

УДК 546.28'621'82'88

Нечаев А.В.<sup>1</sup>, Поляков Е.Г.<sup>1</sup>, Кардаполов В.А.<sup>2</sup>, Копарулина Е.С.<sup>2</sup> (1 — АО «ГК «Русредмет», Санкт-Петербург, 2 — АО «ЧМЗ», Глазов)

### ЛОПАРИТ И ЭВДИАЛИТ В ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

*Рассмотрены задачи, связанные с проблемой освоения минерально-сырьевой базы редких, в т.ч. редкоземельных металлов РФ и способы решения некоторых из них на Чепецком механическом заводе. Показана перспективность одновременной переработки лопарита и эвдиалита из Ловозерской группы месторождений для достижения ряда заданных показателей по производству танталовой, ниобиевой и редкоземельной продукции. **Ключевые слова:** развитие промышленности редких металлов, лопарит, эвдиалит, тантал, ниобий, цирконий, РЗМ.*

Nechaev A.V.<sup>1</sup>, Polyakov E.G.<sup>1</sup>, Kardapolov V.A.<sup>2</sup>, Koparulina E.S.<sup>2</sup> (1 — GC «Rusredmet», St. Petersburg, 2 — «CHMZ», Glazov)

### LOPARITE AND EUDIALYTE IN PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF CHEPETSKY MECHANICAL PLANT

*Aims declared in the «Strategy of development of the rare and rare earth metals industry in Russian Federation till 2035» as well as ways to execute some of them in Chepetsky mechanical plant are considered. Processing of both loparite and eudialyte from Lovozero deposits was demonstrated as the most efficient way to reach defined indices relating to tantalum, niobium, zirconium and RE production. **Keywords:** development of the rare and rare earth metals industry, loparite, eudialyte, tantalum, niobium, zirconium, REE.*

В последнее время на совещаниях различного уровня, конференциях и в профессиональных публикациях всесторонне обсуждается проблема освоения отечественной минерально-сырьевой базы редких металлов и использования получаемой продукции [1]. В текущий период эксплуатируется лишь одно Ловозерское месторождение с производством лопаритового концентрата, который перерабатывается на Соликамском магниевом заводе с получением окислов титана, ниобия, тантала и редких земель. Существенное увеличение производства РЗМ возможно за счет наращивания добычных мощностей Ловозерского ГОКа и освоения месторождений Зашихинское (колумбит) и Томторское (монацит, пирохлор, крандаллит). На Зашихинском объекте планируется около 1 тыс. т феррониобия [2] на Томторском — порядка 10 тыс. т того же ферросплава [3].

Однако, в отличие от колумбита, в составе томторской руды нет ни одного компонента, на который можно было бы отнести издержки производства пентаоксида ниобия, поэтому произведенный из него феррониобий будет неконкурентоспособен в сравнении с бразильским [4]. Из редких земель месторождения Томтор планируют производить в форме оксидов 3 500 т/г дидима (смесь неодима и празеодима в природном соотношении) и 2 500 т (по оксидам) концентрата среднетяжелой группы РЗЭ [3]. Для гидрометаллургической переработки природного концентрата Томтора в г. Краснокаменск предполагается построить горно-металлургический комбинат (КГМК) с пуском его в 2025 г.

Развитие производства тантала планируется осуществить за счет доведения переработки лопаритового концентрата (ЛК) до 24 000 т/г и колумбита Зашихинского месторождения (200 т/г Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Колумбитовый и цирконовый концентраты Зашихинского месторождения планируется перерабатывать на химико-металлургическом заводе в г. Краснокаменск, пуск которого ожидается в 2024 г. [2].

Рост производства редкоземельной продукции в стране (рассмотрим только оксиды, используемые в производстве высококоэрцитивных магнитов — Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) планируется увеличивать по годам соответственно, т/г: 2021 — 46; 152; 10 и 6; 2025 — 318; 969; 10 и 29; 2030 — 746; 2 964; 10 и 146. На первом этапе потребности предполагается удовлетворять за счет лопарита и отчасти за счет вовлечения в переработку фосфогипса. Между 2025 и 2030 гг. ожидается поступление и глубокая переработка зашихинского и томторского сырья соответственно 120 (230) и 6 000 т/г редкоземельных концентратов [1].

