

4. Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Dunaeva V. N. Material constitution and features of low-grade and rebellious iron ore in processing and preparation for ROMELT direct iron ore smelting reduction process. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 12. pp. 14–20. DOI: 10.17580/gzh.2015.12.03
5. Khokhulya M. S., Opalev A. S., Rukhlenko E. D., Fomin A. V. Production of magnetite-hematite concentrate from ferruginous quartzites and warehoused tailings based on mineralogy and technology studies. *GIAB*. 2017. No. 4. pp. 259–271.
6. Poperechnikova O. Yu., Shumskaya E. N., Nagaeva S. P. Semi-industrial researches of flotation technology of hematite concentrate obtaining from oxidized ferruginous quartzites. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 11. pp. 40–43.
7. Lu Liming. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. 641 p.
8. Sadeghi M., Bazin C., Devin P.-O., Lavoie F., Hodouin D., Renaud M. Control of spiral concentrators for the concentration of iron ore. *Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress*. Quebec, 2016. Vol. 7. pp. 4534–4545.
9. Wanzhong Yin, Jizhen Wang, Longhua Xu. N Reagents in the Reverse Flotation of Carbonate-Containing Iron Ores. *Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy*. Cham : Springer International Publishing, 2015. pp. 459–470.
10. Buro Y. A., Schadrac Ibrango, Cassoff J., Bélanger L., Giroux É. et al. NI 43–101. Technical report on the feasibility study on labmag taconite project : final report. New Millennium Iron Corp., 2014. Available at: <http://www.nmliron.com/data/document/en-CA/2013-007-NI-43-101-LabMag-FINAL.pdf> (accessed: 19.04.2019).
11. Prokopyev S. A., Pelevin A. E., Napolskikh S. A., Gelbing R. A. Staged screw separation of magnetite concentrate. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 4. pp. 28–33. DOI: 10.17580/or.2018.04.06
12. Opalev A. S., Khokhulya M. S., Kucher E. V., Shcherbakov A. V. Upgrading of processing technology for ore and iron-containing waste towards complete extraction of valuable components and higher quality production. *Modern Innovative Technologies in Mineral Mining and Processing : International Scientific-Practical Conference Proceedings*. Moscow, 2018. pp. 187–194.
13. Patkovskaya N. A., Tasina T. I. The Russia North-West Region iron-containing ores processing technology improvement. *Obogashchenie Rud*. 2011. No. 1. pp. 6–10.

УДК 622.7:622.349.3

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО СЫРЬЯ КОЛЬСКОГО ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА*

Е. В. ГРОМОВ¹, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук, evgromov@goi.kolasc.net.ru

А. Л. БИЛИН², ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

Г. В. МИТРОФАНОВА², зав. лабораторией, канд. техн. наук

С. П. ОСТАПЕНКО², старший научный сотрудник, канд. техн. наук

¹ Мурманский арктический государственный университет, Апатиты, Россия

² Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

Редкометалльное сырье является стратегически важным георесурсом, определяющим экономическую и национальную безопасность промышленно развитых стран. Устойчивый спрос на редкие металлы (в особенности редкоземельные элементы – РЗЭ), востребованные в высокотехнологичных и наукоемких отраслях промышленности, определяет актуальность исследований по созданию инновационных технологий их добычи и переработки в соответствии с требованиями энерго и ресурсосбережения, экологической и промышленной безопасности [1, 2].

В этом плане интерес к сырьевой базе Кольского полуострова определяется удобством транспортно-географического положения и инфраструктурной обеспеченностью, разведанными запасами редких металлов (РМ) в лопарите (Ta, Nb, Sr, РЗЭ) и эвдиалите (Zr, Y) Ловозерского массива, запасами попутных компонентов (Sr, РЗЭ, Ga, Rb, Cs, Nb) в Хибинских апатит-нефелиновых рудах, составляющих большую часть отраслевых балансов РМ.

Под руководством академика Н. Н. Мельникова в 2014–2018 гг. в Горном институте КНЦ РАН в рамках проекта Российского научного фонда выполнены комплексные междисциплинарные исследования, направленные на разработку новых технологий

Разработана инновационная технология горно-обогащительного производства, позволяющая повысить эффективность использования многокомпонентных руд Ловозерского и Хибинского массивов.

Ключевые слова: редкоземельное и редкометалльное сырье, добыча и переработка рудного и техногенного сырья, моделирование, топология технологических схем, сточные воды, очистка, отходы рудообогатления, консервация.

DOI: 10.17580/gzh.2019.06.08

добычи и глубокой переработки редкометалльного сырья Кольского горнопромышленного комплекса (ГПК), позволяющих снизить техногенную нагрузку на природную среду в соответствии с экологической стратегией развития горной отрасли.

