

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.772

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ ЭВДИАЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ АЗОТНОКИСЛОТНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

В. А. Чантурия, Е. В. Копорулина, В. Г. Миненко, А. Л. Самусев

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: e_koporulina@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

С использованием методов рентгенофазового анализа, аналитической сканирующей электронной микроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой исследовано влияние предварительных энергетических воздействий на преобразования основных минералов эвдиалитового концентрата в процессе азотнокислотного выщелачивания, их микроморфологию и фазовый состав поверхности. Установлено, что предварительная механоактивация концентрата обеспечивает прирост извлечения циркония и суммы оксидов редкоземельных металлов в продуктивный раствор на 34–45 %. Применение при азотнокислотном выщелачивании электрохимической обработки минеральной суспензии и в большей степени ультразвуковых воздействий способствует дополнительному повышению извлечения в продуктивный раствор указанных элементов на 12–23 % за счет очистки поверхности минеральных зерен от аморфных фаз и формирования структурных неоднородностей.

Азотнокислотное выщелачивание, эвдиалитовый концентрат, морфология, фазовый состав, цирконий, редкоземельные металлы, механоактивация, энергетические воздействия

DOI: 10.15372/FTPRPI20190414

Перспективным источником для производства циркония и редкоземельных металлов в России являются эвдиалитовые руды Ловозерского месторождения в Мурманской области. В [1–11] предложены пиро- и гидрометаллургические варианты переработки эвдиалитовых концентратов, основанные на многостадийном разложении кислотами и щелочами. Основные проблемы гидрометаллургической переработки эвдиалита связаны с присутствием в составе значительного количества кремния (40–60 %). При кислотном выщелачивании кремний переходит в раствор в виде кремниевой кислоты, которая подвергается поликонденсации с образованием различных по составу и строению полимеров вплоть до устойчивых гелей, что приводит к уменьшению степени извлечения ценных компонентов, снижению производительности фильтрации и затрудняет дальнейшую переработку растворов методами экстракции и сорбции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10061-П).

Способами решения проблемы переработки высококремниевых руд гидрометаллургическими методами являются предварительная механоактивация и энергетические воздействия. В [12, 13] обоснована и подтверждена высокая эффективность азотнокислотного выщелачивания эвдиалитового концентрата с использованием ультразвуковых воздействий. В [14, 15] изучено влияние различных по характеру воздействий измельчительных аппаратов на кислотное выщелачивание эвдиалита, доказана эффективность предварительной механоактивации и выявлена возможность снижения расхода выщелачивающего агента в 2.0–2.5 раза.

Цель настоящей работы — сравнительное исследование влияния различных методов предварительной механической обработки, энергетических воздействий и их комбинирования на стабильность основных минералов концентрата и эффективность азотнокислотного выщелачивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований выбран эвдиалитовый концентрат Ловозерского ГОКа крупностью – 630 + 63 мкм (97.7%), характеризующийся содержанием оксида циркония 8.34% и суммы оксидов редкоземельных металлов Σ РЗМ 2.5% (рис. 1). Подробный минеральный и химический состав концентрата проанализирован в [12, 13].

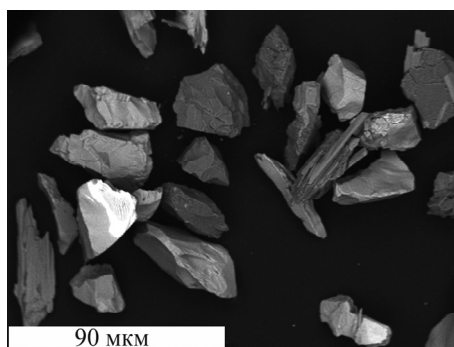


Рис. 1. Внешний вид исходного концентрата

Выщелачивание концентрата проводилось на разработанной в ИПКОН РАН лабораторной установке [14] при ранее отработанных режимах: концентрация азотной кислоты 450 г/дм³, соотношение Т : Ж = 1 : 20, продолжительность выщелачивания 1 ч, температура суспензии 80 °С. Параметры ультразвуковой обработки минеральной суспензии — рабочая частота 22 ± 1.65 кГц, амплитуда механических колебаний 25 ± 5 мкм; электрохимической обработки — анодная плотность тока 200 А/м², объемная плотность тока 1.5 А/дм³ [12, 13].

Стандартное измельчение образцов эвдиалитового концентрата до крупности менее 40 мкм выполнялось в лабораторной барабанно-валковой шаровой мельнице МШЛ-1 при соотношении массы шаров (алюбит) к массе концентрата 6 : 1 продолжительностью 15 мин.

