

Научная статья
УДК 622.7*1
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.044

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РУДЫ КОЛМОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВОВ РУДОРАЗБОРНОЙ ПРОБЫ

Илья Леонидович Фуреев¹, Юрий Николаевич Нерадовский²

¹Ведущий научно-исследовательский институт химических технологий, Москва, Россия,
ILFureev@rosatom.ru

²Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты,
Россия, lu.neradovskij@yandex.ru

Аннотация

На основе анализа данных об изучении химического и минерального составов предложены варианты рациональных технологических схем для дальнейшей оценки их эффективности на этапе лабораторных исследований. Выявлены благоприятные и неблагоприятные факторы для сепарационных и гидрометаллургических процессов. Установлены особенности химического и минерального составов рудоразборной пробы руды Колмозерского месторождения.

Ключевые слова:

Колмозерское месторождение, химический состав, минеральный состав, литий, сподумен, обогащение, гидрометаллургия, технология

Для цитирования:

Фуреев И. Л., Нерадовский Ю. Н. Выбор рациональной технологии переработки руды Колмозерского месторождения на основе изучения химического и минерального составов рудоразборной пробы // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 245–249.
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.044

Original article

CHOICE OF A RATIONAL TECHNOLOGY FOR PROCESSING ORE OF THE KOLMOZERSKOYE DEPOSIT ON THE BASIS OF STUDYING THE CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION OF THE ORE SAMPLE

Ilya L. Fureev¹, Yuri N. Neradovsky²

¹Leading Research Institute of Chemical Technologies, Moscow, Russia, ILFureev@rosatom.ru

²Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
lu.neradovskij@yandex.ru

Abstract

Based on the analysis of data on the study of the chemical and mineral composition, options for rational technological schemes are proposed for further evaluation of their effectiveness at the stage of laboratory research. Favorable and unfavorable factors for separation and hydrometallurgical processes are revealed. The features of the chemical and mineral composition of the ore sorting sample of the ore of the Kolmozerskoe deposit have been established.

Keywords:

Kolmozerskoe deposit, chemical composition, mineral composition, lithium, spodumene, enrichment, hydrometallurgy, technology

For citation:

Fureev I. L., Neradovsky Yu. N. Choice of a rational technology for processing ore of the Kolmozerskoye deposit on the basis of studying the chemical and mineral composition of the ore sample // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 245–249.
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.044

Введение

В госкорпорации «Росатом» утверждена и реализуется стратегическая программа «Развитие литиевого направления бизнеса госкорпорации “Росатом”», ориентированная на приоритетное удовлетворение потребностей российских потребителей. Одним из ключевых проектов программы является освоение Колмозерского месторождения (протокол от 30.08.2021 № 1-13/185-Пр). Освоение Колмозерского рудного месторождения в РФ планируется в партнерстве с ГМК «Норильский никель». Проект направлен на импортозамещение лития для удовлетворения потребностей экономики Российской Федерации, в том числе обеспечение поставок литиевой продукции для российских производств систем накопления энергии (ООО «РЭНЕРА») в рамках реализации стратегической инициативы по развитию электротранспорта.

Особенности химического и минерального составов проб

Химический анализ рудоразборной пробы Колмозерского месторождения, представленный в табл. 1, включает данные о 41 элементе (9 рудообразующих и 32 редких и редкоземельных). Наиболее заметное отличие состава данной пробы от ранее анализировавшихся проб — низкое содержание MgO, по остальным соединениям наблюдается высокое сходство результатов анализов литиеносных пегматитов Колмозерского месторождения, что свидетельствует о соответствии отобранной рудоразборной пробы типичным рудам месторождения [1].

Таблица 1

Химический анализ рудоразборной пробы руды Колмозерского месторождения
и данные из литературных источников для сравнения

