

УДК 553.493.6:553(470.21)

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ*



А. О. КАЛАШНИКОВ,

старший научный сотрудник, канд. геол.-минерал. наук,
kalashnikov@geoksc.apatity.ru



Н. Г. КОНОПЛЕВА,

старший научный сотрудник, канд. геол.-минерал. наук



Г. Ю. ИВАНЮК,

д-р геол.-минерал. наук

Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

Редкоземельные элементы (РЗЭ – лантаноиды, иттрий и скандий [1]) широко используются при создании новых высокотехнологических материалов – электрогенераторов, катализаторов, энергосберегающих источников света и т. д. Это предопределило их стратегическую ценность в экономике многих стран, в том числе и России [2–4]. Наибольшую ценность представляют тяжелые РЗЭ – диспрозий, иттербий, тулий, тербий, лютеций, а также неодим. Извлечение скандия, концентрирующегося в бадделеите Ковдорского месторождения, позволит России стать доминирующим игроком на рынке этого металла.

Локализация месторождений и рудопроявлений РЗЭ на территории Мурманской области

Кольская редкоземельная провинция (см. **рисунок**) является самой значительной в России как по объемам текущей добычи РЗЭ, так и по балансовым и прогнозным запасам [5].

Обобщена информация о стоимости редкоземельных элементов (РЗЭ) в рудах месторождений и рудопроявлений Мурманской области. С учетом наличия технологий извлечения РЗЭ и имеющейся инфраструктуры выделены приоритетные задачи развития базы РЗЭ – извлечение РЗЭ из уже добываемых руд (хибинские апатитовые месторождения, бадделеит Ковдорского месторождения), освоение Ловозерского эвдиалитового месторождения, переоценка перовскит-титаномагнетитового месторождения Африканда, разведка редкоземельно-циркониевых рудопроявлений Кейвского блока.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, лантаноиды, скандий, Кольская редкоземельная провинция, апатит, эвдиалит, бадделеит, минеральные ресурсы.

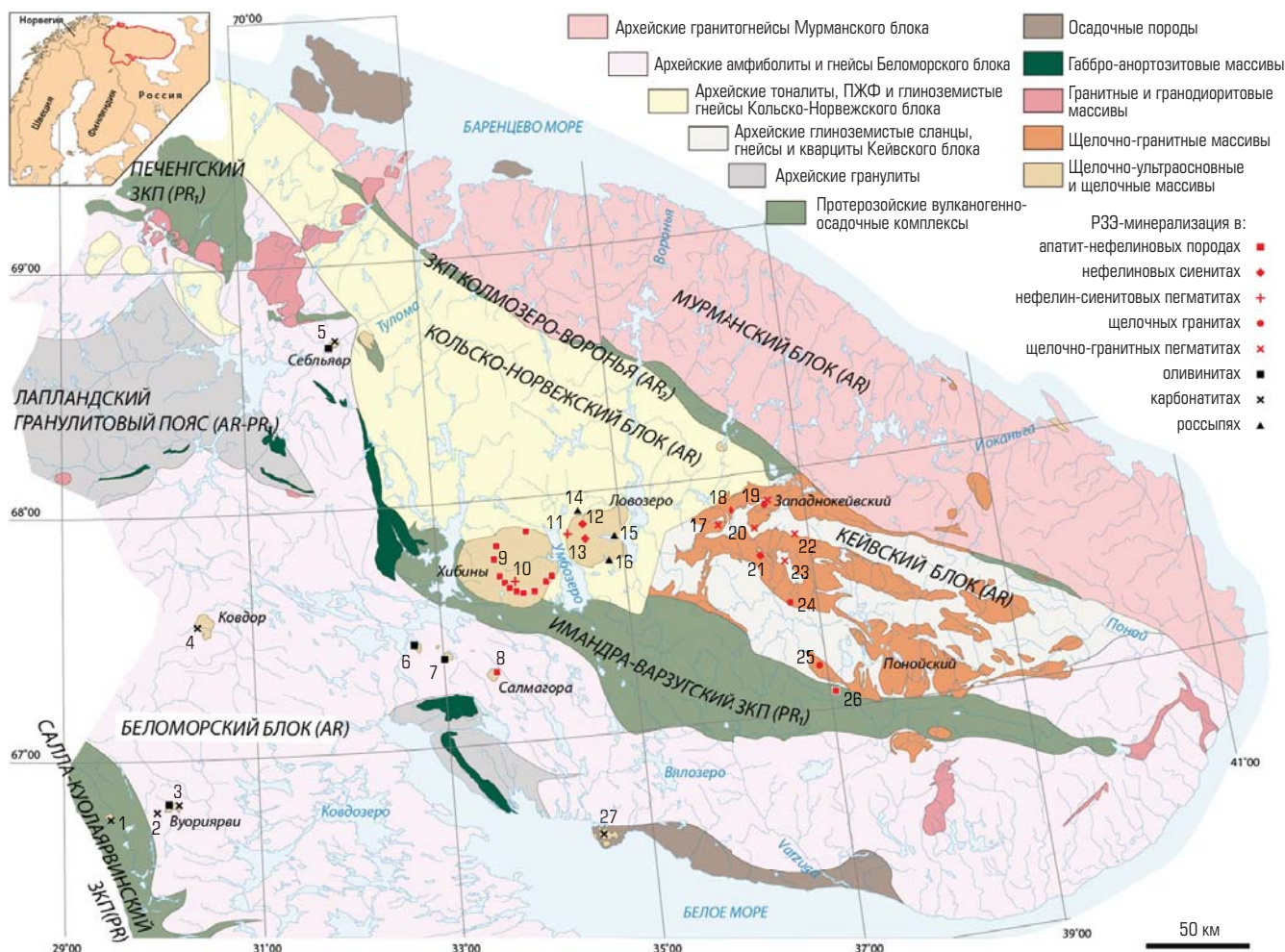
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.05