Возможное расширение производства редких металлов, в частности ниобия, тантала, титана, циркония и РЗМ, опирается на проекты будущих предприятий и существующую металлургическую базу. В качестве последней вне конкуренции по степени готовности, включая соответствующий производственный опыт, имеющееся оборудование, квалифицированный персонал, всю необходимую инфраструктуру и свободные производственные мощности, выступает АО «Чепецкий механический завод» (АО «ЧМЗ»). В настоящее время он является крупнейшим производителем широкой номенклатуры циркониевой и гафниевой продукции, выпускает ниобий, тантал и титан в виде соединений и сплавов, имеет опыт производства редкоземельной продукции [5].

Выполненные в работах [4, 6] оценки вариантов удовлетворения внутренних потребностей РФ в редкоземельных металлах и ниобии со всей определенностью показывают, что их можно осуществить с разумными затратами, не вкладывая гигантские суммы в

разработку, например, Томторского месторождения, экономику которого не обеспечивают ни содержащиеся в руде ниобий, ни редкие земли. Многочисленными исследованиями показано, что в силу небогатимости томторской руды ниобий из нее может быть получен только в виде пентаоксида [7, 8], производство феррониобия из которого экономически неэффективно [4]. Различные варианты удовлетворения будущей потребности РФ в редких землях рассмотрены в работе [6], где проведен сопоставительный анализ структур потребления и производства РЗЭ из различных отечественных источников сырья. Если не рассматривать использование для этой цели производных хибинского апатита и техногенных источников, то трудно найти альтернативу минеральному сырью Ловозерского горного массива.

Удачным сочетанием сырьевых возможностей и производственных мощностей обладает связка — лопаритовый концентрат Ловозерского месторождения и Программа развития АО «ЧМЗ».

В лопаритовых рудах Ловозерского массива сосредоточено более 2 700 тыс. т редких земель (запасы кат. А+В+С<sub>1</sub>) при содержании в руде 1,12 %. Запасы ниобия и тантала — порядка 700 тыс. т при содержании в руде около 0,3–0,4 %. Согласно ТУ 1763-001-71899056-2005 в составе лопаритового концентрата (ЛК) содержится, % масс.: лопарита — не менее 94,9; фосфора — не более 0,09; двуокиси кремния — не более 2,4; окиси железа — не более 1,9; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 7,3–8,7; TiO<sub>2</sub> — 39,0–40,4; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0,6–0,7; TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 30,5–36,0; SrO — 1,0–3,0; ThO<sub>2</sub> — 0,5–0,7. При этом содержание отдельных редких земель в их сумме составляет, относительные %: La — 25; Ce — 53; Pr — 6; Nd — 14; Sm — 0,9; Eu — 0,08; Gd — 0,2; Tb — 0,1; Dy — 0,12; Ho — 0,08; Er — 0,02. Как видим, в концентрате преобладают легкие (цериевые) РЗЭ, и если содержание празеодима и неодима в нем достаточно высоко, то концентрации тербия и особенно диспрозия явно недостаточны для выдерживания пропорций, требуемых в производстве высококоэрцитивных магнитов Fe-Nd-B.

Этапы развития технологии переработки лопарита неоднократно обсуждались на специальных конференциях и рассмотрены в многочисленных публикациях. Сопоставительный анализ разработанных схем приведен в монографиях [8, 9]. На наш взгляд, наиболее соответствующим условиям ЧМЗ является азотнокислотно-гидрофторидный вариант (рис. 1).

В настоящее время завершена совместная научно-исследовательская работа АО «ЧМЗ» и компании Русредмет с последующими опытно-промышленными испытаниями всей рассматриваемой цепи операций. Приведенная схема показала свою работоспособность в условиях опытно-промышленной проверки, а частично и промышленной эксплуатации. Так, азотнокислотное вскрытие лопарита в течение нескольких лет было основной операцией на Сланцехимическом заводе в г. Силламяэ. Дополнительные исследования и оптимизация параметров вскрытия были проведены

в течение 2020 г. в ходе опытно-промышленных испытаний в АО «ЧМЗ».

Опробованная технологическая схема обладает рядом неоспоримых преимуществ перед уже ставшими классическими сернокислотной и схемой хлорирования. При вскрытии ЛК азотной кислотой в раствор, наряду с РЗЭ, переходят практически все примеси из лопарита, включая источник альфа-активности — оксид тория (более чем на 97 %). Нерастворимый остаток при этом содержит в виде гидратированных оксидов наиболее ценные из выделяемых компонентов концентрата — тантал, ниобий и титан. Таким образом, уже на головной операции происходит практически полное разделение основных ценных компонентов концентрата — РЗЭ и тугоплавких металлов.