Предварительная механоактивация образцов эвдиалитового концентрата проводилась в планетарной центробежной мельнице марки ЛАИР-0.015 (“МИСиС”). Использовалось сухое активирование при следующих режимах: соотношение массы шаров к массе концентрата 40 : 1, продолжительность предварительной механоактивации 3 мин, ускорение планетарно-центробежной мельницы 25g. Выбор данного режима обоснован исследованиями [15].

Суспензию после выщелачивания фильтровали, остаток концентрата промывали дистиллированной водой и сушили. Состав остатка анализировали масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой методом ИСП-МС (ICPE-9000, Shimadzu). Рентгенофазовый анализ (РФА) концентрата выполнялся на дифрактометре АДП-2 (НПО “Буревестник”), $\text{CoK}\alpha$ излучение. Идентификация фаз проводилась путем сравнения экспериментальных и рассчитанных спектров минералов с использованием кристаллографической базы данных неорганических соединений ICSD. Микроморфологию и элементный анализ минералов концентрата исследовали методом аналитической сканирующей электронной микроскопии АСЭМ (LEO 1420VP, Carl Zeiss).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее при описании исходного концентрата отмечалось присутствие зерен эвдиалита различных оттенков розового, а также коричневато-оранжевых [12]. Окраска минерала связана с его сложным, крайне разнообразным составом и широким спектром возможных изоморфных замещений в различных позициях кристаллической структуры [17–19]. В [19] установлено, что малиновые разновидности характеризуются преобладанием щелочей над кальцием, повышенным содержанием марганца, редкоземельных элементов, ниобия и тантала. Ярко-розовый цвет присущ образцам с более высоким содержанием редкоземельных оксидов и стронция [18]. Смена малиновой (розовой) окраски минерала на коричневатую, бурую или оранжевую связана с возникновением точечного центра окраски, который обусловлен незначительным смещением атома Fe^{2+} в структуре эвдиалита из стандартного положения и, как следствие, изменением его координационного многогранника в виде квадрата на полуоктаэдр [20]. Результаты изучения состава эвдиалитов из выделенных в исследуемом концентрате цветовых групп приведены в табл. 1. Помимо перечисленных элементов, анализировались Y, Sr и F, содержания которых не превышали величины ошибки метода. Химический состав зерен различной окраски позволяет предположить, что именно с наличием этого дефекта кристаллической структуры, а не с изменением состава минерала связана окраска выделенных оранжевых зерен.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав выделенных из концентрата эвдиалитов

Элемент, мас. %	Оранжевое прозрачное	Оранжевое прозрачное	Оранжевое прозрачное	Розовато-оранжевое мутноватое	Розовое мутное	Розовое прозрачное
Nb_2O_5	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO_2	54.21	53.40	52.81	55.84	55.85	53.43
TiO_2	0.60	0.66	1.02	0.70	0.86	0.64
ZrO_2	14.37	14.37	14.78	16.28	12.58	14.64
La_2O_3	0.39	0.29	0.40	0.39	0.30	0.25
Ce_2O_3	0.73	0.66	1.04	0.77	0.92	0.67
Nd_2O_3	0.34	0.31	0.36	0.00	0.36	0.33
CaO	6.72	6.23	6.51	5.73	7.63	6.47
MnO	2.45	2.27	2.47	2.33	3.82	1.89
FeO	3.80	3.60	5.93	3.17	4.38	3.96
Na_2O	13.45	15.81	12.87	12.42	10.88	15.21
K_2O	0.30	0.39	0.34	0.32	0.41	0.28
Cl	1.44	1.41	1.15	1.53	1.05	1.49
ΣРЗМ	1.46	1.26	1.80	1.16	1.58	1.25
Сумма	99.60	99.40	99.68	99.48	99.04	99.26

Согласно данным рентгенофазового анализа, наиболее сильные рефлексы на дифрактограмме исходного неизмельченного концентрата принадлежат эвдиалиту ISCD # 23643 как преобладающей фазе; более низкими интенсивностями характеризуются пики примесных минералов: эгирина ISCD # 156559, нефелина ISCD # 2937 и полевых шпатов (альбита ISCD # 9830 и анортита ISCD # 654). Дифракционные пики выделенных фаз в основном острые и четко выраженные. Уширение ряда из них, особенно в центральной части спектра, связано с суперпозицией дифракционных линий от составляющих концентрат минералов (рис. 2). Зафиксированные при минералогическом анализе концентрата [12, 13] лампрофиллит и лопарит присутствуют в меньших количествах и из-за отмеченного наложения диагностических пиков не поддаются однозначной идентификации.