Выработка инновационных технологических решений базируется на современных информационных технологиях и обеспечивает получение новых знаний на основе моделирования объектов и процессов горного производства, управления этими процессами, выявления новых зависимостей и закономерностей [3].

Объектом настоящего исследования является редкометалльное сырье Кольского ГПК, сосредоточенное в лопаритовых рудах Ловозерского массива и апатит-нефелиновых рудах Хибинского массива.

Разработке научных основ комплексного решения задач освоения месторождений твердых полезных ископаемых посвящены труды Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. И. Агошкова, Н. Н. Мельникова, Д. Р. Каплунова, К. Н. Трубецкого и др. Важное значение при этом имеют фундаментальные исследования по обогащению многокомпонентного сырья, изложенные в работах В. А. Чантурия, Л. А. Вайсберга и др. [4].

* В работе принимал участие В. В. Бирюков, научный сотрудник Горного института КНЦ РАН, Апатиты, Россия.

Методологической основой решения проблемы повышения эффективности комплексного использования редкометалльных руд являются результаты исследований процессов измельчения, повышения контрастности технологических свойств минералов, магнитной сепарации, совершенствования технологии переработки руд редких металлов, значительный вклад в развитие которых внесли В. И. Ревнивцев, М. А. Эйгелес, С. И. Полькин, В. В. Кармазин, П. Е. Остапенко, Л. А. Грекулова, Л. Б. Чистов, Ю. Ф. Соколов, А. В. Курков, Л. Б. Зубков, Н. В. Петрова и др.

В современных условиях повышения эффективности переработки минерального сырья не добиться без применения системного подхода к разработке технологических схем [5], основанного на использовании методов математического и компьютерного моделирования сепарационных характеристик оборудования [6], разработки на их основе систем автоматизированного проектирования технологических процессов.

В настоящее время прикладными исследованиями в области переработки минерального сырья занимаются многие отечественные и зарубежные научные организации и фирмы-производители обогащательного оборудования. Из них можно отметить такие как ООО «Лаборатория инновационных технологий» группы компаний «Скайград», разрабатывающие технологии разделения лопаритового концентрата на групповые концентраты и индивидуальные элементы на каскаде центробежных экстракторов [7]; институт «Механобр», ведущий разработку и производство принципиально нового дробильно-измельчительного, классифицирующего и обогащательного оборудования; институт Sustainable Minerals Квинлендского университета, ведущий исследования в области комплексной переработки редкометалльного сырья. Среди исследований по использованию low-cost adsorbents необходимо выделить обзор Md. Ahmaduzzaman [8].

Исследования экологических проблем горного производства широко проводят в Финляндии, Австралии, США и других странах [9–11].

Для эффективного решения задач освоения месторождений стратегического сырья Кольского ГПК предпринята попытка перехода от изучения отдельных явлений и процессов к комплексным исследованиям, включающим полный цикл освоения месторождений: от создания транспортной инфраструктуры в сложных арктических условиях до разработки технологий добычи, глубокой переработки сырья и возникающих в связи с эксплуатацией проблем экологического характера.

Обоснование параметров новых горнотранспортных систем для освоения перспективных месторождений

Для перспективных к освоению месторождений Партомчорр и Чингласуай, расположенных в условиях сложного горно-равнинного рельефа, выполнено обоснование систем межплощадочного транспорта (табл. 1), с учетом изменения объема грузопотока A_r до предельных значений, ограниченных горными возможностями месторождений (до 7 млн т/год для Партомчоррского и до 4 млн т/год для Чингласуайского месторождений). Методика оценки основана на комплексировании методов компьютерного моделирования (рельефа поверхности, объектов

Таблица 1. Характеристики магистральных горнотранспортных систем

Используемые коммуникации	Вариант	Вид транспорта	Длина трассы, км
<i>Месторождение Партомчорр (Хибинский массив)</i>			
Надземные	№ 1	Подвесной ЛК на ходовых опорах RopeCon	32,5
Наземные	№ 2	Канатно-ленточный конвейер (КЛК)	44,4
	№ 3	Самосвалы	43
	№ 4	Железная дорога колеи 1520 мм	43,4
<i>Месторождение Чингласуай (Лавозерский массив)</i>			
Надземные	№ 1	Грузовая канатно-подвесная дорога (ГКД)	6,78
Подземные	№ 4	Ленточный конвейер (ЛКК)	6,35
	№ 2	Железнодорожный транспорт узкой колеи на электрической тяге (ПЖК)	6,35
Наземные	№ 3	Автомобильный транспорт с использованием карьерных самосвалов	12