Основной объем РЗЭ сосредоточен в апатите хибинских месторождений и лопаритовых рудах Ловозерского массива. В настоящее время РЗЭ извлекают только из лопаритового концентрата, производимого Ловозерским ГОКом. На остальных месторождениях Кольского региона РЗЭ учтены в балансе запасов полезных ископаемых как попутные компоненты, но при дальнейшей переработке руд их не извлекают. Помимо хибинских и ловозерских месторождений, концентрирующих в основном легкие РЗЭ, на территории Мурманской области имеется ряд месторождений и рудопроявлений, содержащих наиболее дорогостоящие РЗЭ – группу тяжелых лантаноидов (Gd–Lu и Y) и скандий.

Чтобы сравнить между собой перспективность различных кольских месторождений и рудопроявлений (кроме разрабатываемого Ловозерского лопаритового), авторы оценили стоимость содержащихся в рудах РЗЭ по средним рыночным ценам разделенных редкоземельных оксидов. Также учтены наличие технологий извлечения РЗЭ, инфраструктуры и готовность объекта к отработке.

РЗЭ Мурманской области концентрируются в пяти типах пород: нефелиновых сиенитах и фойдолитах (титанит-apatитовые месторождения Хибинской группы, Ловозерские месторождения эвдиалита и лопарита) и связанных с ними пегматитах; щелочных гранитах (рудопроявления Юмперуайв, Большой Пьедестал и др.) и связанных с ними пегматитах; оливинитах (Африканда и др.); карбонатитах (Ковдор, Вуориярви, Себляярв и др.) и в лопаритовых россыпях (район Ловозерского массива) [5].

*Работа выполнена в рамках научной темы ГИ КНЦ РАН 0226-2019-0051 и частично профинансирована по гранту РФФИ 12-05-98802. Статья написана на основе аналитической записки, подготовленной по заказу Счетной палаты РФ в 2015 г.