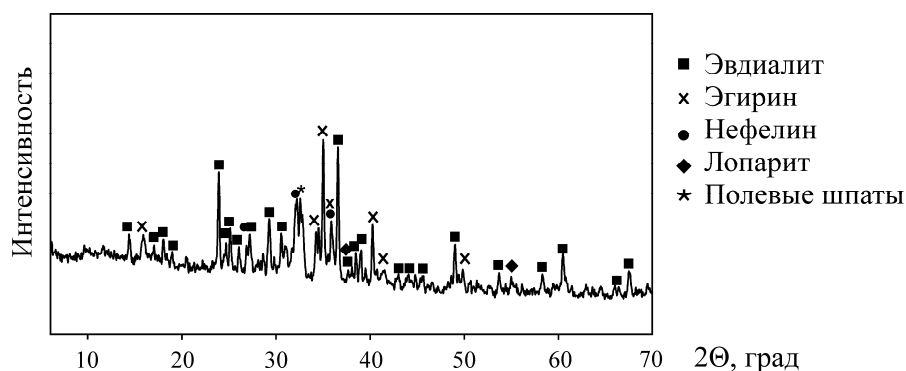


Рис. 2. Дифрактограмма исходного концентрата

По данным АСЭМ установлено, что после экспериментов по кислотному выщелачиванию большинство зерен эвдиалита исходного неизмельченного концентрата покрыто осадком силикатного геля, количество которого уменьшается при использовании энергетических методов обработки суспензии, главным образом ультразвука (рис. 3в). Частицы минералов, слабо растворимых в азотной кислоте (эгирина, полевых шпатов, лопарита), выглядят морфологически неизменными после всех режимов обработки.

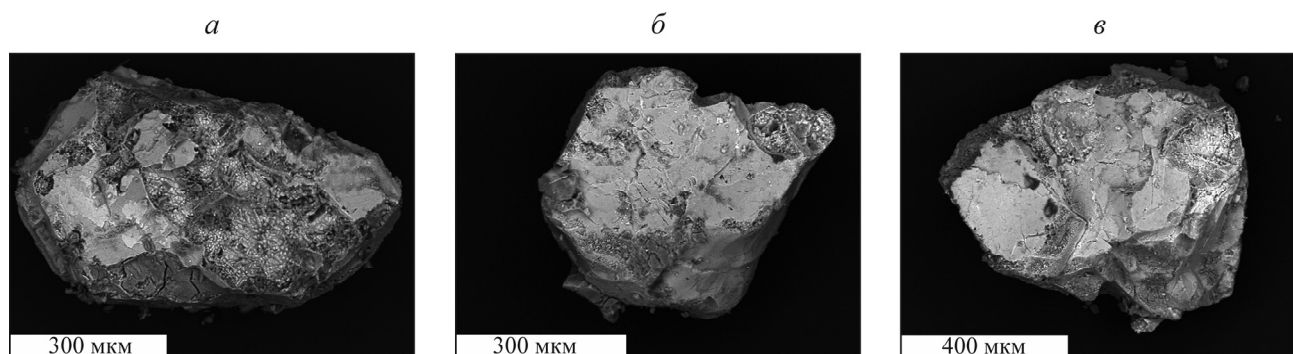


Рис. 3. Внешний вид проб исходной крупности: а — после выщелачивания; б, в — после выщелачивания с электрохимической и ультразвуковой обработкой

Полученные данные подтверждаются результатами рентгенофазового анализа. Анализ профиля рентгендифракционных спектров позволяет судить о степени преобразования материала в результате различного рода воздействий. На рентгенограммах проб концентрата исходной крупности после выщелачивания при всех режимах наблюдается снижение интенсивностей основных диагностических пиков эвдиалита, свидетельствующее о его частичном растворении,

с одновременным увеличением интенсивностей рефлексов полевых шпатов, эгирина и лопарита (рис. 4, спектры 2–4). Проявляющееся диффузное гало (плавный пологий подъем фона в области малых углов рентгенограммы) подтверждает наличие в пробе аморфного материала, т. е. силикатного геля. Наиболее ярко эти закономерности проявляются в пробах после выщелачивания с ультразвуковой обработкой (рис. 4, спектр 4).