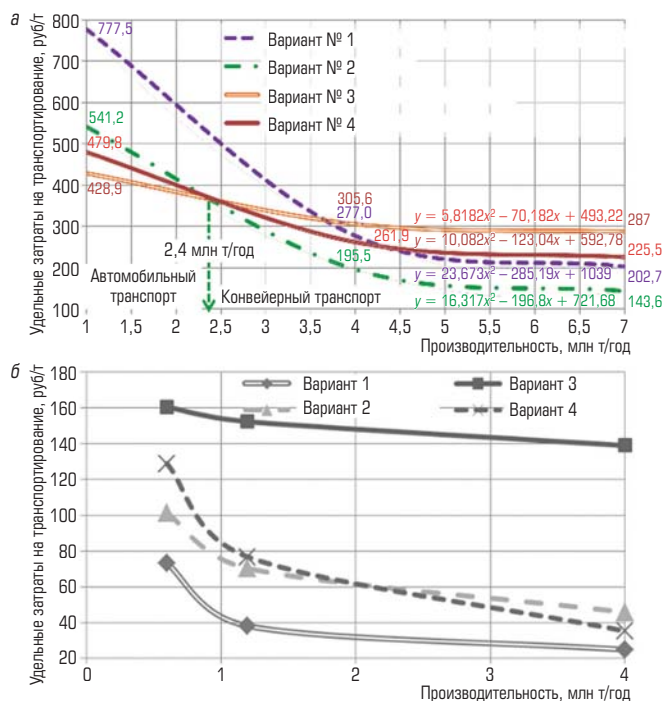


Рис. 1. Зависимость удельных затрат на транспортирование от объема грузопотока для месторождений Партомчорр (а) и Чингласуай (б)

инфраструктуры, рудных тел, маршрутов трасс, схем вскрытия и подготовки) и технико-экономического анализа с учетом платежей за загрязнение природной среды.

Далее с использованием 3D-модели рельефа Хибинского и Лавозерского массивов построены маршруты трасс, проведена технико-экономическая оценка и установлена зависимость стоимости транспортирования от объема грузопотока (рис. 1).

С учетом полученных закономерностей на примере месторождения Партомчорр показано, что в условиях гористого рельефа и незначительных перепадов высот для

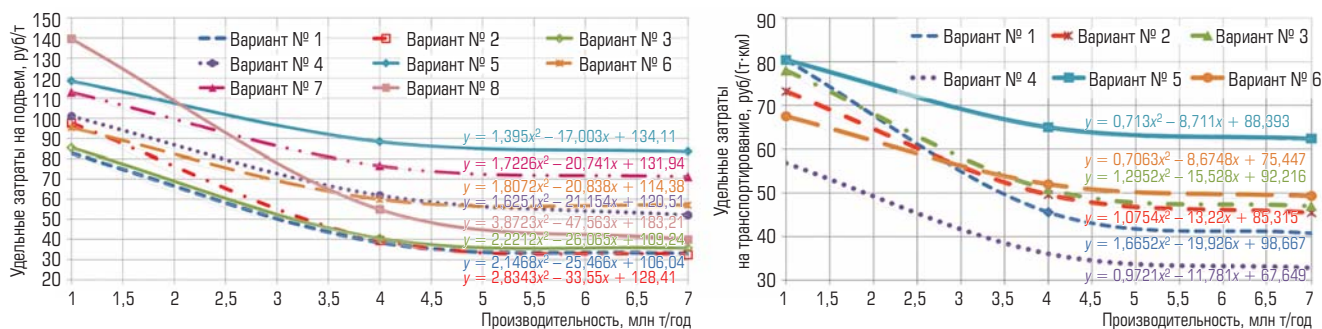


Рис. 2. Зависимость удельных затрат на подъем руды от объема грузопотока

малых значений грузопотока (до 2,4 млн т/год наиболее эффективно применение автотранспорта, а для больших – канатно-ленточного конвейера). Для месторождения Чингисуай, расположенного в гористой местности со значительным перепадом высот, обоснована эффективность применения грузовой канатно-подвесной дороги, позволяющей рекуперировать электроэнергию.

При выборе внутрирудничных транспортных систем выяснилось, что на месторождении Чингисуай в качестве карьерного транспорта ввиду небольшой производительности целесообразно применение самосвалов. Для подземной разработки месторождения Партомчорр наряду с традиционными рассматривали перспективные энергоэффективные виды транспорта (конвейеры – вертикальные, крутонаклонные и с криволинейной трассой; рельсовые транспортеры на дистанционном управлении (ДУ); дизель-электрические самосвалы и др.), при этом выбор определяется перемещением груза в горизонтальной (откаточный горизонт) и вертикальной (подъем на поверхность) плоскостях. Для оценки оборудования подъема и транспортирования руды в ГИС MINEFRAME построены 3D-модели 8 способов вскрытия и 6 вариантов подготовки транспортного горизонта (табл. 2).