Месторождения и рудопроявления редкоземельных элементов Мурманской области (по данным [5, 6]):

1 – Салланлатва; 2 – Нама-Вара; 3 – Vuorijarvi (Западное, Неске-Вара, Тухта-Вара, Петяян-Вара); 4 – Ковдорское; 5 – Себлявр; 6 – Африканда; 7 – Лесная Варака; 8 – Салмагора; 9 – Хибинские; 10 – Юкспорское ловчорритовое; 11 – Шомикитовая Жила; 12 – Ловозерское лопаритовое; 13 – Ловозерское эвдиалитовое; 14–16 – лопаритовые россыпи; 17 – пегматитовое поле Южный Тапперйок–Пессарйок; 18 – Юмперуйав; 19 – Большой Пьедестал; 20 – пегматитовое поле Ровгора; 21 – Сахарйок; 22 – пегматитовое поле Южный Серповидный Хребет; 23 – Плоскогорское (Вюнцпахк); 24 – Ельскоозерские; 25 – Лаврентьевское; 26 – Песочный Массив; 27 – Турий Мыс; ЗКП – зеленокаменный пояс; ПЖФ – полосчатая железорудная формация

Материалы и методы исследований

Цены (руб/кг) на индивидуальные оксиды РЗЭ взяты на начало 2020 г. из следующих источников: La₂O₃ (108), Ce₂O₃ (105), Pr₂O₃ (2928), Nd₂O₃ (2676), Sm₂O₃ (114), Eu₂O₃ (1922), Gd₂O₃ (1551), Tb₂O₃ (37744), Dy₂O₃ (16699), Er₂O₃ (1441), Y₂O₃ (183), Sc₂O₃ (3042) – по данным Mineral Fund Advisory Pty. Ltd. (<http://mineralprices.com>) на 28.02.2020 г.; Ho₂O₃ (30000), Tm₂O₃ (72000), Yb₂O₃ (27600), Lu₂O₃ (83000) – по данным российских продавцов РЗЭ на апрель – май 2020 г. При пересчете цен из юаней в рубли брали среднемесячный курс февраля 2020 г. (9,15 руб/юань).

Запасы и ресурсы месторождений и рудопроявлений РЗЭ, содержания (пропорции) отдельных РЗЭ в структуре запасов/ресурсов взяты из производственных отчетов и опубликованной

литературы. Также использовали результаты собственных анализов руд и минералов месторождений РЗЭ.

Результаты и их обсуждение

Сравнение ценности руд некоторых редкоземельных месторождений Мурманской области с учетом стоимости индивидуальных оксидов РЗЭ дало следующие результаты. Установлено, что вклад в стоимость редкоземельных руд Мурманской области легких РЗЭ (La, Ce) не так высок, как можно было бы ожидать, исходя из их доли в главных минералах-концентраторах – апатите, лопарите, эвдиалите. Несколько заметнее среди легких лантаноидов лишь удельный вес Pr. Основная же доля приходится на Nd, относящийся к средним РЗЭ, и тяжелые РЗЭ – Dy, Tm, Yb, Tb, Lu, Ho.

В 70–80-е годы прошлого столетия за рубежом РЗЭ успешно извлекали из апатитового концентрата хибинских месторождений [6, 7]. В настоящее время технологии извлечения индивидуальных РЗЭ из апатита продолжают успешно развиваться [8]. После редкоземельного кризиса 2011 г. магматический апатит во всем мире стал рассматриваться как перспективный и доступный источник РЗЭ [9, 10]. Однако до сих пор при разработке хибинских месторождений апатита ежегодно теряют около 95 тыс. т оксидов РЗЭ, или 132 млрд руб. (без учета РЗЭ, содержащихся в титаните). При сернокислотной переработке апатитового концентрата, используемой ОАО «ФосАгро» (около 85 % добываемого в Хибинах апатита), хотя бы остается фосфогипс, содержащий РЗЭ, а при азотнокислотной переработке, используемой на ОАО «Акрон» (около 15 % добываемого апатита) РЗЭ теряются окончательно. При этом азотнокислотная переработка апатитового концентрата позволяет извлекать около 12 тыс. т оксидов РЗЭ в год без существенных капитальных вложений [11]. Кроме того, титанит содержит около 10 % ресурсов РЗЭ хибинских месторождений, что составляет около 1 млн т REE₂O₃. В настоящее время РЗЭ в титаните не стоят на балансе ГКЗ, хотя существуют технологии их извлечения [12]. Несмотря на то, что около 70 % запасов редкоземельных элементов хибинских месторождений составляют легкие La и Ce (наиболее дешевые РЗЭ), основной вклад в стоимость РЗЭ дают Nd, Dy, Tm и в меньшей степени Tb, Pr, Yb.