При данном способе вскрытия, в отличие от других схем, радиоактивность не распределяется между полупродуктами переработки и выводится в виде достаточно компактного осадка уже в начале переработки раствора нитратов РЗЭ. К достоинствам предлагаемой схемы можно также отнести отсутствие значительного количества отходов и труднореализуемых продуктов, чем грешили ранее использовавшиеся при переработке лопарита гидрометаллургические процессы. Еще одной отличительной особенностью азотнокислотно-гидрофторидной схемы является высокая степень, более 98 %, регенерации и возвращения в технологическую цепочку наиболее дорогого из используемых реагентов — фтористоводородной кислоты. Это достигается путем пирогиридолиза фторметаллатных растворов, образующихся при экстракционном разделении Ti, Ta и Nb. Кроме того, рассматриваемая схема характеризуется высокой степенью сквозного извлечения ценных компонентов в готовую продукцию: Ta и ΣРЗЭ — не менее 93 %, Ti и Nb — не менее 94 %. Важно отметить, что по предлагаемой схеме переработки лопарита, ниобий, как и в случае переработки руды месторождения Томтор, получается в форме пентаоксида, но для производства, требуемого предприятию металлического ниобия, причем достаточно высокой чистоты, именно он и необходим.

В целом испытания продемонстрировали воспроизводимость заложенных в схему показателей и надежность предложенных решений, позволили отработать технологию в условиях предприятия и доказали ее экономическую эффективность.

Коллективный концентрат карбонатов РЗМ, получаемый на стадии дезактивации (рис. 1), в дальнейшем направляется на групповое разделение и получение отдельных редких земель методами жидкостной экстракции. Празеодим, неодим, тербий и диспрозий будут использованы на предприятии для производства высококоэрцитивных магнитов, остальные оксиды представляют собой сырье для получения полирита, мишметалла, лигатур и других ликвидных продуктов. Памятуя о суммарном содержании лантана и церия в составе редкоземельной группы лопарита около 80 %, с целью резкого уменьшения потоков на дальнейших операциях и снижения производственных затрат пред-

ставляется целесообразным отделение их от коллективного концентрата уже на первом этапе разделения РЗЭ и, возможно, использование в виде неразделенной смеси для производства мишметалла и лигатур. Из-за превалирования РЗЭ цериевой группы в большинстве видов редкоземельного сырья церий и отчасти лантан избыточны на мировом рынке. Поэтому поиск путей утилизации этих металлов наряду со снижением затрат на их производство является важной технологической и экономической задачей.

Уникальность лопарита для ЧМЗ определяется не только тем, что в нем около 85 % полезных компонентов (Ta, Nb, Ti и редкие земли), но и тем, что все они используются предприятием для нужд собственного производства. Другими словами, поставки единственного вида минерального сырья закрывают в основном потребности четырех различных производственных линеек.

АО «ЧМЗ» является единственным в России и одним из крупнейших производителей металлического

