеланом, гётитом и каолинитом. Отраженный свет, николи параллельны

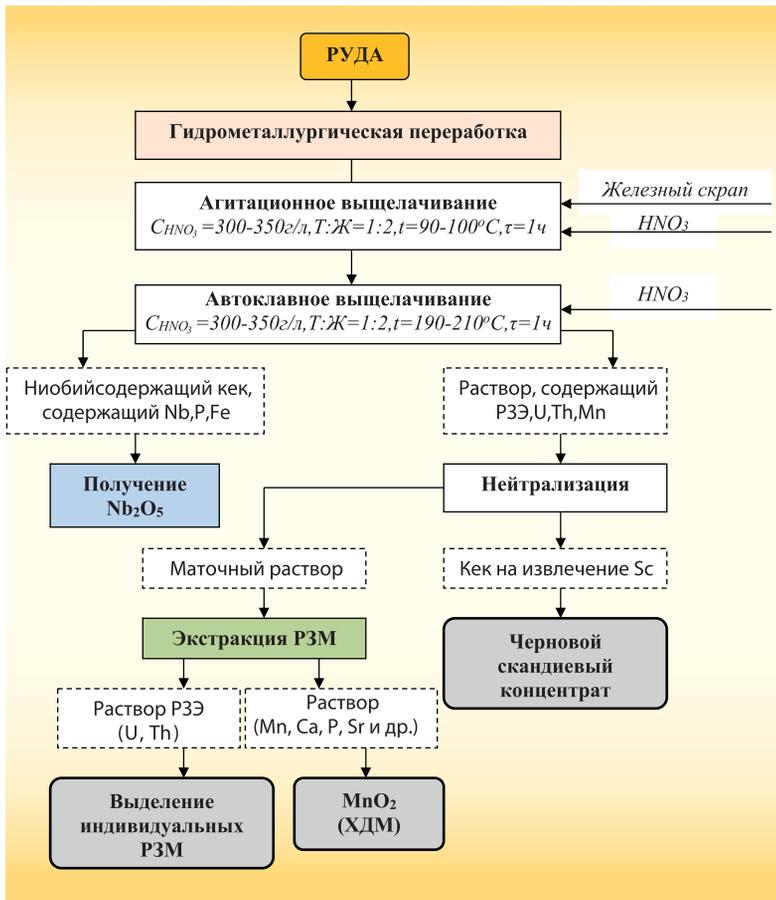


Рис. 7. Технологическая схема переработки пирохлор-монацит-гётитовых руд Чуктуконского рудного поля

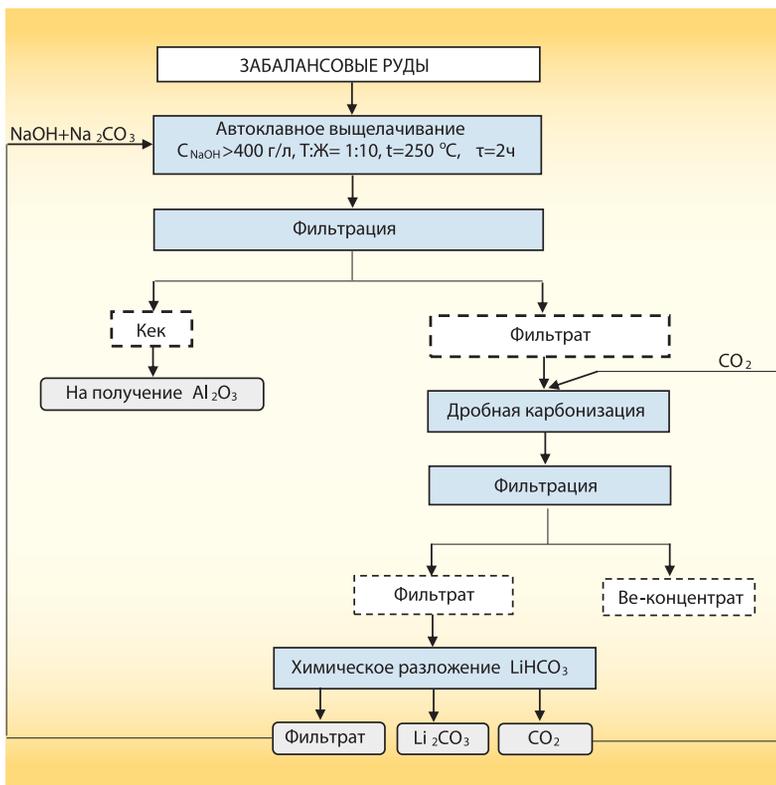


Рис. 8. Технологическая схема переработки забалансовых руд Завитинского месторождения