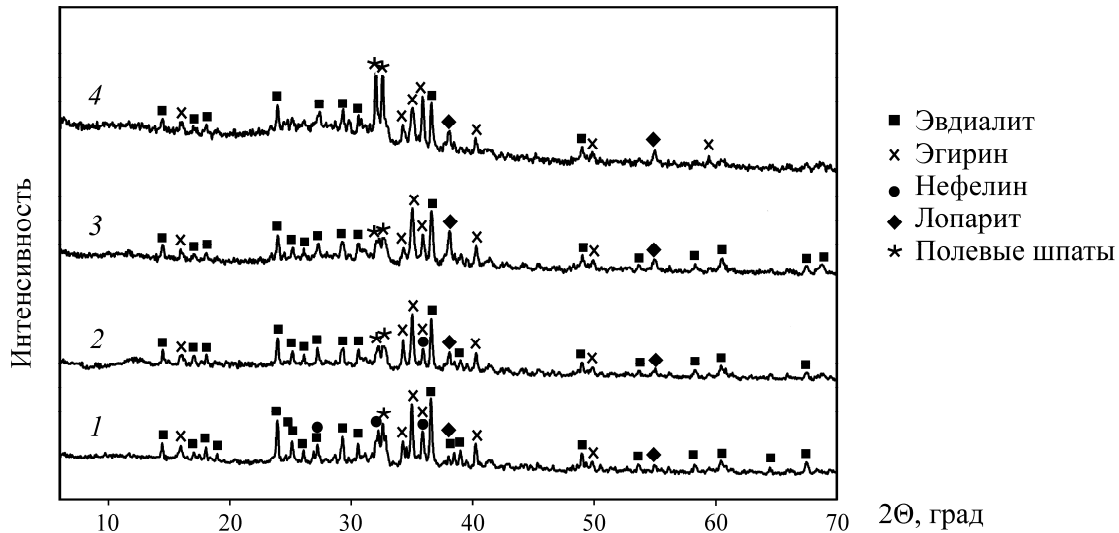


Рис. 4. Дифрактограммы проб исходной крупности: 1 — исходная; 2 — после выщелачивания; 3, 4 — после выщелачивания с электрохимической и ультразвуковой обработкой

Из-за значительной хрупкости минералов эвдиалита и лампрофиллита измельчение исходного концентрата в лабораторной мельнице привело к получению достаточно разнородного по крупности материала –40+0 мкм с большим содержанием тонкой фракции –10+0 мкм (рис. 5а). Основные изменения состава и морфологии минералов, установленные после экспериментов по выщелачиванию проб данного класса крупности, сопоставимы с отмеченными ранее для неизмельченного концентрата. После контакта с раствором азотной кислоты зерна эвдиалита сохраняют свою исходную форму, а их изначально остроугольные очертания сглаживаются вследствие процессов растворения, а также формирования слоя силикатного геля (рис. 5б). Выщелачивание с энергетическими воздействиями приводит к формированию неоднородной, морфологически сложной поверхности зерен за счет растрескивания различной интенсивности вновь образованной корки силикатного геля (рис. 5в, г).

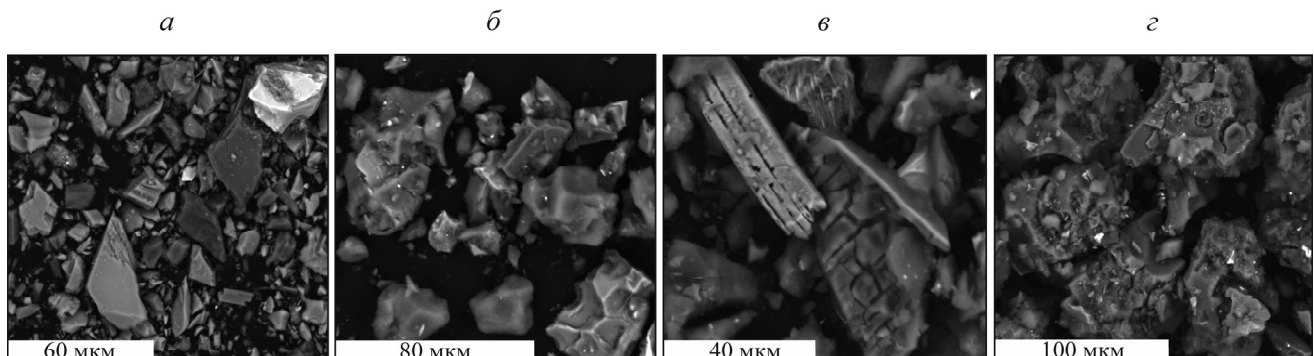


Рис. 5. Внешний вид проб, измельченных стандартным способом: а, б — до и после выщелачивания; в, г — после выщелачивания с электрохимической и ультразвуковой обработкой

Дифрактограммы проб после измельчения в лабораторной мельнице и выщелачивания в различных режимах, как и в случае исходного концентрата, свидетельствуют о наиболее интенсивном выщелачивании материала при ультразвуковых воздействиях (рис. 6, спектр 4).