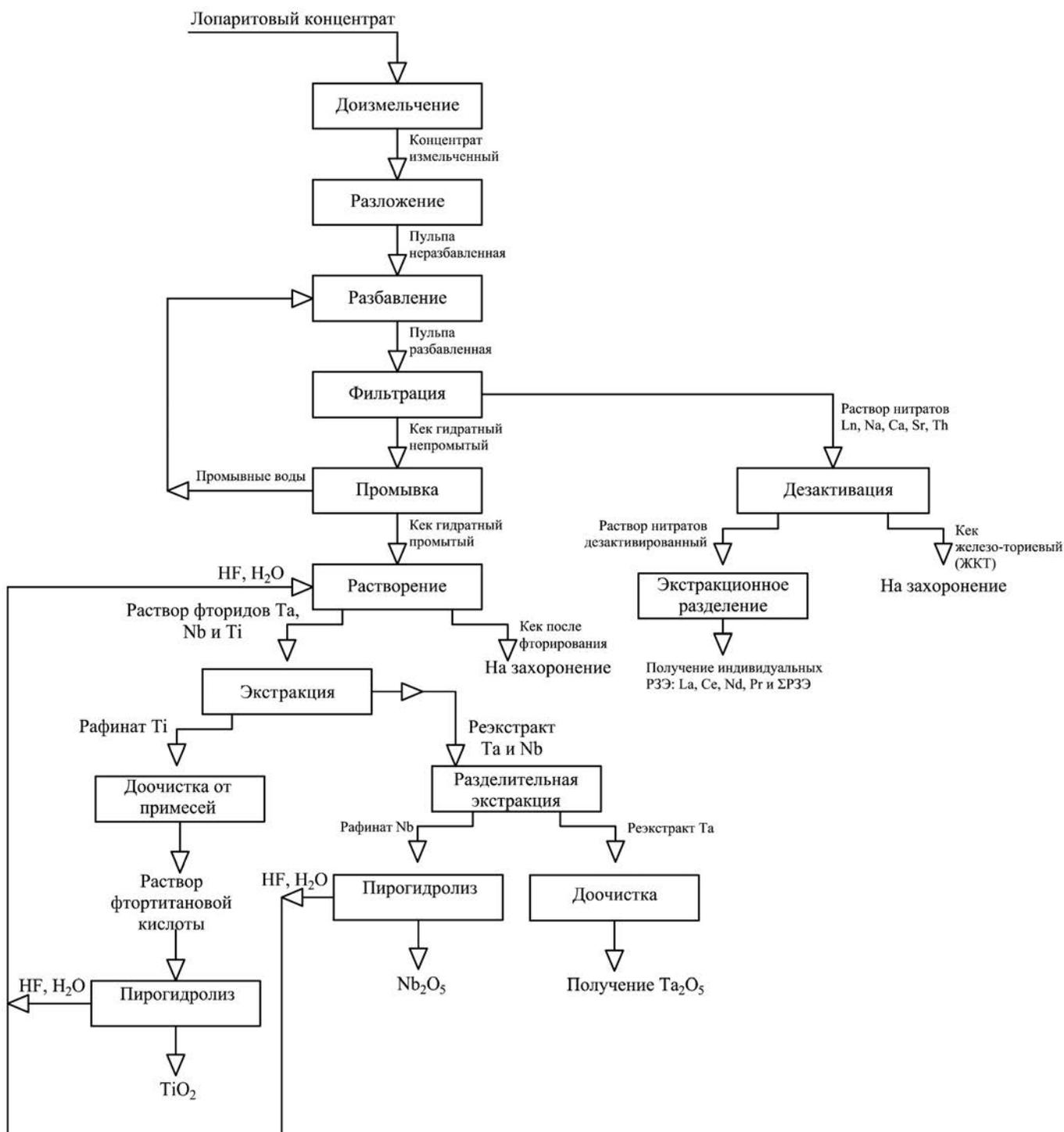


Рис. 1. Принципиальная схема азотнокисотно-гидрофторидной технологии переработки лопарита

**Таблица 1**  
**Содержание основных компонентов в лопаритовых концентратах [11]**

Содержание компонентов, масс. %	TiO <sub>2</sub>	Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ThO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>
Карнасурт	37,81	31,85	7,98	0,63	0,69	7,01	4,80	2,42
Умбозеро	39,57	35,04	6,78	0,59	0,59	6,91	4,50	1,40

циркония в мире. Его доля в мировом производстве составляет 20 % и в связи с расширением программы строительства АЭС будет расти. Текущие потребности предприятия удовлетворяются исключительно за счет доли импорта 65-процентного по ZrO<sub>2</sub> цирконового концентрата, общий объем потребления которого в РФ составляет 9–10 тыс. т/г [1].

Основную потребность РФ в цирконии можно удовлетворить за счет Туганского и Лукояновского циркон-рутил-ильменитовых россыпных месторождений. Руды крупного (~1,0 млн т диоксида циркония) Туганского месторождения содержат 7,72 кг ZrO<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>, глубина залегания рудного пласта — 10–98 м [10]. Лукояновское месторождение заключает 0,35 млн т диоксида циркония в самых богатых в России россыпных рудах. В рудных песках наиболее крупной Итмановской россыпи, залегающей на глубине 40–80 м, содержится 13 кг ZrO<sub>2</sub>/м<sup>3</sup> [10].