фосфора и железа. Удаление фосфора и железа из раствора достигается проведением процесса в автоклавных (гидротермальных) условиях при 200–230 °С, что способствует более селективному концентрированию фосфора и железа в нерастворимом остатке в результате термогидролиза и позволяет уже на следующей стадии использовать эффективное извлечение и очистку РЗЭ из обезфосфоренных азотнокислых растворов экстракцией трибутилфосфатом (рис. 7) [4].

Исследована возможность и разработана (с использованием приемов технологической минералогии) технология комплексной переработки забалансовых руд Завитинского месторождения, содержащих 0,12 % Li и 0,021 % Be, исключая процедуру предварительного обжига (декрипитация) при 1100 °С с получением β-модификации сподумена. Литий в забалансовых рудах связан со сподуменом и частично с флогопитом и мусковитом [1]. Проведенными исследованиями показана возможность использования автоклавно-щелочной технологии для переработки сподуменосодержащих руд (рис. 8). Установлено, что в условиях автоклавного выщелачивания взаимодействие в системе руда — раствор NaOH, по данным рентгенографического фазового анализа, сопровождается структурно-фазовыми превращениями, завершающимися образованием в твердой фазе гидроалюмосиликатов типа гидроканкринита и содалита с переходом в щелочной раствор лития, берилля и части кремния. Эти условия реализуются лишь при жестких режимах обработки руды или концентрата: температура — 250 °С, концентрация NaOH > 400 г/л, Т:Ж = 1:10.

Таким образом, опережающее углубленное изучение вещественного состава при технологической оценке руд позволяет получить надежную количественную основу для характеристики и комплексного использования минерального сырья, что существенно сокращает объемы технологических исследований по поиску оптимальных схем его переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриева, С.И. Комплексная переработка руд Ярославского ГОКа / С.И. Ануфриева, З.А. Журкова, В.П. Кузнецов, Г.И. Костенко // Цветные металлы. — 2002. — № 9. — С. 101–103.
2. Левченко, М.Л. Характеристика вещественного состава бадделеит-цирконовых руд Алгаминского рудопроявления / М.Л. Левченко, Е.Н. Левченко / Промышленные минералы: проблемы прогноза, поисков, оценки и инновационные технологии освоения месторождений: Матер. Междунар. науч.-прак. конф. — Казань: ЗАО «Издательский дом «Казанская недвижимость», 2015. — С. 391–395.
3. Лихникевич, Е.Г. Особенности выделения редкоземельных элементов при комплексной переработке редкоземельно-ниобиево-фосфатных руд / Е.Г. Лихникевич, С.И. Ануфриева / Актуальные вопросы получения и при-

менения РЗМ-2015: Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. — М., 2015. — С. 73–75.

4. Пермякова, Н.А. Технологическая оценка пирохлор-монацит-гётитовых руд Чукотского рудного поля в рамках геолого-технологического картирования / Н.А. Пермякова, Е.Г. Лихниевич, Н.А. Сычева, Ф.И. Отрубьянников / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения-2017): Матер. Междунар. научной конф. — Красноярск, 2017. — С. 66–68.

5. Сидоренко, Г.А. Технологическая минералогия редкометалльных руд / Г.А. Сидоренко, И.Т. Александрова, Н.В. Петрова. — СПб.: Наука, 1992. — 236 с.

