

УДК 622.777.778

РАЗДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ЭВДИАЛИТСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ
НА МАГНИТНОМ СЕПАРАТОРЕ В ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПУЛЬПЕ

Г. П. Андронов¹, И. Б. Захарова¹, Н. М. Филимонова¹,
В. В. Львов², Т. Н. Александрова²

¹Горный институт КНЦ РАН, E-mail: andronov@goi.kolasc.net.ru
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

²Национальный минерально-сырьевой университет "Горный",
В. О. 21-линия, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследований по разделению минералов эвдиалитсодержащей руды с низкой магнитной восприимчивостью на высокоинтенсивном мокром магнитном сепараторе в пульсирующей пульпе. Установлены оптимальные параметры сепаратора: индукция магнитного поля, пульсация пульпы и диаметр наполнителя матрицы, при которых обогащение руды наиболее эффективно.

Магнитная сепарация, магнитная индукция, частота пульсации пульпы, диаметр стержня матрицы, эвдиалитовый концентрат, нефелин-полевошпатовый продукт, эгириновый продукт

Исследования по разделению минералов магнитной сепарацией выполнены на пробе эвдиалитсодержащей руды (рис. 1). Основу руды составляют четыре минерала, два из которых (эгирин и эвдиалит) обладают низкой магнитной восприимчивостью, а у нефелина и полевого шпата магнитная восприимчивость близка к 0 (таблица).

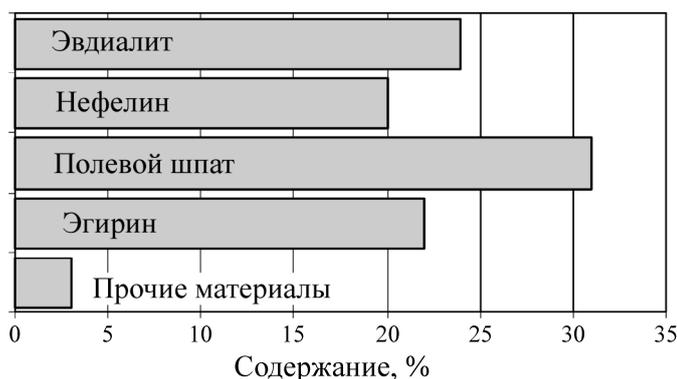


Рис. 1. Минеральный состав руды

Содержание в руде $Fe_{\text{общ}}$ составляет 4.4%, ZrO_2 — 3.6%. Основная часть — 85% $Fe_{\text{общ}}$ руды связана с эгирином и 15% с эвдиалитом. Диоксид циркония относится к эвдиалиту, содержание в минерале составляет 13.8%. Возможно наличие минимального количества до 0.7% ZrO_2 в качестве изоморфной примеси в эгирине.

Магнитная восприимчивость минералов

Минерал	Формула	Содержание Fe _{общ} , %	Удельная магнитная восприимчивость χ , м ³ /кг·10 ⁻⁶
Эгирин	NaFe ³⁺ Si ₂ O ₆	17.3	47.0
Эвдиалит	Na ₁₅ Ca ₆ Fe ₃ Zr ₃ Si(Si ₂₅ O ₇₃) (O, OH, H ₂ O) ₃ (Cl, OH) ₂	2.7	11.6
Полевой шпат	(K, Na) [AlSi ₃ O ₈]	—	–1.0 до10
Нефелин	NaAlSiO ₄	—	–1.0 до10

Исследования по обогащению данных типов руд и близких к ним проводили ранее с помощью магнитных методов обогащения, а также гравитационных и флотационных [1–13]. Контрастность минералов в магнитных свойствах предопределяет разделение руды на магнитном сепараторе с получением трех продуктов: эгиринового, эвдиалитового и полевошпат-нефелинового.

Здесь представлены результаты исследований по обогащению руды, выполненные на высокоинтенсивном мокром магнитном сепараторе SLon 100 (Outotec) (рис. 2а). Отличительная особенность сепаратора состоит в применении стержневых матриц с расположением стержней в шахматном порядке, а также в использовании мембранного устройства для создания пульсации пульпы при обогащении (рис. 2б).