Потенциальный объем скандия, который можно извлекать из бадделеитового концентрата Ковдорского магнетит-апатит-бадделеитового месторождения, сопоставим с нынешним мировым потреблением этого металла – около 8 т в год [13]. Изучение возможностей внедрения глубокой переработки бадделеитового концентрата с извлечением циркония, скандия, гафния, тантала и ниобия [14–16] представляется одной из приоритетных задач по развитию редкометалльной базы России. Это позволяет предположить, что при запуске производства по извлечению скандия из бадделеита Россия может стать доминирующим игроком на мировом рынке этого металла [13].

Африкандское перовскит-титаномагнетитовое месторождение известно с 1930-х годов. В 1956–1958 гг. здесь осуществляли опытно-добычные работы. После 2010 г. Министерство природных ресурсов Мурманской области дважды объявляло конкурс на его разработку, но из-за высокой стартовой цены желающих осваивать месторождение не нашлось. К настоящему времени разработаны технологии комплексного освоения руд месторождения, в том числе извлечения РЗЭ из перовскита [17]. Еще одним аргументом в пользу переоценки Африкандского месторождения является то, что в России сейчас практически отсутствует производство собственного титанового сырья, за исключением извлечения его из лопаритового концентрата (Ловозерское лопаритовое месторождение) и опытно-промышленной добычи циркон-рутил-ильменитовых песков Туганского месторождения (Томская область) [18]. Возможной проблемой при разработке месторождения является необходимость захоронения (или переработки) торийсодержащих отходов. Главный вклад в стоимость РЗЭ вносит неодим.

Эвдиалит в последнее время рассматривается в качестве перспективного источника РЗЭ. Помимо Ловозерского, в мире известны эвдиалитовые месторождения Норра-Кэпп (Швеция), Кипава, Ред-Вайн (Канада), Пахарито (США), Тэнбриз (Гренландия). Привлекательность эвдиалита как рудного минерала заключается в том, что он концентрирует цирконий и РЗЭ. При этом зачастую обогащен именно тяжелыми РЗЭ. Он легко растворяется в слабых кислотах, что удешевляет его переработку и снижает нагрузку на окружающую среду по сравнению с переработкой других минералов РЗЭ – ксенотима, монацита, апатита и др. (кроме бастнезита и ионно-адсорбционных глин) [19, 20]. Участок Аллуайв Ловозерского эвдиалитового месторождения является наиболее перспективным циркониевым месторождением в России после эксплуатируемого Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового [21]. Участок Аллуайв разведан и частично находится в пределах горного отвода Ловозерского ГОКа. Руда легкообогатимая, с низким объемом радиоактивных примесей. Имеющиеся технологии переработки (шесть схем, включая три сернокислотные, которые утилизируют серную кислоту медно-никелевых комбинатов Мурманской области) позволяют извлекать все полезные компоненты эвдиалита и лопарита (РЗЭ, Zr, Nb, Ta, Ti), а также рассматривать в качестве рудных минералов мурманит (источник титана) и ловозерит (источник титана и циркония) [22]. Наибольший вклад в стоимость РЗЭ месторождения (в составе эвдиалита) дают тяжелые РЗЭ – Dy, Yb, Lu, Tb, а также Nd.