© Лихниевич Е.Г., 2018

Лихниевич Елена Германовна // Likhnikievich@mail.ru

УДК 579.852.083.18

Седелникова Г.В., Ким Д.Х., Ибрагимова Н.В. (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ БИОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

*В статье приведены результаты исследований вещественного состава упорных комплексных золотосодержащих руд и показаны преимущества применения биогидрометаллургической технологии их переработки по сравнению с традиционными методами извлечения благородных и цветных металлов. **Ключевые слова:** упорная руда, концентрат, золото, серебро, медь, цинк, биоокисление, цианирование.*

Sedelnikova G.V., Kim D.H., Ibragimova N.V. (TSNIGRI)

FEATURES OF SUBSTANCE COMPOSITION AND BIOHYDROMETALLURGICAL PROCESSING TECHNOLOGICAL SCHEME OF REFRACTORY COMPLEX GOLD ORES

*The article presents the results of studies of the material composition of resistant complex gold ores and shows the advantages of using biohydrometallurgical technology of their processing compared to traditional methods of extraction of precious and non-ferrous metals. **Keywords:** refractory ore, concentrate, gold, silver, copper, zinc, biooxidation, cyanidation.*

Упорные руды занимают значительную долю в запасах коренного золота (более 40 %). Тонкая вкрапленность золота в сульфидные минералы (в основном пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит и др.), а также наличие природного органического углерода, способного сорбировать растворенный цианидный комплекс золота (так называемое явление «preg-gobbing») и вызывать потери его с хвостами, обуславливают низкую эффективность традиционной технологии цианирования и требуют применения предварительных методов окисления сульфидов и вскрытия золота.

В настоящее время наиболее распространенными методами переработки сульфидного сырья благород-

ных и цветных металлов являются бактериальное и автоклавное выщелачивание с последующим извлечением благородных металлов методом цианирования из остатков выщелачивания. Наиболее простым, относительно дешевым и экологически безопасным методом является бактериальное выщелачивание (биоокисление применительно к золотосодержащим сульфидам).

Биоокисление упорных золотосодержащих сульфидных концентратов (в чановом варианте на заводских установках) с использованием микроорганизмов успешно применяется в мировой практике золотодобычи [2, 4, 7, 8]. Известно о работе более 15 предприятий по переработке концентратов и планируется ввод новых заводов в эксплуатацию [2].

В России группа компаний «Полюс» успешно использует с 2001 г. технологию чанового биоокисления для извлечения золота из упорных золото-пирротин-арсенопирит-пиритовых концентратов Олимпиадинского месторождения (Красноярский край). Биоокисление проводится в суровых северных условиях на трех биоустановках (БИО-1, БИО-2 и БИО-3) общей производительностью 1350 т/сут концентрата. Ведется строительство четвертой очереди — БИО-4, особенностью которой будет открытое размещение [6].

Наряду с промышленным освоением биотехнологии во всем мире проводятся исследования новых объектов упорных золотосодержащих руд и концентратов [3, 7, 9–12]. Изучаются особенности вещественного состава минерального сырья (содержание сульфидов, карбонатов, сорбционная активность органического углерода — «preg-gobbing» и др.), оптимальные условия процесса биоокисления сульфидов и последующей гидрометаллургической переработки остатков биоокисления.

Как правило, основным ценным компонентом упорных золотосодержащих руд является золото, попутным — серебро. В комплексных рудах помимо золота и серебра присутствуют также другие ценные компоненты — медь, цинк, свинец, никель, кобальт, сурьма и пр.), комплексное извлечение которых повышает технико-экономические показатели переработки руды. Упорные руды характеризуются также наличием вредных компонентов (мышьяк, сурьма, ртуть), осложняющих технологию переработки.

В зависимости от состава выщелачиваемого сырья и устойчивости микроорганизмов к токсичным ионам тяжелых металлов, которые переходят в жидкую фазу при окислении сульфидов, используют различные микроорганизмы: мезофильные, умеренно термофильные и термофильные [1]. Перспективными для окисления серы являются термофильные археи [10]. Для биоокисления арсенопиритсодержащих руд и концентратов рекомендуется применение мезофильных и умеренно термофильных бактерий, которые более устойчивы к мышьяку по сравнению с термофильными. Поэтому выбор сообщества микроорганизмов для биоокисления минерального субстрата играет большую роль.

В количественном отношении чаще пирит преобладает над арсенопиритом и имеет более низкую ско-