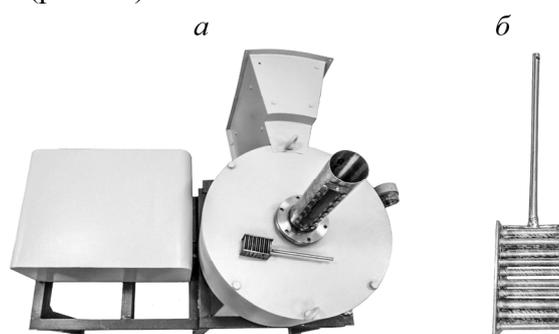


Рис. 2. Сепаратор “SLon 100” (а) и стержневая матрица (б)

Проведены исследования по влиянию переменных параметров: магнитной индукции (0.2–1.2 Тл), пульсации пульпы (50–300 мин⁻¹), диаметра стержней матрицы (1–1.5 мм) на показатели обогащения руды. Первая стадия магнитной сепарации осуществлена при максимальной индукции магнитного поля (1.2 Тл) с целью выделения в немагнитный продукт минералов нефелина и полевого шпата, имеющих минимальную магнитную восприимчивость. Выход магнитного и немагнитного продукта сепарации в зависимости от диаметра стержней матрицы и пульсации пульпы представлен на рис. 3.

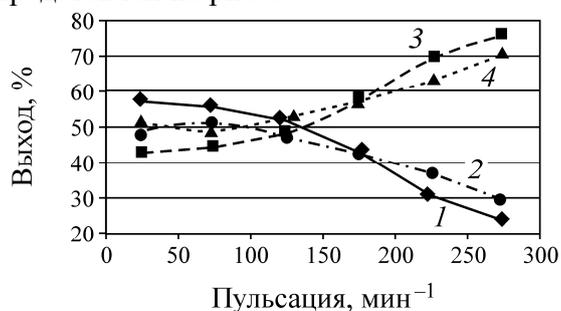


Рис. 3. Зависимость выхода продуктов магнитной сепарации от диаметра наполнителя матрицы: 1 — магнитный продукт (матрица 1.5); 2 — магнитный продукт (матрица 1.0); 3 — немагнитный продукт (матрица 1.5); 4 — немагнитный продукт (матрица 1.0)

При частоте пульсации пульпы 300 мин^{-1} отмечен максимальный выход немагнитной фракции (диаметр стержня матрицы 1.5 мм). Анализ содержания $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и ZrO_2 в продуктах сепарации показал, что в магнитном продукте с увеличением частоты пульсации содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ увеличивается примерно в 2 раза с 5.8 до 11.2 % (диаметр стержней 1.5 мм), при этом содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в немагнитном продукте уменьшается с 3.8 до 2.4 % (рис. 4).

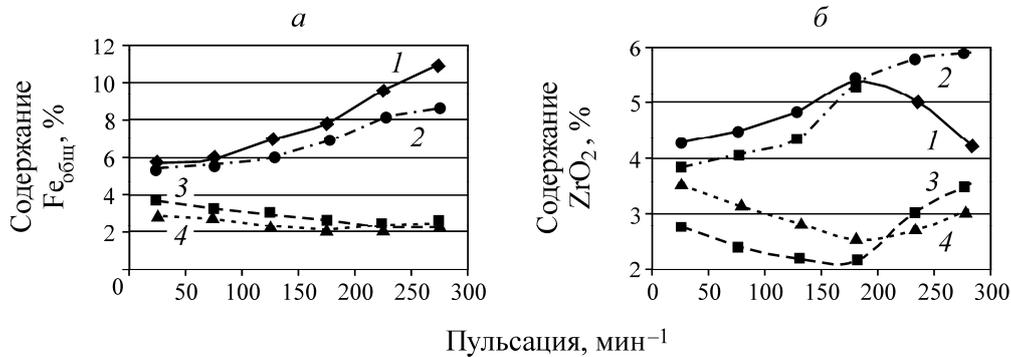


Рис. 4. Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (а) и ZrO_2 (б) в продуктах магнитной сепарации: 1, 2 — магнитный продукт (матрица с диаметром стержня 1.5 и 1.0 мм соответственно); 3, 4 — немагнитный продукт (матрица с диаметром стержня 1.5 и 1.0 мм соответственно)

Эвдиалит, как слабо магнитный минерал, должен концентрироваться в магнитном продукте совместно с эгирином. С увеличением пульсации при диаметре стержня матрицы 1.0 мм наблюдается увеличение содержания ZrO_2 в магнитном продукте с 3.8 до 6.0%. При пульсации пульпы $200\text{--}300 \text{ мин}^{-1}$ осуществляется вымывание эвдиалита в немагнитный продукт. Анализ распределения $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и ZrO_2 по продуктам сепарации показал, что оптимальное извлечение $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (эгирин) 75 % в магнитный продукт происходит при частоте $120\text{--}170 \text{ мин}^{-1}$, в немагнитный — 25 % (матрица с диаметром стержня 1.5 мм) (рис. 5).