Построены экономико-математические модели, описывающие изменение затрат на подъем и транспортирование руды в зависимости от A_r в диапазоне от 1 до 7 млн т/год. Полученные зависимости позволяют выбрать наиболее эффективные способы транспортирования, а также расширяют теоретическое

представление об области рационального применения перспективных транспортных систем, что может быть использовано при проектировании других месторождений (рис. 2).

Применительно к месторождению Партомчорр рациональным является комбинация транспортных систем. Подъем руды целесообразно осуществлять наклонными конвейерами, а транспортирование по горизонту – рельсовыми транспортерами на ДУ, что обеспечит высокую безопасность и наибольшую экономическую эффективность работ. Преимущества предложенных транспортных схем обусловлены сокращением сроков строительства, затрат на горно-капитальные работы, снижением эксплуатационных расходов на выдачу руды.

Обоснование параметров открытой и подземной геотехнологии

Наряду с анализом транспортных систем с использованием объемного и экономико-математического моделирования было выполнено обоснование параметров открытой и подземной разработки [12].

На основе компьютерного моделирования горно-геологических объектов предложен комбинированный открыто-подземный способ отработки месторождения Партомчорр (рис. 3).

Для подземного способа обоснована ресурсосберегающая геотехнология с отработкой запасов по системам разработки с открытым очистным пространством, предконцентрацией бедных руд и утилизацией пустой породы в подземных условиях, позволяющая исключить обрушение земной поверхности, уменьшить количество поверхностных отвалов, повысить качество руды и снизить расходы на рудничный и поверхностный транспорт [13].

Для открытых горных работ (ОГР) определены параметры карьеров с новой конструкцией борта и с осуществлением гидроизоляционных мероприятий. Несмотря на приповерхностное залегание рудных тел, строительство масштабных карьеров невозможно ввиду падения залежи под гору и большом объеме вскрышных работ. Поэтому первоначально были обоснованы четыре небольших участка карьера, разделенных, в свою очередь, рудными водоохранными целиками. Это позволяло начать отработку запасов в период строительства и развития основного подземного рудника (в течение 9 лет) [14].

Затем были обоснованы параметры карьеров при условии строительства водоотводных каналов по специально предусмотренным бермам на бортах карьеров. Это позволило объединить

Таблица 2. Способы вскрытия и подготовки

Вариант	Способы вскрытия и вид транспорта (подъем руды)	Вариант	Виды транспорта на концентрационном горизонте		
№ 1	Конвейерными стволами: наклонным конвейерами	№ 1	Конвейерный с ленточными конвейерами		
				№ 2	ЖД узкой колеи:
				№ 3	отечественное оборудование
№ 4	вертикальным с конвейером	№ 2	импортное оборудование		
№ 5	Вертикальным скиповым стволом	№ 3			
№ 6	Наклонными автосъездами: с подземными самосвалами	№ 4	Рельсовые транспортеры на ДУ		
				№ 5	Автомобильный:
				№ 6	подземные автосамосвалы
№ 7	с троллейвозами	№ 5			
№ 8	Наклонным стволом с рельсовыми транспортерами на дистанционном управлении	№ 6	поверхностные автосамосвалы		

*Курсивом выделены схемы с применением перспективных видов транспорта.