В Мурманской области учитываются гигантские забалансовые запасы диоксида циркония в эвдиалитовых рудах Ловозерского редкометалльного месторождения. Разведанные, но не утвержденные в ГКЗ запасы эвдиалитового сырья, только в пределах участка Аллуайв (рис. 2), оценены более чем в 80 млн т при бортовом содержании 2,5 % диоксида циркония, в то время как общие их ресурсы в массиве оцениваются в 80 млрд т. Цирконий входит в состав эвдиалита — Na<sub>4</sub>(CaCeFeMn)<sub>2</sub>ZrSi<sub>6</sub>O<sub>17</sub>(OHCl)<sub>2</sub>; руды содержат в среднем 1,83 % ZrO<sub>2</sub>, на отдельных участках его концентрация достигает 5–9 %. За рубежом проекты крупных месторождений эвдиалита в Гренландии и Швеции находятся в разной стадии развития.

Удовлетворение средне- и долгосрочных потребностей ЧМЗ, согласно принятой на предприятии бизнес-стратегии «Металлургия», предполагается за счет восстановления добычи и переработки лопарита на руднике Умбозеро Ловозерского месторождения в объеме 24 000 т/г. Химический состав лопаритового концентрата на этом руднике несколько отличается от концентрата действующего, но истощающегося рудника Карнасурт (табл. 1).

Технология обогащения лопаритовой руды описана в специальной литературе [12], отработана и усовершенствована в

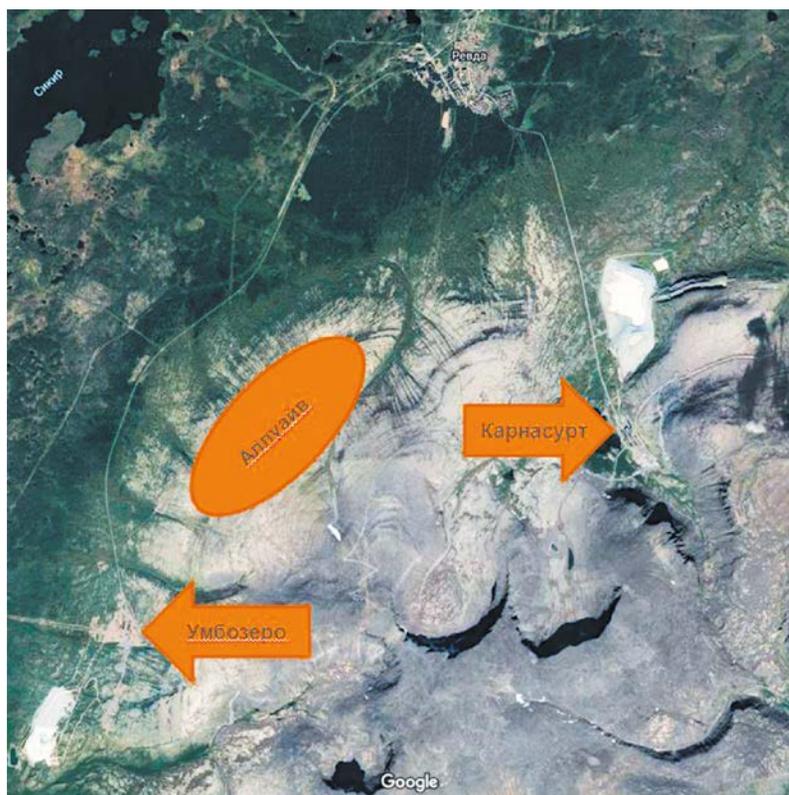
процессе многолетней эксплуатации и позволяет получать концентрат, содержащий не менее 95 % лопарита.

Организация на базе бывшего рудника Умбозеро производства лопаритового концентрата в указанном объеме позволяет рассчитывать на получение около 130 т Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1 530 т Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 8 900 т TiO<sub>2</sub> и 7 800 т Σ Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (450 т Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1 050 т

Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7 т Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 9 т Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). В пересчете на металл это дает соответственно: не менее 100 т тантала, 1 050 т ниобия, 370 т празеодима, 880 т неодима, 6 т тербия и 7,5 т диспрозия.