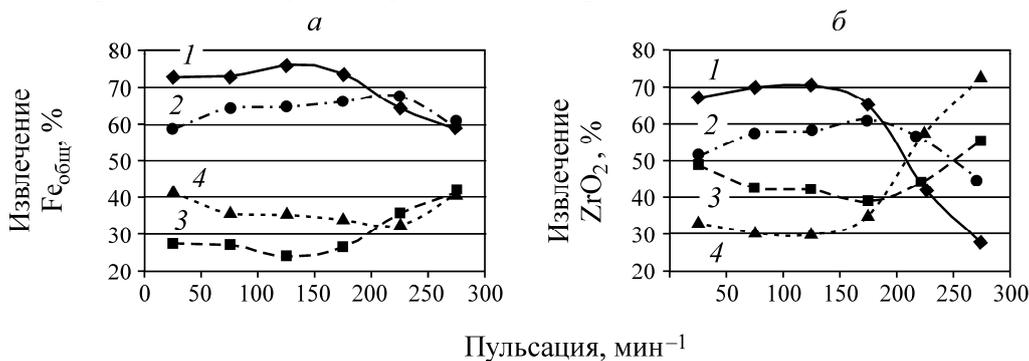


Рис. 5. Извлечение $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (а) и ZrO_2 (б) в продукты магнитной сепарации: 1, 2 — магнитный продукт (матрица с диаметром стержня 1.5 и 1.0 мм соответственно); 3, 4 — немагнитный продукт (матрица с диаметром стержня 1.5 и 1.0 мм соответственно)

Наиболее высокая степень концентрации ZrO_2 в магнитный продукт появляется при пульсации пульпы 300 мин^{-1} , если рассматривать процесс сепарации относительно эвдиалита. Извлечение ZrO_2 в магнитный продукт 73 % (кривая 4), в немагнитный — 27%. В зависимости от акцента при выделении эгирина или эвдиалита из данного типа руд можно устанавливать определенные параметры сепарации.

С целью снижения потерь эгирина и эвдиалита с “белоцветными” минералами, а также получения более качественного нефелин-полевошпатового продукта выполнена перечистная операция немагнитного продукта I стадии магнитной сепарации при более низком значении индукции магнитного поля (1.0 Тл) (рис. 6). В результате магнитной сепарации получен нефелин-полевошпатовый продукт с содержанием 1.09 % $Fe_{общ}$ и 1.04 % ZrO_2 .

γ — выход продукта, %

β_{ZrO_2} — содержание ZrO_2 , %

ε_{ZrO_2} — извлечение ZrO_2 , %

$\beta_{Fe_{общ}}$ — содержание $Fe_{общ}$, %

$\varepsilon_{Fe_{общ}}$ — извлечение $Fe_{общ}$, %

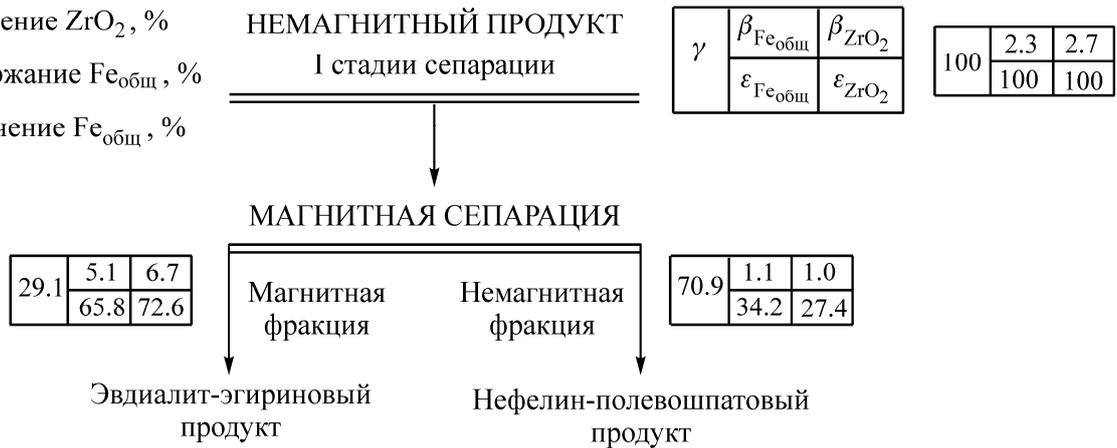


Рис. 6. Магнитная сепарация (перечистная операция немагнитного продукта)