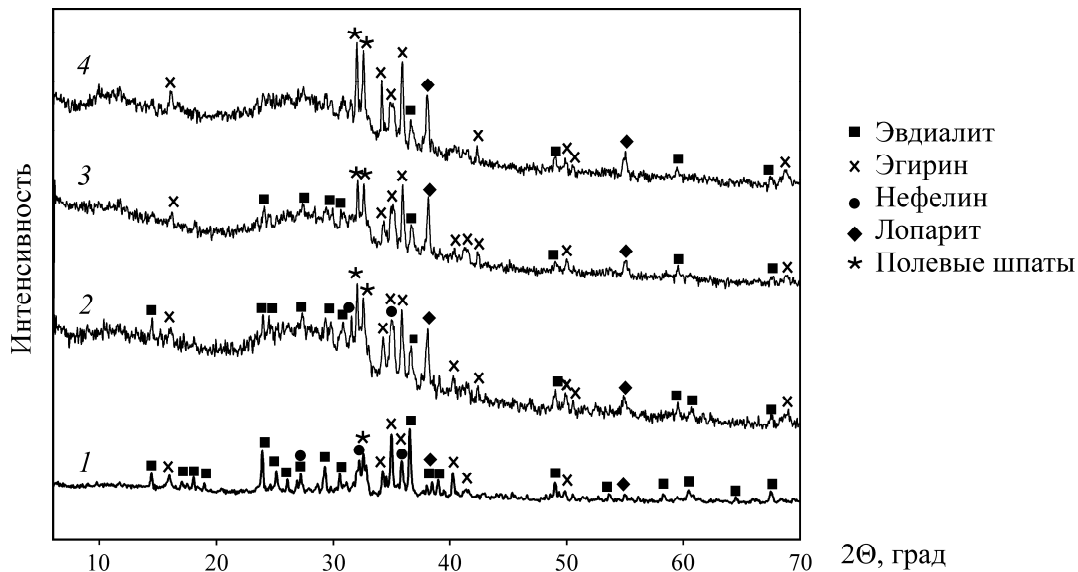


Рис. 6. Дифрактограммы проб измельченных стандартным способом: 1 — исходная; 2 — после выщелачивания; 3, 4 — после выщелачивания с электрохимической и ультразвуковой обработкой

Рентгеновские спектры проб концентрата после механоактивации характеризуются повышенным фоном, характерным гало в области малых углов, а также существенным уширением основных диагностических пиков минералов. Это свидетельствует о частичной рентгеновской аморфизации материала концентрата вследствие уменьшения размера частиц и, следовательно, областей их когерентного рассеяния (рис. 7, спектр 2). Параллельно со сглаживанием пиков основных фаз концентрата и уменьшением их абсолютных интенсивностей более четкими становятся пики лопарита, не столь очевидно проявленные в спектрах исходного образца.

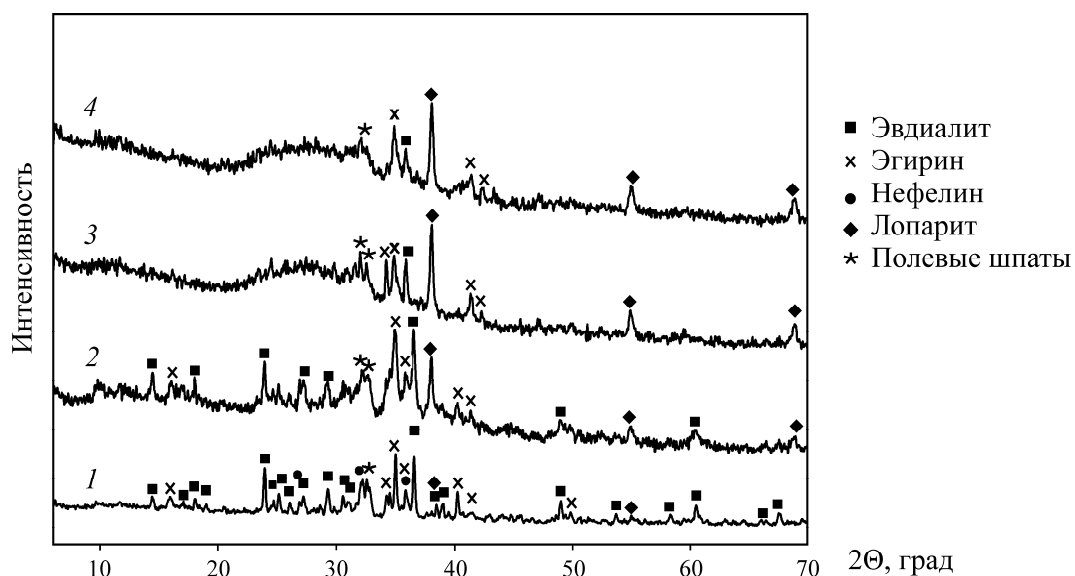


Рис. 7. Дифрактограммы проб после механоактивации: 1 — исходная; 2 — после механоактивации; 3 — после выщелачивания; 4 — после выщелачивания с ультразвуковой обработкой

Электронно-микроскопические изображения подтверждают уменьшение размеров подавляющего большинства зерен до долей микрона (рис. 8а).