Из рудных объектов тяжелых редких земель Мурманской области перспективными являются рудопроявления Западнокейвского щелочно-гранитного массива (Юмперуайв, Большой Пьедестал и др.) и находящийся в его пределах нефелин-сиенитовый массив Сахарйок с одноименным Zr-РЗЭ-месторождением. Стоимость РЗЭ, содержащихся в одной тонне руды рудопроявления Юмперуайв, максимальная среди редкоземельных месторождений области. Основную долю в стоимости руды имеют тяжелые РЗЭ – Dy, Yb, Ho, Tm, Lu, а также Nd [23]. Представляется, что это один из первоочередных объектов для проведения поисково-разведочных работ. Минусы кейвских рудопроявлений – сложный минеральный состав и относительная удаленность от инфраструктуры (порядка 100 км до пос. Коашва и с. Ловозеро), отсутствие технологии комплексной переработки. Плюсы – примерно половина запасов РЗЭ представлена средними и тяжелыми лантаноидами. Рудопроявления в щелочных гранитах и месторождение Сахарйок являются многокомпонентными: возможно попутное извлечение циркония из циркона.

Основными факторами, препятствующими внедрению технологий по извлечению РЗЭ из руд действующих месторождений Мурманской области и освоению новых месторождений, являются в первую очередь экономические и инфраструктурные: наличие на мировом рынке относительно дешевых редкоземельных продуктов из Китая; необходимость значительных вложений в изменение технологической цепочки сернокислотной переработки хибинского апатита для извлечения РЗЭ; отсутствие в России производства по разделению редких земель.

Продукт, содержащий в своем составе неразделенные редкие земли, имеет относительно невысокую стоимость, приращение стоимости происходит при более глубокой переработке – получении чистых оксидов редких земель. При этом имеются разработанные технологии разделения, в том числе оригинальные и разработанные специально для Кольского редкоземельного сырья. Важным преимуществом Мурманской области в плане добычи редкоземельного сырья является наличие на ее территории крупного производителя серной кислоты, которая является основным реагентом для многих технологий извлечения и разделения РЗЭ – Кольской горно-металлургической компании (Мончегорск, Никель). Представляется, что максимальная социально-экономическая эффективность в освоении ресурсов РЗЭ может быть достигнута в рамках Кольского химико-технологического кластера – при совместной деятельности горнодобывающих предприятий, производящих РЗЭ-содержащий концентрат, производителей серной кислоты и других реагентов, электрогенерирующих компаний и Кольского научного центра – основного разработчика технологий переработки редкоземельного сырья [24].

Выводы

Наибольший вклад в стоимость редкоземельных руд Мурманской области дают тяжелые РЗЭ – диспрозий, иттербий, тулий, тербий, лютеций, а также неодим.

Главными направлениями развития производства РЗЭ в регионе являются следующие (в порядке убывания приоритетности):

- извлечение РЗЭ из уже добываемых и перерабатываемых минералов: апатита хибинских месторождений и бадделеита Ковдорского месторождения;
- добыча комплексных (титан-тантал-ниобий)-редкоземельно-циркониевых руд Ловозерского эвдиалитового месторождения, в первую очередь на участке Аллуайв;
- переоценка месторождения Африканда с учетом новых технологий переработки перовскит-титаномагнетитовых руд, а также в связи с тем, что в России сейчас практически отсутствует производство собственного титанового сырья;
- проведение поисково-оценочных и разведочных работ на Кейвских комплексных рудопоявлениях в щелочных гранитах и пегматитах и разработка технологий переработки их сложных руд.