Соединение	Единицы измерения	Содержание			
		ПХА (ГИ КНЦ РАН)	ИСП МС (ИХТРЭМС КНЦ РАН)	По [2]	По [3]
Li ₂ O	%	1,59	1,50	1,13	2,55
Rb ₂ O	ppm	—	—	2000,00	683,8
Cs ₂ O	ppm	—	—	100,00	23,00
BeO	ppm	—	331,00	370,00	113,40
Na ₂ O	%	3,81	3,03	3,80	3,01
MgO	ppm	300,00	390,9	2900,00	600,00
SiO ₂	%	74,48	—	72,10	73,82
Al ₂ O ₃	%	15,98	12,5	17,07	16,34
P ₂ O ₅	%	—	0,32	0,27	0,15
K ₂ O	%	2,18	2,15	1,93	1,48
CaO	%	—	1,08	0,72	0,05
Sc ₂ O ₃	ppm	—	35,50	—	—
TiO ₂	ppm	300,00	27,20	400,00	200,00
V ₂ O ₅	ppm	—	10,00	50,00	—
Cr ₂ O ₃	ppm	—	52,70	—	—
MnO	ppm	720,00	676,70	1200	1100,00
Fe ₂ O ₃	%	1,53	1,52	0,97	1,68
CoO	ppm	—	1,74	Нп	—
NiO	ppm	—	32,60	400,00	—
CuO	ppm	—	13,40	Сл	—
SrO	ppm	—	7,53	Нп	10,80
Y ₂ O ₃	ppm	—	0,096	—	0,30
ZrO ₂	ppm	—	117,40	70,00	8,13
Nb ₂ O ₅	ppm	—	75,80	110,00	81,20
BaO	ppm	—	18,30	100,00	11,06
La ₂ O ₃	ppm	—	0,13	—	0,51
CeO ₂	ppm	—	0,45	—	0,66
Pr ₂ O ₃	ppm	—	0,041	—	0,95
Nd ₂ O ₃	ppm	—	0,16	—	0,31
SmO ₃	ppm	—	0,040	—	0,06
Eu ₂ O ₃	ppm	—	0,0015	—	0,01
Gd ₂ O ₃	ppm	—	0,072	—	0,06
Tb ₂ O ₃	ppm	—	0,0064	—	0,009
Dy ₂ O ₃	ppm	—	0,023	—	0,047
Ho ₂ O ₃	ppm	—	0,0067	—	0,008
Er ₂ O ₃	ppm	—	0,021	—	0,025
Yb ₂ O ₃	ppm	—	0,034	—	0,02
HfO ₂	ppm	—	1,95	—	1,29
Ta ₂ O ₅	ppm	—	53,20	90,00	59,04
ThO ₂	ppm	—	0,88	—	1,30
UO ₂	ppm	—	4,65	Сл	5,14
ΣTr ₂ O ₃	%	0,147	—	—	—

Примечание. Нп — ниже порога обнаружения; сл — следы. «—» — элемент не определялся.

В таблице 2 приведены результаты определения минерального состава рудоразборной пробы Колмозерского месторождения разными методами. Наибольшей информативностью обладают методы фазового весового количественного анализа (ФМА) и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Сочетание двух рассмотренных методов минералогического анализа при изучении состава данной пробы представляется оптимальным [1].

Таблица 2

Сводные результаты определения минералов рудоразборной пробы Колмозерского месторождения различными методами

Минерал	Метод анализа					1	2
	РФА	ФМА	РС	ОМА	СЭМ		
Кварц	35,00	34,57	+	+	+	29,70	30–35
Альбит	30,80	30,64	+	+	+	31,40	30–35
Сподумен	24,60	24,49	+	+	–	17,30	20–18
Микроклин	8,40	8,25	–	–	+	14,20	25–10
Мусковит	1,13	1,18	+	+	+	6,50	5–7
Апатит	–	0,82	+	–	+	0,25	< 1
Гранат	–	0,02	–	–	–	–	–
Ильменит	–	0,012	–	–	–	0,20	< 1
Танталит	–	0,008	–	–	+	0,37	< 1
Колумбит	–	0,006	–	–	+	–	< 1
Магнетит	–	0,004	–	–	–	–	< 1
Берилл	–	Зн	–	–	–	0,079	< 1
Циркон	–	Зн	–	–	+	–	–
Турмалин	–	Зн	–	–	–	–	–
(U, Pb)O ₂	–	–	–	–	+	–	–
(U, Th)	–	–	–	–	+	–	–
Sn	–	–	–	–	+	–	–
(Bi, Si, Fe)	–	–	–	–	+	–	–

Примечание. РФА — рентгенофазовый анализ; ФМА — фазовый количественный анализ; РС — рамановский анализ; ОМА — оптический микроскопический анализ; СЭМ — сканирующий электронно-зондовый анализ; Зн — знаки; 1 — анализ технологической пробы по керну [2]; 2 — анализ штучной технологической пробы; пустая клетка — минерал не обнаружен.