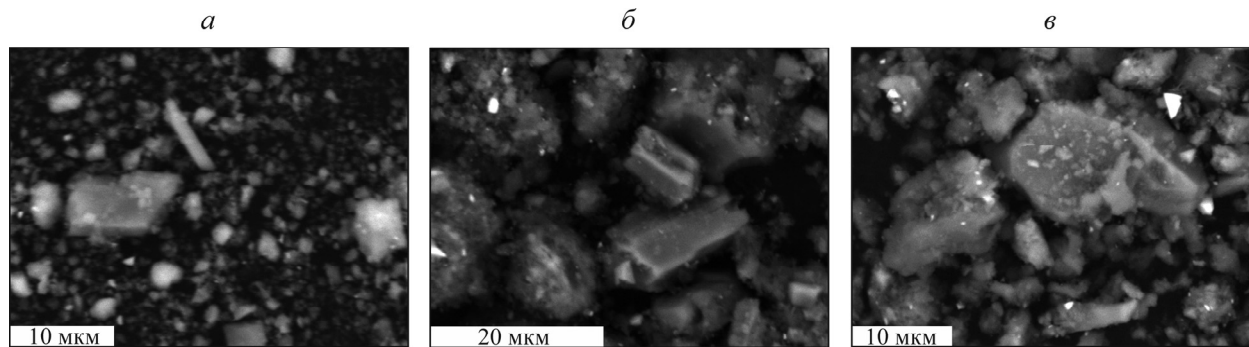


Рис. 8. Внешний вид проб после механоактивации: а, б — до и после выщелачивания; в — после выщелачивания с ультразвуковой обработкой

На рентгенограммах проб концентрата после выщелачивания с предварительной механоактивацией отмечается существенное снижение интенсивностей пиков эвдиалита и нефелина, подтверждающее их активное растворение. Для эгирина и минералов группы полевых шпатов эти изменения менее заметны, а острые, хорошо выраженные пики лопарита указывают на его высокую устойчивость (рис. 7, спектр 3).

После выщелачивания с ультразвуковой обработкой материала, предварительно подвергнутого механоактивации, на рентгенограммах практически полностью исчезают диагностические пики эвдиалита и нефелина, и доминирующее значение приобретает фаза, сохраняющая максимальную кристалличность — лопарит, при подчиненном содержании эгирина и полевых шпатов (рис. 7, спектр 4). Интенсивное гало на рентгенограммах свидетельствует о присутствии большого количества аморфной фазы. В отличие от рентгеноаморфного материала, содержащегося в пробах после механоактивации, не растворившийся в ходе выщелачивания материал обогащен силикатным гелем — истинно аморфным продуктом разложения минералов концентрата. Морфологически большинство частиц осадка сильно изменены и покрыты плотным слоем переотложенных продуктов выщелачивания. Исключение составляют отдельные зерна эгирина, сохраняющие свой игольчато-призматический габитус (рис. 8в).

Определение точного фазового состава продуктов выщелачивания в силу их высокой рентгеноаморфности затруднительно. Размер частиц не позволяет использовать для диагностики аналитические методы сканирующей электронной микроскопии. При выщелачивании эвдиалитового концентрата раствором NaOH в [15] на основании термодинамических расчетов предсказано и подтверждено экспериментально сосуществование в продуктах выщелачивания цирконосиликатов Na с различной стехиометрией и сопутствующих минералов (эгирина, альбита и анортита). Режимы кислотного выщелачивания, используемые в настоящей работе, позволяют предполагать иной набор вторичных фаз. По всей вероятности, они представлены тонкой смесью из силикатных гелей различной степени гидратированности, с захваченными микронными частицами кислотоупорных минералов (эгирина, лопарит, полевые шпаты), продуктами гидролиза солей алюминия, а также различными сорбированными из раствора ионами редких, щелочных и щелочноземельных элементов и сложными ионными группировками, такими как $\{[\text{Nb}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{OH})_2\}^{3+}$, $[\text{Zr}(\text{NO}_3)_6]_2$, $[\text{Zr}(\text{OH})_2]^{2+}$, $[\text{NaSiO}_3]^-$ и др.