Библиографический список

1. Connelly N. G., Damhus T., Hartshorn R. M., Hutton A. T. Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations 2005. – London : RSC Publishing, 2005. – 366 p.
2. Chakhmouradian A. R., Smith M. P., Kynicky J. From “strategic” tungsten to “green” neodymium: A century of critical metals at a glance // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 64. P. 455–458.
3. Кольцов В. Ю., Захаров А. А., Власова Т. В., Величкина Н. С. Технология получения редкоземельного концентрата из фосфогипса методом кучного выщелачивания // *Цветные металлы*. 2020. № 2. С. 56–61. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.07
4. Юрасова О. В., Гасанов А. А., Харламова Т. А., Василенко С. А. Технология извлечения оксида церия (IV) из концентратов редкоземельных металлов с использованием методов электрохимического окисления и экстракции // *Цветные металлы*. 2016. № 3. С. 42–49. DOI: 10.17580/tsm.2016.03.07
5. Kalashnikov A. O., Konopleva N. G., Pakhomovsky Ya. A., Ivanyuk G. Yu. Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia – A Review // *Economic Geology*. 2016. Vol. 111. No. 7. P. 1529–1559.
6. Yakovenchuk V. N., Ivanyuk G. Yu., Pakhomovsky Ya. A., Menshikov Yu. P. Khibiny. Laplandia Minerals. – Apatity: Laplandia Minerals Ltd., 2005. – 463 p.
7. Sarapää O., Al Ani T., Lahti S. I., Lauri L. S., Sarala P. et al. Rare earth exploration potential in Finland // *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. Vol. 133. P. 25–41.
8. Ogata T., Narita H., Tanaka M., Hoshino M., Kon Y., Watanabe Y. Selective recovery of heavy rare earth elements from apatite with an adsorbent bearing immobilized tridentate amido ligands // *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 159. P. 157–160.
9. Chakhmouradian A. R., Zaitsev A. N. Rare Earth Mineralization in Igneous Rocks: Sources and Processes // *Elements*. 2012. Vol. 8. No. 5. P. 347–353.
10. Ihlen P. M., Schiellerup H., Gautneb H., Skår Ø. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential – A review // *Ore Geology Reviews*. 2014. Vol. 58. P. 126–147.
11. Пат. 2595672 РФ. Способ переработки концентрата редкоземельных элементов / А. В. Осьмак, И. И. Николаева, Н. В. Горшкова; заявл. 16.06.2015; опубл. 27.08.2016, Бюл. № 24.
12. Николаев А. И., Ларичкин Ф. Д., Герасимова Л. Г., Николаева О. А. Кольский полуостров – титановая провинция России. Перспективы ее использования // *Титан*. 2009. № 3(25). С. 12–20.
13. Kalashnikov A. O., Yakovenchuk V. N., Pakhomovsky Ya. A., Bazai A. V., Sokharev V. A. et al. Scandium of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. P. 532–537.
14. Лебедев В. Н. Выделение и очистка скандия при переработке бадделеитового концентрата // *Химическая технология*. 2007. Т. 8. № 1. С. 33–37.
15. Лебедев В. Н., Локшин Э. П., Мельник Н. А., Щур Т. Е., Попова Л. А. О возможности комплексной переработки бадделеитового концентрата // *Журнал прикладной химии*. 2004. Т. 77. № 5. С. 712–714.
16. Лебедев В. Н., Локшин Э. П. Выделение ниобия и тантала из отходов обогащения бадделеитового концентрата // *Химическая технология*. 2008. Т. 9. № 12. С. 651–654.
17. Николаев А. И., Калинин В. Т. Полутное производство редкоземельных металлов при переработке перовскитового концентрата Африкандского месторождения // *Цветные металлы*. 2013. № 3. С. 64–69.
18. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах : государственный доклад. – М. : ООО «Минерал-Инфо», 2018. – 372 с.
19. Davris P., Stopic S., Balomenos E., Panias D., Paspaliaris I., Friedrich B. Leaching of rare earth elements from eudialyte concentrate by suppressing silica gel formation // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 108. P. 115–122.
20. Mariano A. N., Mariano A. Rare Earth Mining and Exploration in North America // *Elements*. 2012. Vol. 8. No. 5. P. 369–376.
21. Самонов А. Е. Перспективы развития производства и потребления редкоземельной продукции в России // *Типоморфные минералы и минеральные ассоциации – индикаторы масштабности природных и техногенных месторождений и качества руд : матер. Всероссийской науч. конф., годичное собрание РМО. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2008. С. 134–138.*
22. Лебедев В. Н. Серноокислотная технология эвдиалитового концентрата // *Журнал прикладной химии*. 2003. Т. 76. № 10. С. 1601–1605.
23. Mikhailova J. A., Pakhomovsky Ya. A., Ivanyuk G. Yu., Bazai A. V., Yakovenchuk V. N. et al. REE mineralogy and geochemistry of the Western Keivy peralkaline granite massif, Kola Peninsula, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 82. P. 181–197.
24. Калинин В. Т., Николаев А. И., Герасимова Л. Г. Кольский химико-технологический кластер для решения проблем экономики и экологии российской Арктики // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2014. № 3(40). С. 27–31. **ГЖ**