К особенностям минерального и химического составов, влияющим на извлечение основных и попутных ценных компонентов изученной пробы, относятся: 1) проба представляет однородный состав пегматитов, соответствующий главной разновидности литиевых руд — типу альбит-сподуменового состава, характеризующихся пегматоидной, пойкилитовой, зональной и графической текстурой; крупнозернистой и гигантозернистой структурой; акцессорные минералы — апатит, гранат, ильменит, колумбит, танталит, магнетит в пределах 1 %; 2) в минеральном составе пробы преобладают минералы, среди которых основными являются кварц, альбит и сподумен с содержанием соответственно 34,57; 30,64; 24,49 %; 3) апатит преимущественно встречается во включениях в кварце; 4) в альбите присутствует циркон в виде округлых зерен размером до 5 мкм; 5) наличие легкошламуемых минералов в пробе негативно отразится на эффективности всех процессов извлечения ценных компонентов, а также на расходе реагентов при флотации и выщелачивании; 6) крупность зерен сподумена и полевых шпатов до 70 мкм; 7) основным ценным элементом пробы является литий, форма выделения — сподумен; 8) во включениях в сподумене присутствует металлическое олово; 9) в минералогических препаратах колумбит и танталит визуализирован в виде включений в альбите, сподумене и кварце; зерна неоднородные переходного состава, образуют хорошо ограненные пластинчатые кристаллы зонального строения размером до 0,1 мм; 10) в колумбите и танталите присутствуют включения U или (U, Pb)O₂ размером менее 0,05 мкм; 11) среднее содержание оксида лития в пробе 1,22 %; по данным химического анализа, руда относится к рядовой; 12) химический состав рассмотренных фаз показывает, что редкие минералы обеспечивают присутствие в составе руды, кроме основных редких металлов, — тантала и ниобия, также марганца, свинца, урана, цезия, висмута, фосфора, циркона и гафния; 13) по составу ниобий-танталовых минералов очевидно, что чистые фазы колумбита и танталита отсутствуют и все выделения относятся к смешанному ряду колумбит-танталита.

Благоприятные и неблагоприятные факторы для сепарационных и гидрометаллургических процессов

На основании выполненных исследований по изучению химического и минерального составов рудоразборной пробы установлены факторы, благоприятные и неблагоприятные для основных обогатительных процессов и процесса выщелачивания с целью извлечения лития.

Следует отметить, что установленные в системе химического и минерального составов благоприятные и неблагоприятные факторы имеют качественную характеристику, не определяющую степень влияния того или иного фактора на эффективность сепарационного или гидрометаллургического процессов.

Благоприятным фактором для рудосортировки является наличие частиц сподумена крупностью до 70 мм. Пегматоидная текстура альбит-сподуменовых пегматитов представлена на рисунке. Неблагоприятным же фактором является присутствие частиц ценных минералов крупностью, неподдающейся рудосортировке [4].



Пегматоидная текстура альбит-сподуменовых пегматитов, включенных в состав пробы, минералы: Spd — сподумен; Qz — кварц; Ab — альбит; Kfs — калиевый полево шпат; Ms — мусковит

Для гравитационного обогащения неблагоприятными факторами являются: 1) низкая степень контрастности физических свойств, в первую очередь плотности ценных и вмещающих минералов; 2) присутствие частиц сподумена крупностью менее 20 мкм; 3) микроскопическая размерность ценных минералов, заключенных в породных минералах.

При флотационном обогащении благоприятным фактором является присутствие сподумена и ценных минералов в классе крупности $-100 + 10$ мкм с открытой поверхностью. К неблагоприятным факторам относятся [5]: 1) присутствие частиц сподумена крупностью более 100 и менее 10 мкм; 2) присутствие в минеральном составе пробы мусковита, обладающего природной флотоактивностью, что приведет к его концентрации в пенном продукте и при последующем выщелачивании может снизить эффективность процесса; 3) наличие легкошламуемых минералов может привести к повышенным расходам флотореагентов и снижению качества концентратов с повышением выхода.

Для сульфатизации и выщелачивания благоприятными факторами являются: 1) структурно-текстурные характеристики вмещающих пород, способствующих быстрому проникновению растворов; 2) присутствие сподумена в свободном виде; 3) наличие в руде частиц сподумена крупностью менее 100 мкм.

Неблагоприятными же факторами для сульфатизации и выщелачивания выступают: 1) закрытые по сподумену сростки с породными минералами; 2) наличие частиц сподумена изометричной формы крупностью более 100 мкм, что увеличит продолжительность процесса; 3) наличие в руде легкошламуемых минералов-сорбентов и нейтрализаторов кислоты, что может потребовать большего расхода реагентов для сульфатизации и выщелачивания.

Выводы

Анализ благоприятных и неблагоприятных факторов для каждого из сепарационных процессов, а также процессов сульфатизации и выщелачивания свидетельствует об отсутствии единственного метода переработки рудоразборной пробы сподуменовой руды и предполагает применение комбинированных схем.