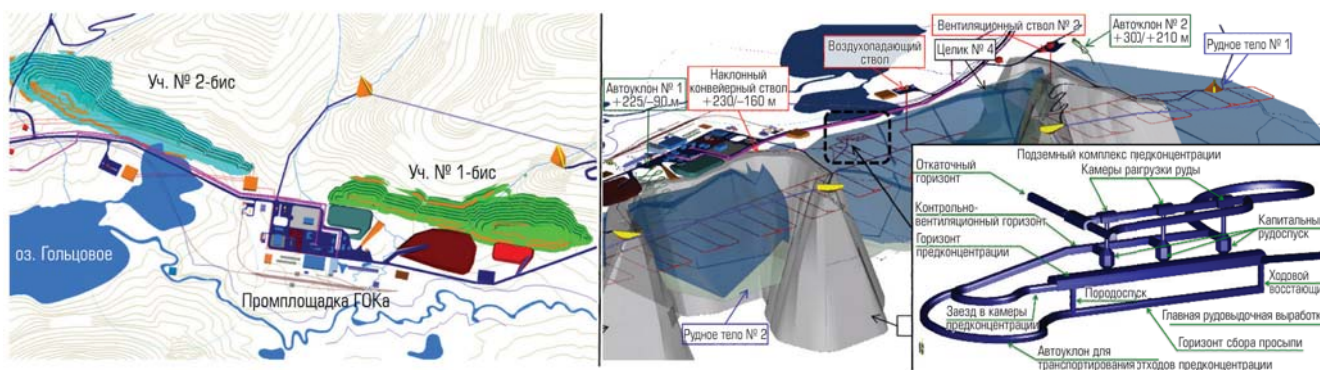


Рис. 3. Моделирование объектов открыто-подземной геотехнологии

участки ОГР в два средних по размерам карьера и увеличить запасы в 2,6 раза при росте объема вскрыши в 2,9 раза. Период строительства карьеров составит 4 года, объем горно-капитальных работ – около 17,4 млн м³, а период устойчивой добычи – 14 лет при производительности 6 млн т руды в год. При применении конструкции борта карьера с уступами, имеющими вертикальные откосы [15], и водоотводными каналами объемы вскрыши снизятся на 19 %, затраты на горные работы – на 6,6 млрд руб., а емкость внешнего отвала также сократится на 19 %. В случае применения частичной засыпки выработанных пространств вскрышными породами объем отвалов снизится до 50–60 %.

Разработка комбинированных технологий обогащения редкометалльного сырья

С учетом качества сырья, получаемого в результате открытых и подземных горных работ, были проведены исследования вещественного и химического состава, направленные на разработку новых технологий обогащения.

Для выполнения требований экологической безопасности освоения недр в технологии обогащения нужно достигать максимально полного извлечения полезных компонентов. Особенно это актуально при отработке месторождений бедных руд с большим количеством техногенных отходов, а также минеральных объектов, расположенных на северных и особо охраняемых природных территориях. К их числу относятся месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, являющиеся одним из крупнейших российских объектов по запасам РЗЭ. Особенный интерес представляет месторождение Партомчорр, апатит которого характеризуется наибольшим содержанием стронция и редкоземельных металлов, что связано с замещением Са на Sr и РЗЭ. Среднее содержание ΣTR_2O_3 в хибинском фторапатите составляет 0,5–1,2 % (мас.), причем чем ниже содержание в руде P_2O_5 , тем больше стронция и TR в составе минерала. В сфене редкоземельных металлов меньше вследствие его самоочищения от микропримесей, но содержание самого сфена в руде отдельных месторождений делает его перспективным в качестве источника редкоземельных элементов.

Проведены исследования по комплексному обогащению двух разновидностей руды месторождения Партомчорр – апатит-нефелиновой и сфен-apatитовой с целью выделения всех возможных полезных компонентов. Установлено высокое содержание темноцветных минералов в исследуемых рудах, требующее разработки

реагентных режимов флотации апатита и нефелина, обеспечивающих высокую селективность разделения минеральных комплексов.

На основе лабораторных исследований разработана принципиальная флотационно-магнитная схема обогащения с выделением пяти концентратов из апатит-нефелиновой и сфен-apatитовой руды: апатитового с содержанием 39,2 и 39,8 % P_2O_5 при извлечении 87,7 и 89 %; нефелинового с содержанием Al_2O_3 28,75 и 29,95 % при извлечении 69,6 и 74,4 %; титано-магнетитового с содержанием 56,2 и 56,6 % $Fe_{общ.}$ при извлечении 38 и 60 %; сфенового с содержанием 34,13 и 36,23 % TiO_2 при извлечении 37,4 и 40,3 %; эгиринового с содержанием 6,19 и 8,48 % TiO_2 при извлечении 28,1 и 21 %.

Содержание РЗЭ в апатитовых концентратах, полученных из апатит-нефелиновой и сфен-apatитовой руды, составило 1,12 и 1,27 % ΣTR_2O_3 при извлечении 73,3 и 65,6 % соответственно. Содержание ΣTR_2O_3 в сфеновых концентратах составило 0,464 и 0,555 % ΣTR_2O_3 при извлечении 8,6 и 18,2 %. На основании выполненных исследований определена потенциальная извлекаемая ценность полезных компонентов в руде, составившая 13,4 тыс руб/т. Вклад стоимости каждого из возможных товарных продуктов в общей извлекаемой ценности руды различен (рис. 4).