Исследования по разделению эвдиалит-эгиринового продукта (магнитного продукта I стадии сепарации) проведены на сепараторе при постоянной частоте пульсации пульпы 250 мин^{-1} и диаметре стержня матрицы 1.0 мм в зависимости от индукции магнитного поля 0.2–0.4 Тл. В магнитный продукт при магнитной индукции 0.2 Тл на данном сепараторе концентрируется эгирин (содержание $Fe_{общ}$ 11.9%), обладающий наиболее высокой магнитной восприимчивостью (рис. 7). В немагнитном продукте преобладает эвдиалит — содержание ZrO_2 8.1 %.

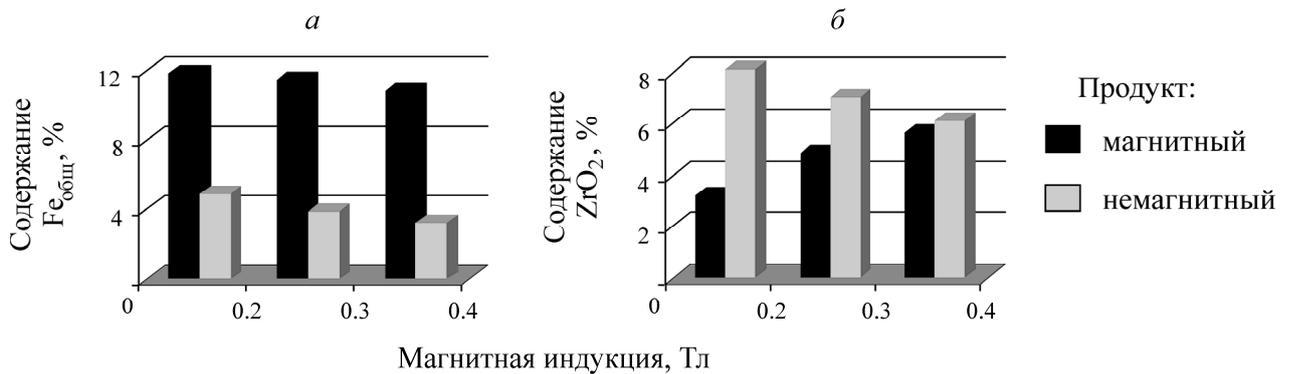


Рис. 7. Содержание $Fe_{общ}$ (а) и ZrO_2 (б)

С увеличением индукции магнитного поля с 0.2 до 0.4 Тл процесс разделения двух минералов сглаживается, отношение содержания $Fe_{общ}$ к содержанию ZrO_2 в магнитном продукте уменьшается с 3.7 до 1.9. Извлечение $Fe_{общ}$ в магнитный продукт (0.4 Тл) достигает максимального значения — 85 %, но при этом извлечение ZrO_2 также увеличивается до 62 % (рис. 8).

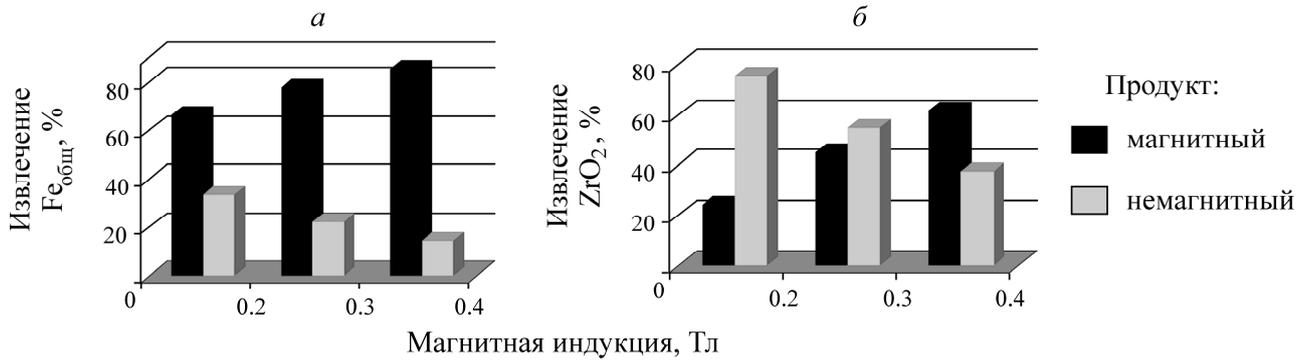


Рис. 8. Извлечение Fe_{общ} (а) и ZrO₂ (б)