В магнитах типа FeNdВ содержание тербия и диспрозия (в сумме Pr, Nd, Tb и Dy) достигает 20 %, тогда как в продукции на основе переработки только лопарита оно составляет всего около 1 %. Обеспечить нужное соотношение компонентов можно только привлекая импортные тербий и диспрозий, что сомнительно в условиях дефицита этих металлов на мировом рынке. В качестве альтернативы можно вовлекать в переработку эвдиалит Ловозерского месторождения, в котором относительное содержание необходимых тербия и диспрозия превышает 23 %. Но прежде всего, эвдиалит рассматривается как альтернативный источник циркония для обеспечения основного производства АО «ЧМЗ».

Комплекс эвдиалитовых луавритов участка Аллуайв в Ловозерском массиве находится в непосредственной близости от лопаритовых месторождений Умбозеро и Карнасурт, с последним он соединен грун-



**Рис. 2. Схема размещения рудников Ловозерского месторождения (Карнасурт и Умбозеро) и участка Аллуайв**

товой дорогой длиной 5 км (рис. 2). В начале 1990-х годов месторождение было изучено на стадии предварительной разведки. Мощность пластов эвдиалитовых руд, залегающих непосредственно на поверхности, составляет 20–60 м, вскрышные породы представлены маломощными развалами. Запасы руды кат.  $C_1+C_2$  только на наиболее богатом участке, представляющем интерес для первоочередного освоения, составляют более 50 млн т.

В Горном институте КНЦ РАН разработана технология обогащения эвдиалита, входящего в состав комплекса эвдиалитовых луавритов [12]. В целом технология включает: измельчение руды в первой стадии до 1,6–1,0 мм, гравитационное выделение редкометалльного продукта, измельчение во второй стадии до крупности 40–45 % класса –0,074 мм, обесшламливание по классу –0,030 мм, флотацию эгирина в содовой среде мылом дистиллированного талового масла; камерный продукт эгириновой флотации подвергается отмывке и направляется на флотацию эвдиалита в слабокислой среде реагентом Синтаф-10-18. Эвдиалитовая флотация включает основную и три перечистных операции.

Данная технология позволяет получать из эвдиалитовых луавритов следующие кон-

#### Эвдиалитовый концентрат

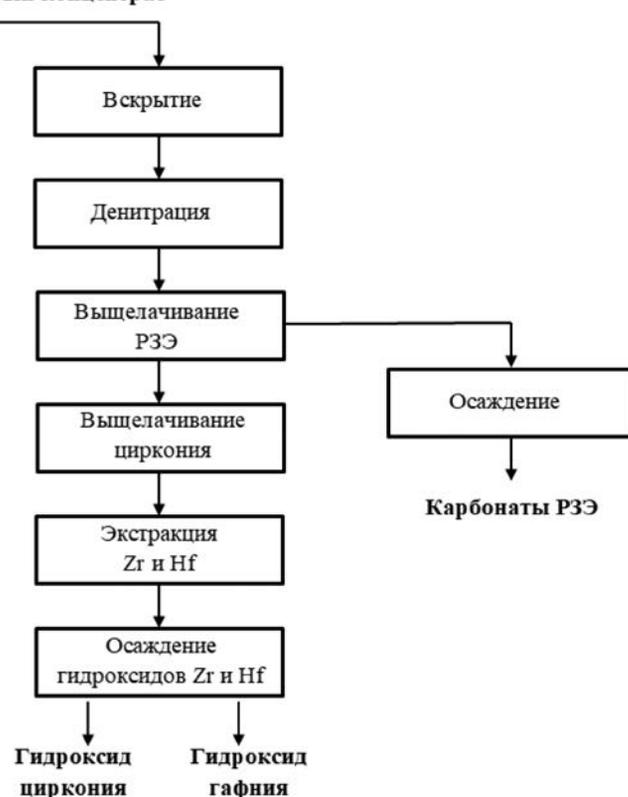


Рис. 3. Принципиальная схема азотнокислой технологии переработки эвдиалита

Таблица 2

Химический состав продуктов обогащения эвдиалитовой руды

Компоненты	Лопаритовый концентрат (95 %), %	Эвдиалитовый концентрат, %	Эгириновый концентрат, %	Нефелин-полевошпатовый продукт, %
ZrO <sub>2</sub>	0,07	11,92	0,78	0,09
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	11,66	0,49	—	—
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,02	—	—	—
ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,46	1,57	—	—
ThO <sub>2</sub>	0,51	0,015	—	—
SiO <sub>2</sub>	4,95	50,10	51,3	64,88
TiO <sub>2</sub>	33,4	0,87	2,5	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,74	2,76	6,3	21,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,84	2,53	20,13	1,30
FeO		2,42	0,06	0,03
MnO	0,03	1,83	0,38	0,034
MgO	0,09	—	1,69	0,255
CaO	3,17	6,08	2,06	0,326
Na <sub>2</sub> O	8,88	14,32	12,65	8,40
K <sub>2</sub> O	0,53	1,65	1,65	2,50
SrO	4,38	1,21	0,03	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24	0,05	0,15	0,026
П.п.п.	0,1	1,6	0,58	0,61