Разработка способа очистки сточных вод от редких металлов

Важными вопросами, неразрывно связанными с обогащением минерального сырья и оказывающими влияние на экологическую безопасность обогатительного передела, являются очистка

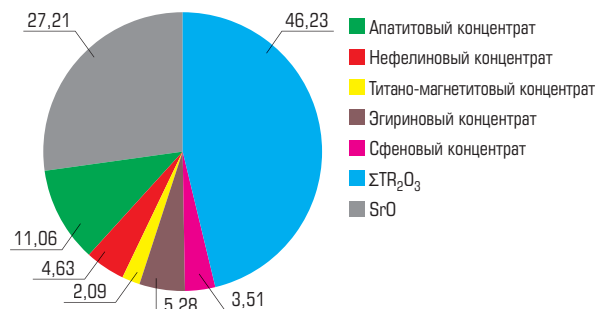


Рис. 4. Процентное соотношение стоимости возможных к получению товарных продуктов в общей извлекаемой ценности руды

сточных вод и консервация техногенных отходов. Одной из задач снижения техногенной нагрузки на природную среду является очистка сточных вод перед сбросом в открытые водоемы. При обогащении лопаритовых руд изучено содержание ниобия в сточных водах методом компьютерного моделирования химического равновесия с учетом химического состава перерабатываемых руд и вмещающих горных пород. В результате установлено, что в нейтральной среде концентрация ниобия близка к предельно допустимой концентрации. С увеличением в водном растворе значений pH из-за применения в обогатительном цикле соды содержание ниобия превышает предельно допустимую концентрацию в 600 раз, что связано с выщелачиванием горных пород [16].

Для обоснования способа извлечения ниобия из сточных вод установлена зависимость форм его нахождения в многокомпонентной системе, равновесной с лопаритсодержащей рудой, от окислительно-восстановительных условий и кислотно-основного равновесия. Показана целесообразность использования тонкодисперсных частиц отходов обогащения магнетитсодержащих руд (например, сливов фильтрации концентрата) в качестве сорбентов ниобия и определен прогнозируемый расход от 0,044 до 1,1 кг/м³ в зависимости от pH среды).

Установлено, что в равновесном с лопаритовой рудой растворе церий находится в твердой фазе в виде оксида. Для оценки возможности извлечения частиц оксида церия из раствора разработана методика исследования коагуляции минеральных суспензий методом капиллярного электрофореза. Показано, что коагуляция оксида церия происходит в присутствии сорбента ниобия, при этом коагуляция других компонентов лопаритовой руды (нефелина, апатита, эвдиалита) происходит в меньшей степени. Экспериментально установлено соотношение концентраций сорбент/оксид церия, при котором происходит полная коагуляция оксида церия.

Таким образом, выполнено обоснование одновременного извлечения ниобия и церия из сточных вод переработки лопаритовой руды сорбцией гексаниобат-иона и коагуляцией оксида церия в присутствии сорбента (отходы обогащения магнетитсодержащих руд). Для выделения отработанных частиц сорбента перспективен метод магнитно-гравитационной сепарации.

Методический подход к обоснованию технологии консервации складированных отходов обогащения редкометалльных руд

При некомплексной переработке минерального сырья значительная часть его складировается в виде отходов рудообогащения в хвостохранилищах, являющихся, по существу, техногенным месторождением. Неиспользуемые отходы — это ущерб, наносимый природной среде, и безвозвратно теряемые в результате эрозии минеральные ресурсы.

На основании анализа факторов, лимитирующих процессы самозаращения, обоснован методический подход к решению проблемы консервации складированных отходов обогащения лопаритовых руд, заключающийся в создании сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя для образования биологически активной среды и быстрого формирования устойчивой дернины с целью подавления ветровой и водной эрозии.

Причиной потерь складированных отходов обогащения лопаритовых руд является также химическое выветривание, приводящее к изменению их вещественного состава. В процессе компьютерного физико-химического моделирования химического выветривания состав исследуемой системы представлен 20 элементами: H, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Fe, Nb, Ce, Ti, Mn, Sr, F, Cl. При моделировании химического выветривания выделены три зоны разреза хвостохранилища, различающиеся содержанием воды и доступностью для атмосферных газов — основных факторов химического выветривания: зона просачивания, зона капиллярного поднятия, зона полного влагонасыщения. Как показали расчеты, в зоне просачивания, занимающей большую часть хвостохранилища, создание дернины на три порядка уменьшает интенсивность химического выветривания, что позволяет сохранить складированные отходы обогащения лопаритовых руд.

Таким образом, создание дернины для консервации складированных отходов обогащения редкометалльных руд способствует прекращению ветровой и водной эрозии, что тем самым обеспечивает сохранение техногенного минерального сырья для его последующего использования.

Заключение

Освоение новых и повышение эффективности разрабатываемых месторождений отечественной базы редкометалльного сырья достигается путем создания инновационных технологий, отвечающих современным требованиям энерго- и ресурсосбережения, промышленной и экологической безопасности. В работе представлены результаты комплексных междисциплинарных исследований по созданию новых технологий добычи и глубокой переработки стратегического сырья Кольского ГПК.