На рис. 9 представлена схема проведения операций магнитной сепарации на сепараторе “SLon-100”, в результате которой при разделении эвдиалитсодержащей руды получены следующие продукты:

- нефелин-полевошпатовый с содержанием ZrO₂ и Fe_{общ} ~ 1%, который можно рассматривать как отвальный продукт в случае получения эвдиалитового и эгиринового концентратов;
- эвдиалитовый концентрат (80–85% эвдиалита) с содержанием 10.2% ZrO₂ и 2% Fe_{общ};
- эгириновый продукт (70–80% эгирина) с содержанием 11.8% Fe_{общ} и 1.8% ZrO₂.



Рис. 9. Схема проведения магнитной сепарации

ВЫВОДЫ

Выполнены исследования по обогащению эвдиалитсодержащей руды на высокоинтенсивном мокром магнитном сепараторе в пульсирующей пульпе. Установлено влияние параметров работы сепаратора (индукция магнитного поля, пульсация пульпы и диаметр наполнителя матрицы) на результаты разделения комплекса минералов руды, обладающих низкой магнитной восприимчивостью.

Получены эвдиалитовый и эгириновый концентраты, а также нефелин-полевошпатовый продукт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чипанин И. В.** Исследования по обогащению руд и россыпей некоторых редких металлов // Исследования по обогащению полезных ископаемых. — М.: Госгеолтехиздат, 1961. — С. 104–115.
2. **Найфонов Т. Б., Захарова И. Б.** Исследование флотуемости эвдиалита и основных сопутствующих минералов // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 1974. — № 1. — С. 12–16.
3. **Шведова Т. Ф., Россовская Т. С., Ломтева Г. П.** Влияние особенностей вещественного состава эвдиалитовых руд на оптимальную технологию их переработки // Обогащение редкометаллических руд: сб. науч. тр. — М.: Гиредмет, 1990. — С. 45–47.
4. **Найфонов Т. Б., Белобородов В. И., Захарова И. Б., Зорина Т. А.** Разработка прогрессивной технологии обогащения эвдиалитовых руд // Обогащение руд. — 1991. — № 1. — С. 15–17.
5. **Найфонов Т. Б., Белобородов В. И., Захарова И. Б., Зорина Т. А.** Флотация эвдиалита реагентами на основе фосфорной кислоты // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 1991. — № 3. — С. 23–26.
6. **Кудрин В. С., Чистов Л. Б.** Состояние минерально-сырьевой базы редкоземельных металлов, перспективы её развития и освоения // Минеральные ресурсы России. — 1996. — № 5. — С. 6–12.
7. **Чистов Л. Б., Охрименко В. Е., Юфраков В. А.** Эвдиалитовые руды — новое промышленное сырьё циркония и редкоземельных элементов // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XX веке: сб. науч. тр. — М.: ИПКОН, 1998. — С. 101–110.
8. **Booma de A., Degrez M., Hubaux P., Lucion C.** MSWI boiler fly ashes: Magnetic separation for material recovery, Waste Management, 2011, Vol. 31. — P. 1505–1513.
9. **Тараханов А. В., Курков А. В.** Перспективы освоения комплексных редкометалльно-редкоземельных эвдиалитовых руд Ловозерского месторождения // Горн. журн. — 2012. — № 4. — С. 54–56.
10. **Cieśla A.** Use of the low (LTS) and high (HTS) temperature superconductors in the magnetic separation, Economic comparison, Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), 2011, Vol. 3. — P. 21–24.
11. **Захарова И. Б., Рухленко Е. Д., Андронов Г. П., Вицина Я. В.** Минералого-технологические особенности руды эвдиалитовых лувявритов // IX Конгресс обогатителей стран СНГ: сб. материалов, Т. 1, 26–28 февраля 2013 г. — М.: Изд-во МИСиС, 2013. — С. 255–258.
12. **Chen L., Qian Z., Wen S., Huang S.** High-gradient magnetic separation of ultrafine particles with rod matrix, Mineral Processing & Extractive Metal. Rev., 2013, Vol. 34. — P. 340–347.
13. **Азбель Ю. И., Дмитриев С. В., Львов В. В., Мезенин А. О.** Высокорадиентная магнитная сепарация черновых ильменитовых концентратов // Обогащение руд. — 2014. — № 5. — С. 18–21.

Поступила в редакцию 21/VII 2016