В табл. 2 представлены результаты ИСП-МС анализа осадка выщелачивания концентрата в зависимости от вида механической обработки и энергетических воздействий. Использование электрохимической обработки при выщелачивании концентрата исходной крупности позволяет на 3.6–5.1 % повысить извлечение циркония и суммы оксидов редкоземельных металлов с 12.5 и 18.2 % до 17.6 и 21.8 % соответственно, что обусловлено уменьшением количества силикатного геля на поверхности зерен. Ультразвуковая обработка суспензии приводит к более полной очистке поверхности зерен эвдиалита и резко увеличивает извлечение суммы оксидов редкоземельных металлов и циркония на 28.9–43.9 % с 18.2 и 12.5 % до 47.1 и 56.4 % соответственно.

ТАБЛИЦА 2. Зависимость извлечения циркония и суммы оксидов редкоземельных металлов от вида механической обработки и энергетических воздействий

Вид обработки	Энергетические воздействия	Извлечение, %	
		Zr	∑РЗМ
Б.о.	Б.о.	12.5	18.2
Б.о.	Электрохимическая обработка	17.6	21.8
Б.о.	Ультразвуковая обработка	56.4	47.1
Стандартное измельчение	Б.о.	53.4	52.3
Стандартное измельчение	Электрохимическая обработка	75.8	64.8
Стандартное измельчение	Ультразвуковая обработка	76.8	68.5
Механоактивация	Б.о.	57.4	53.2
Механоактивация	Ультразвуковая обработка	53.8	47.5

Примечание. Б.о. — выщелачивание без предварительной механической обработки и/или без энергетических воздействий

Измельчение концентрата в шаровой мельнице до крупности менее 40 мкм и последующее азотнокислотное выщелачивание приводит к увеличению уровня извлечения ∑РЗМ и циркония на 34.1–40.9 % с 18.2 и 12.5 % до 52.3 и 53.4 % соответственно. Отмеченное растрескивание корки силикатного геля на поверхности зерен при использовании энергетических воздействий повышает извлечение ценных компонентов, причем максимальные значения достигаются при ультразвуковой обработке и составляют для циркония 75.8–76.8, для ∑РЗМ — 64.8–68.5 %.

Предварительная механоактивация эвдиалитового концентрата также приводит к резкому увеличению уровня извлечения ∑РЗМ и циркония на 35.0–44.9 % с 18.2 и 12.5 % до 53.2 и 57.4 % соответственно. Ультразвуковая обработка в процессе выщелачивания проб после механоактивации на 3.6–5.7 % снижает уровень извлечения указанных элементов с 57.4 и 53.2 % до 53.8 и 47.5 % соответственно, что, скорее всего, связано присутствием большого количества аморфной фазы, сорбирующей из раствора ионы и ионные группировки.

ВЫВОДЫ

С использованием методов РФА, АСЭМ и ИСП-МС проведено сравнительное исследование влияния различных видов предварительной механической обработки и энергетических воздействий в процессе азотнокислотного выщелачивания эвдиалитового концентрата на изменение его фазового состава, структурное состояние и микроморфологию составляющих минералов. Установлено, что наиболее эффективным методом интенсификации азотнокислотного выщелачивания эвдиалитового концентрата является комбинирование процессов предварительного измельчения концентрата до 40 мкм с ультразвуковой обработкой суспензии в про-

цессе выщелачивания. Это обеспечивает как существенное увеличение удельной поверхности эвдиалита без его переизмельчения, так и очистку зерен от аморфных фаз (силикатного геля) и формирование дополнительных неоднородностей и дефектов на минеральных поверхностях, способствующих более активному растворению.