Для рассматриваемых месторождений Хибинского и Ловозерского горных массивов обоснованы параметры межплощадочных (в условиях значительных перепадов высот) и внутрирудничных транспортных систем с применением новых энергоэффективных видов транспорта; определены параметры отработки с применением новой конструкции бортов карьера и ресурсосберегающей подземной геотехнологии с предконцентрацией отбитой руды; разработаны технологии комплексного обогащения редкометалльного сырья с максимальным извлечением полезных компонентов; выявлена потенциальная ценность бедных апатитсодержащих руд при извлечении редких металлов; разработан способ очистки сточных вод переработки лопаритовой руды от редких металлов при одновременном извлечении ниобия и церия; предложен методический подход к консервации складированных отходов обогащения.


Таким образом, новые знания, полученные на основе компьютерного моделирования объектов и процессов горнообогатительного производства позволяют эффективно решать задачи обоснования технологий добычи и переработки редкометалльного и редкоземельного сырья, а также экологические проблемы горного производства.

Работа выполнена по проектам Российского научного фонда 14-17-00761 и 14-17-00761-П.

Библиографический список

1. Вернигора А. С. Вертикально интегрированная компания как основа развития редкоземельной промышленности в России // Цветные металлы. 2014. № 7. С. 9–13.
2. Pakhomov A. A., Danilov Yu. G., Grigoriev V. P. Problems and prospects of development of Tomtor niobium – rare earth deposits // Eurasian Mining. 2015. No. 2. P. 44–47. DOI: 10.17580/em.2015.02.11
3. Мельников Н. Н. Информационные технологии в реализации Экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск. 23. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей промышленности. С. 7–18.
4. Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 3–9. DOI: 10.17580/or.2014.02.01
5. Кармазин В. В., Младетский И. К., Пилов П. И. Расчеты технологических показателей обогащения полезных ископаемых. – М.: Горная книга, 2018. – 228 с.
6. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
7. Экстракционное разделение концентратов РЗЭ в каскадах центробежных экстракторов, модель ЭЦ-1000ПБ / Скайград. URL: <http://innovations.sky-grad.ru/razdeleniye> (дата обращения: 19.04.2019).
8. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals // Advances in Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 166, Iss. 1–2. P. 36–59.
9. Heikkinen P. M., Noras P., Salminen R., Mroueh U.-M., Vahanne P. et al. Mine Closure

Handbook. Environmental Techniques for the Extractive Industries. – Espoo, 2008. – 170 p.

10. Kai Lei, Huiyun Pan, Chunye Lin. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas // Ecological Engineering. 2016. Vol. 90. P. 320–325.
11. Pérez Cebada J. D. Mining corporations and air pollution science before the Age of Ecology // Ecological Economics. 2016. Vol. 123. P. 77–83.
12. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы – история развития и современное состояние. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2016. – 196 с.
13. Gromov E. V., Belogorodtsev O. V. Substantiation of parameters of nature-resource-saving underground mining technology with preliminary concentration and utilization of non-conditioned ore in mined space. partomchorr apatite-nepheline deposit case study // Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. – Albena, 2016. Book 1. Vol. 2. P. 841–847.
14. Билин А. Л., Торпов Д. А. Определение параметров участков открытых горных работ на предполагаемом к освоению месторождении «Партомчорр» в условиях экологических ограничений // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск 23. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли. С. 126–133.
15. Козырев А. А., Рыбин В. В. Геомеханическое обоснование рациональных конструкций бортов карьеров в тектонически напряженных массивах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2015. Т. 2. № 2. С. 245–250.
16. Mesyats S., Ostapenko S. Substantiation of sorption method for removing niobium from sewage water after rare-metal ores processing // Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. – Albena, 2016. Book 5. Vol. 2. P. 783–790. 

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 61–66
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.08

An integrated interdisciplinary approach to substantiation of innovative technologies for extraction and processing of rare-metal mineral reserves of the Kola mining sector

Information about authors

E. V. Gromov¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, evgromov@goi.kolasc.net.ru
A. L. Bilin², Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences
G. V. Mitrofanova², Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences
S. P. Ostapenko², Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Murmansk Arctic State University, Apatity, Russia

²Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

Aimed at increase in mineral reserves and mineral resources, as well as at improvement of ecological safety and efficiency of operating and future mines, substantiation is provided for REE–REM mining and processes as well as waste management technologies which enable reduced stripping quantity, larger recovery of useful components and mitigated environmental load.

Innovative technologies are based on the solution of interrelated geomechanical and technological problems on pitwall steepening, rock haulage in deeper pits, surface/underground mining transition, as well as on the quantum-chemical calculations and regularities of separation mass transfer in multiphase media in optimization of process flowsheets for mineral processing and wastewater treatment.