центраты: лопаритовый, эвдиалитовый, эгириновый и объединенный нефелин-полевошпатовый продукт, химический состав которых приведен в табл. 2. Полупромышленные испытания предложенной технологии были проведены на опытной установке Горного института КНЦ РАН на 150-тонной пробе. Для руд вышеупомянутого богатого участка с содержанием эвдиалита — 21,66 %, ZrO<sub>2</sub> — 3,15 %, выход эвдиалитового концентрата составляет 23 %; эгиринового — 16,5 %; лопаритового — 0,57 %; полевошпат-нефелинового продукта — 52,6 %.

Обращает на себя внимание повышенное (в 1,7 раза) содержание тантала и ниобия в лопаритовом концентрате из эвдиалитовой руды в сравнении с лопаритом Умбозерского месторождения. Состав редких земель в полученном эвдиалитовом концентрате — относительные % от суммы оксидов: La — 8,6; Ce — 22,2; Pr — 4,0; Nd — 11,8; Sm — 5,3; Eu — 1,1; Gd — 4,8; Tb — 2,2; Dy — 7,7; Ho — 1,8; Er — 3,5; Tm — 1,6; Yb — 6,1; Lu — 0,5; содержание Y — 18,8. Как видим, в составе этой суммы РЗЭ средне-тяжелые элементы вместе с иттрием составляют 53,4 % при уникально высоком содержании диспрозия. Для промышленной разработки эвдиалитовых руд требуется построить горнообогатительное предприятие, в состав которого входят карьер и обогатительная фабрика.

Переработка полученного эвдиалитового концентрата предполагается по технологии, разработанной в АО «ЧМЗ» и включающей следующие операции (рис. 3).

Решения авторов технологии позволяют снять проблему образования кремнегеля в процессе кислотного вскрытия эвдиалита, которая во многом сдерживала промышленное освоение этого ценного сырья. Концентрат карбонатов РЗЭ, полученный на стадии осаждения, в дальнейшем, как и в технологии лопарита, направляется на разделение методом жидкостной экстракции с получением индивидуальных редких земель. Представленная на рис. 3 технология опробована в опытно-промышленном масштабе. Показано, что азотнокислотное вскрытие эвдиалитового концентрата с последующим двухстадийным выщелачиванием позволяет извлекать 90–95 % циркония и до 80 % РЗЭ.

При сопоставимом с лопаритом объеме выпуска продукции в горно-обогажительной части эвдиалитового проекта, 20–30 тыс. т эвдиалитового концентрата в год, можно рассчитывать на получение 2–3 тыс. т  $ZrO_2$ . При этом выпуск редкоземельных оксидов составит, т/г: Pr — до 18; Nd — до 55; Tb — до 10; Dy — до 36. В сумме с приведенными выше цифрами для лопаритового концентрата это дает не менее 460 т  $Pr_2O_3$ , 1100 т  $Nd_2O_3$ , 15 т  $Tb_2O_3$  и 43 т  $Dy_2O_3$  для обеспечения программы выпуска магнитных материалов.

Попробуем оценить правильность выбора лопарита и эвдиалита Ловозерского месторождения для решения задач ЧМЗ на основе известных критериев [13]. Считается, что к осуществлению проекта имеет смысл приступать, если инвестор знает положительные ответы (+) на следующие вопросы:

Какие компоненты нужно извлечь из сырья и какие (из не имеющих сбыта) придется извлечь с целью получения востребованных?	+
В какой форме они нужны рынку?	+
Каков для них рынок сегодня и в будущем?	+
Какой технологический процесс нужно освоить и поддерживать на предприятии, обеспечивая его рентабельность?	+
Каков ценовой прогноз этих продуктов сегодня и на годы вперед?	+/-
Насколько прибыльно для компании производство планируемого масштаба при нынешних и прогнозируемых ценах?	+/-
Хорошо ли известны или просто понятны подходы ко всем технологиям, необходимым для вывода продуктов на рынки. Используются ли они на практике и применимы ли к сырью данного месторождения?	+
Есть ли у компании партнеры в случае необходимости выполнения разработок на стороне?	+
Если да, то есть ли в компании квалифицированные сотрудники, способные организовать такое партнерство и руководить проектом?	+
Имеет ли рассматриваемое предприятие время, требующееся новому поставщику, чтобы быть опробованным рынком, особенно, если выбранный сегмент рынка находится в нижней части продуктов (требующих извлечения, разделения, очистки)?	+

Очевидно, что дать твердый ответ на вопросы, касающиеся долгосрочного ценового прогноза на достаточно монополизированном и закрытом мировом рынке редких металлов и зависящей от него рентабельности производства, сегодня затруднительно. Но, памятуя о необходимости создания рассматриваемых производств, для ухода от импортозависимости по целому ряду продуктов и во многом для удовлетворения внутренних потребностей в крайне чувствительных для страны областях, на эти вопросы можно с высокой долей вероятности ответить также положительно. В пользу подобной оценки говорят как наблюдаемые тенденции мирового рынка, так и долгосрочные прогнозы ведущих аналитиков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гришаев, С.И. Состояние и перспективы развития промышленности редких и редкоземельных металлов // Докл. на конф. «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий» / С.И. Гришаев. — М.: ВИМС, 2019.
2. Селезнев, А.О. О ходе реализации инвестиционного проекта «Строительство горно-металлургического комбината на базе Зашихинского редкометалльного месторождения» // Докл. на конф. «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий» / А.О. Селезнев. — М.: ВИМС, 2019.
3. Алешин, А.В. Текущий статус реализации проекта освоения участка Буранный Томторского месторождения // Докл. на конф. «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий» / А.В. Алешин, Д.Ю. Воронин. — М.: ВИМС, 2019.
4. Нечаев, А.В. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения / А.В. Нечаев, Е.Г. Поляков, Е.Б. Белоусова, В.С. Пикалова, Л.З. Быховский // Минеральные ресурсы России — 2020. — № 4–5. — С. 8–15.
5. АО «Чепецкий механический завод» (буклет) <http://www.chmz.net/product/buklet-hi.pdf>.
6. Нечаев, А.В. Существующий и перспективный баланс производства и потребления редкоземельных металлов в России / А.В. Нечаев, Е.Г. Поляков // Минеральные ресурсы России — 2020. — № 2. — С. 49–53.
7. Лихникевич, Е.Г. Влияние минерального состава пироксид-монацит-крандалитовых руд на технологические показатели их переработки / Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогина, Ю.М. Астахова // Золото и технологии — 2016. — № 4. — С. 68–71.
8. Поляков, Е.Г. Metallургия редкоземельных металлов / Е.Г. Поляков, А.В. Нечаев, А.В. Смирнов. — М.: Metallургиздат, 2018. — 732 с.
9. Калинин, В.Т. Гидрометаллургическая комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья / В.Т. Калинин, А.И. Николаев, В.И. Захаров. — Апатиты: КНЦ РАН, 1999. — 235 с.
10. Быховский, Л.З. Перспективы создания рудной базы титана и циркония в России / Л.З. Быховский, Л.П. Тигунов, Л.Б. Зубков // Минеральное сырье. — № 18. — М.: ВИМС. — 2006. — С. 71–76.
11. Николаев, А.И. Переработка нетрадиционного титанового сырья Кольского полуострова / А.И. Николаев. — Апатиты: КНЦ АН СССР, 1991. — 118 с.
12. Найфонов, Т.Б. Флотационное обогащение комплексных титановых и циркониевых руд / Т.Б. Найфонов, В.И. Белобородов, И.Б. Захарова. — Апатиты: КНЦ РАН, 1994. — 154 с.
13. Lifton, J. The Global Technology Metals Markets: A Conference Primer // InvestorIntel. — Aug. 16. — 2015.

© Коллектив авторов, 2021

Нечаев Андрей Валерьевич // anechaev@rusredmet.ru  
Поляков Евгений Георгиевич // ev-polyakov@mail.ru  
Кардаполов Александр Викторович // AVKardapolov@rosatom.ru  
Копарулина Елена Семеновна // EISKoparulina@rosatom.ru