В то же время выявлено некоторое преимущество по количеству и значимости благоприятных факторов для рудосортировки, флотации, сульфатизации и выщелачивания, что позволяет именно данную комбинацию методов рассматривать в качестве наиболее рациональной технологии.

Степень влияния установленных в системе химического и минерального составов факторов, в первую очередь снижающих эффективность технологических процессов, определяется при проведении технологических испытаний.

Оптимизация режимных параметров процессов с целью максимального снижения негативного влияния и обеспечения их эффективности позволит реализовать возможность оперативного управления технологическим процессом при промышленной переработке руды месторождения.

Исходя из результатов изучения химического и минерального составов рудоразборной пробы, целесообразно оценить варианты технологических схем: рудосортировка в голове процесса с флотационным обогащением хвостов и последующим выщелачиванием, прямое выщелачивание сподумена исходной руды или хвостов рудосортировки с выщелачиванием/спеканием концентрата рудосортировки. Для проведения системного сравнительного анализа эффективности указанных схем необходимо проведение лабораторных испытаний.

Список источников

1. Отчет о НИР (заключит.) / ГИ КНЦ РАН; Руководитель Н. Е. Козлов; отв. исполн. Ю. Н. Нерадовский. Шифр темы «Изучение химического и минерального состава рудоразборной пробы Колмозерского месторождения»; Апатиты, 2022. 60 с.
2. Заседателев А. М. Результаты работ Кольского филиала по изучению редкометалльных пегматитов и соображения о дальнейших их поисках и исследованиях // Фонды КФ АН СССР, 1959.
3. Морозова Л. Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные: новые данные по редкометалльному составу (Кольский полуостров) // Литосфера. 2018. Т. 18, №1. С. 82–98.
4. Бабич И. Н. Оптимизация технологического изучения руд по результатам оценки их контрастности в недрах // Рациональное освоение недр. 2015. № 5–6. С. 45–50.
5. Пахомова Г. А., Фищенко Ю. Ю., Терентьева Е. А. К вопросу прогнозирования показателей флотационного обогащения по данным минералогических исследований // Рациональное освоение недр. 2015. № 5–6. С. 41–44.

References

1. Otchet o NIR (zaklyuchit) [Report on research (concluding)]. GI KSC RAS; Supervisor N. E. Kozlov, Rev. performer Yu. N. Neradovsky. *Hifr temy "Izuchenie himicheskogo i mineral'nogo sostava rudorazbornej proby Kolmozerskogo mestorozhdeniya"* [Code of the topic "Study of the chemical and mineral composition of the ore-gathering sample of the Kolmozerskoe deposit"]. Apatity, 2022, 60 p.
2. Zasedatelev A. M. *Rezultaty rabot Kol'skogo filiala po izucheniyu redkometal'nyh pegmatitov i soobrazheniya o dal'nejshih ih poiskah i issledovaniyah* [The results of the work of the Kola branch on the study of rare-metal pegmatites and considerations for their further search and research]. Funds of the KF Academy of Sciences of the USSR, 1959.
3. Morozova L. N. Kolmozerskoe litievoe mestorozhdenie redkometal'nyh pegmatitov: novye dannye: novye dannye po redkometal'nomu sostavu (Kol'skij poluostrov) [Kolmozero lithium deposit of rare metal pegmatites: new data: new data on rare metal composition (Kola Peninsula)]. *Litosfera* [Lithosphere], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 82–98. (In Russ.).
4. Babich I. N. Optimizaciya tekhnologicheskogo izucheniya rud po rezul'tatam ocenki ih kontrastnosti v nedrah [Optimization of the technological study of ores based on the results of assessing their contrast in the bowels]. *Racional'noe osvoenie neдр* [Rational development of the bowels], 2015, no. 5–6, pp. 45–50. (In Russ.).
5. Pakhomova G. A., Fishchenko Yu. Yu., Terentyeva E. A. K voprosu prognozirovaniya pokazatelej flotacionnogo obogashcheniya po dannym mineralogicheskikh issledovaniy [On the issue of predicting the indicators of flotation enrichment according to mineralogical studies]. *Racional'noe osvoenie neдр*. [Rational development of mineral resources], 2015, no. 5–6, pp. 41–44. (In Russ.).

Информация об авторах

И. Л. Фуреев — аспирант, старший научный сотрудник;

Ю. Н. Нерадовский — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

I. L. Fureev — Graduate Student, Senior Researcher;

Yu. N. Neradovsky — Candidate of geological and mineralogical sciences, Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 17.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.
The article was submitted 17.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.