The authors have established a concept of low-grade ore mining under environmental restrictions, including: hybrid method of mining; mine planning and design taking into account potential reuse of underground space and waste management; introduction of underground preconcentration of broken ore; internal storage of dehydrated waste; integrated extraction of useful components during processing; use of a closed water circulation system; transition from diesel to electric transport; monitoring of natural environment. In terms of a low-grade ore deposit containing rare-earth elements and located near natural areas of preferential protection, the authors have developed a low-waste geotechnology, including a new pitwall design with vertical benches and drainage utilities for mining in difficult hydrological conditions, and an underground mining technology with ore preconcentration and recycling of substandard ore mass in the mined-out space. The cost-effective use limits substantiated for new long-haul and in-mine ore transportation, and a technology of dehydrated laying of processing waste with internal and external dumping are also included into the geotechnology.

The authors have developed the concept of flowsheeting for processing rare-metal raw materials based on information technologies of prototyping processes and devices, as well as substantiated the method of niobium and cerium extraction from wastewater of loparite ore processing and the methodology of environmentally sound conservation of stored loparite beneficiation waste by creating a biogeobarier. The study was supported by the Russian Science Foundation, Projects No. 14–17–00761 and 14–17–00761-P.

The authors appreciate participation of V. V. Biryukov, Researcher of the Institute of Mining, KSC RAS, in this study.

Keywords: rare-earth and rare-metal minerals, mineral mining and processing and waste management, modeling, flowsheeting, waste water, purification, ore processing waste, conservation.

References

1. Vernigora A. S. Vertically-integrated company as the basis of development of rare-earth industry in Russia. *Tsvetnye Metally*. 2014. No. 7. pp. 9–13.
2. Pakhomov A. A., Danilov Yu. G., Grigoriev V. P. Problems and prospects of development of Tomtor niobium – rare earth deposits. *Eurasian Mining*. 2015. No. 2. pp. 44–47. DOI: 10.17580/em.2015.02.11
3. Melnikov N. N. Information technologies in ecological strategy of mining development. *GIAB*. 2017. Special Issue 23. Information technologies in ecological strategy of mining development. pp. 7–18.
4. Chanturiya V. A., Vaisberg L. A., Kozlov A. P. Promising trends in investigations aimed at all-round utilization of mineral raw materials. *Obogashchenie Rud*. 2014. No. 2. pp. 3–9. DOI: 10.17580/or.2014.02.01
5. Karmazin V. V., Mladetsky I. K., Pilov P. I. Production data calculation in mineral beneficiation. Moscow: Gornaya kniga, 2018. 228 p.
6. Tikhonov O. N. Mechanisms of efficient separation of minerals during processing. Moscow: Nedra, 1984. 208 p.
7. Extraction separation of REE concentrates in centrifugal extraction cascade, Model ETS-1000PB. Skygrad. Available at: <http://innovations.sky-grad.ru/razdeleniye> (accessed: 19.04.2019).
8. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 166, Iss. 1–2. pp. 36–59.
9. Heikkinen P. M., Noras P., Salminen R., Mroueh U.-M., Vahanne P. et al. Mine Closure Handbook. Environmental Techniques for the Extractive Industries. Espoo, 2008. 170 p.
10. Kai Lei, Huiyun Pan, Chunye Lin. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas. *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 90. pp. 320–325.
11. Pérez Cebada J. D. Mining corporations and air pollution science before the Age of Ecology. *Ecological Economics*. 2016. Vol. 123. pp. 77–83.
12. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. Geological information systems – History and state-of-the-art. Apatity: Izdatelstvo KNTS RAN, 2016. 196 p.
13. Gromov E. V., Belogorodtsev O. V. Substantiation of parameters of nature-resource-saving underground mining technology with preliminary concentration and utilization of non-conditioned ore in mined space. partomchorr apatite-nepheline deposit case study. *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, 2016. Book 1, Vol. 2. pp. 841–847.
14. Bilin A. L., Torpov D. A. Determination of the parameters of open mining on the proposed Partomchorr deposit under environmentally restricted conditions. *GIAB*. 2017. Special Issue 23. Information technologies in implementation of ecological strategy of mining industry development. pp. 126–133.
15. Kozlyev A. A., Rybin B. B. Geomechanical validation of rational designs of pit walls in rock mass under high tectonic stresses. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2015. Vol. 2, No. 2. pp. 245–250.
16. Mesyats S., Ostapenko S. Substantiation of sorption method for removing niobium from sewage water after rare-metal ores processing. *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, 2016. Book 5, Vol. 2. pp. 783–790.