Ввиду значительных капитальных и эксплуатационных затрат на измельчение концентрата, целесообразно проведение выщелачивания в 2–3 стадии с использованием только ультразвуковых воздействий, которые не только интенсифицируют процесс, но и предотвращают образование силикатного геля в продуктивном растворе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захаров В. И., Скиба Г. С., Соловьев А. В., Лебедев В. Н., Майоров Д. В.** Некоторые аспекты кислотной переработки эвдиалита // Цв. металлы. — 2011. — № 11. — С. 25–29.
2. **Лебедев В. Н.** Сернокислотная технология эвдиалитового концентрата // ЖПХ. — 2003. — Т. 76. — № 10. — С. 1601–1605.
3. **Лебедев В. Н., Щур Т. Е., Майоров Д. В., Попова Л. А., Серкова Р. П.** Особенности кислотного разложения эвдиалита и некоторых редкометалльных концентратов Кольского полуострова // ЖПХ. — 2003. — Т. 76. — № 8. — С. 1233–1237.
4. **Захаров В. И., Воскобойников Н. Б., Скиба Г. С., Соловьев А. В., Майоров Д. В., Матвеев В. А.** Разработка солянокислотной технологии комплексной переработки эвдиалита // Зап. Горн. ин-та. — 2005. — Т. 165. — С. 83–85.
5. **Davris P., Stopic S., Balomenos E., Pnias D., Paspaliaris I., and Friedrich B.** Leaching of rare earth elements from eudialyte concentrate by suppressing silica gel formation, *J. Min. Eng.*, 2017, Vol. 108. — P. 115–122.
6. **Johnsen O., Ferraris G., Gault R., Grice J., Kampf A., and Pekov I.** The nomenclature of eudialyte-group minerals, *Canadian Mineralogist*, 2003, Vol. 41. — P. 785–794.
7. **Богатырева Е. В., Чуб А. В., Ермилов А. Г., Хохлова О. В.** Эффективность щелочно-кислотного способа комплексного выщелачивания эвдиалитового концентрата. Ч. 1 // Цв. металлы. — 2018. — № 7. — С. 57–61.
8. **Богатырева Е. В., Чуб А. В., Ермилов А. Г., Хохлова О. В.** Эффективность щелочно-кислотного способа комплексного выщелачивания эвдиалитового концентрата. Ч. 2 // Цв. металлы. — 2018. — № 8. — С. 69–74.
9. **Jha M. K., Kumari A., Panda R., Kumar J. R., Yoo K., and Lee J. Y.** Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals, *Hydrometallurgy*, 2016, Vol. 165. — P. 2–26.
10. **Ma Y., Stopic S., Gronen L., and Friedrich B.** Recovery of Zr, Hf, Nb from eudialyte residue by sulfuric acid dry digestion and water leaching with H₂O₂ as a promoter, *Hydrometallurgy*, 2018, Vol. 181. — P. 206–214.
11. **Ma Y., Stopic S., Gronen L., Milivojevic M., Obradovic S., and Friedrich B.** Neural network modeling for the extraction of rare earth elements from eudialyte concentrate by dry digestion and leaching, *Metals*, 2018, Vol. 8, Issue 4. — 267 p.
12. **Chanturia V. A., Minenko V. G., Samusev A. L., Chanturia E. L., and Koporulina E. V.** The mechanism of influence exerted by integrated energy impacts on intensified leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate, *J. Min. Sci.*, 2017, Vol. 53, No. 5. — P. 890–896.
13. **Chanturia V. A., Minenko V. G., Samusev A. L., Ryazantseva M. V., and Koporulina E. V.** Influence exerted by ultrasound processing on efficiency of leaching, structural, chemical, and morphological properties of mineral components in eudialyte Concentrate, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, Issue 2. — P. 285–291.

14. Пат. 2674183 РФ, МПК С22В 3/02, С22В 3/04. Устройство для выщелачивания концентратов цветных, редких и редкоземельных металлов / В. А. Чантурия, Е. Л. Чантурия, В. Г. Миненко, А. Л. Самусев // Опубл. в БИ. — 2018. — № 34.
15. Хохлова О. В. Повышение эффективности щелочно-кислотного способа комплексного выщелачивания эвдиалитового концентрата: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2018. — 167 с.
16. Чижевская С. В., Поветкина М. В., Чекмарев А. М., Аввакумов Е. Г. Влияние механической активации на процесс разложения цирконосиликатов минеральными кислотами // Химия в интересах устойчивого развития. — 1998. — Т. 6. — С. 199–205.
17. Расцветаева Р. К. Структурная минералогия группы эвдиалита. Обзор // Кристаллография. — 2007. — Т. 52. — № 1. — С. 50–67.
18. Тарханов А. В., Курков А. В., Ильин А. К. Перспективы освоения комплексных редкометалльно-редкоземельных эвдиалитовых руд Ловозерского месторождения // Горн. журн. — 2012. — № 4. — С. 54–56.
19. Свешникова Е. В., Бурова Т. А. Минералы группы эвдиалита и катаплеит из нефелиновых сиенитов Енисейского кряжа // Труды Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. — 1965. — Вып. 16. — С. 187–197.
20. Боруцкий Б. Е. Очерки по фундаментальной и генетической минералогии. Минералы переменного состава с переменной структурой и проблемы видообразования в минералогии. Эвдиалит-эвколиты // Новые данные о минералах. — 2008. — Вып. 43. — С. 149–174.

Поступила в редакцию 17/V 2019

После доработки 17/V 2019

Принята к публикации 03/VII 2019