Valuation of rare earth elements in ore deposits in the Murmansk Region

Information about authors

A. O. Kalashnikov¹, Senior Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, kalashnikov@geoksc.apatity.ru

N. G. Konopleva¹, Senior Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

G. Yu. Ivanyuk¹, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences

¹Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The Kola rare-earth metallogenic province is the biggest in Russia. The largest resources of rare earth elements (REE) are confined to the Khibiny apatite deposits and loparite and eudialyte deposits of the Lovozero massif. In order to compare the prospects of different Kola deposits and occurrences, we estimated the value of rare-earth oxides contained in ores pursuant to average market prices of certain rare-earth oxides. Heavy REE (Dy, Yb, Tm, Tb, Lu) and Nd make the largest contribution to the value of REE-bearing ores despite the fact that light REE (La and Ce) make up the majority of the REE resources of almost all deposits in the region. Given the variety of mineral processing technologies and infrastructure available, we have identified the most important objectives to advance the REE industry in the region: (1) REE recovery from the currently produced minerals, namely, apatite of the Khibiny deposits and baddeleyite of the Kovdor deposit—high-level processing of the Kovdor baddeleyite concentrate can make Russia a dominant player on scandium market; (2) launching mining operations in the multicomponent (Ti-Ta-Nb)-REE-Zr Lovozero eudialyte deposit (in the first place, the Alluiv site); (3) reevaluation of the Afrikanda deposit in the light of new technologies for processing perovskite–titanomagnetite ores, as well as due to the fact that Russia currently lacks domestic production of titanium raw materials; (4) prospecting and exploration of the Keivy occurrences in alkaline granites and pegmatites and the development of processing technologies for these complex ores.

The study has been accomplished in the framework of R&D project of the Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, and is partly supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 12-05-98802. The article is based on the analytical note on request of the Accounting Chamber of the Russian Federation in 2015.

Keywords: rare earth elements, lanthanoids, scandium, Kola rare earth province, apatite, eudialyte, baddeleyite, mineral resources.

References

1. Connelly N. G., Damhus T., Hartshorn R. M., Hutton A. T. Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations 2005. London: RSC Publishing, 2005. 366 p.
2. Chakhmouradian A. R., Smith M. P., Kynicky J. From “strategic” tungsten to “green” neodymium: A century of critical metals at a glance. *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 64. pp. 455–458.
3. Koltsov V. Yu., Zakharov A. A., Vlasova T. V., Velichkina N. S. Production of rare earth concentrate from phosphogypsum by heap leaching. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 2. pp. 56–61. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.07
4. Yurasova O. V., Kharlamova T. A., Gasanov A. A., Vasilenko S. A. Technology of cerium (IV) oxide extraction from rare-earth metal concentrates using electrochemical oxidation and extraction methods. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 3. pp. 42–49. DOI: 10.17580/tsm.2016.03.07

5. Kalashnikov A. O., Konopleva N. G., Pakhomovsky Ya. A., Ivanyuk G. Yu. Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia – A Review. *Economic Geology*. 2016. Vol. 111, No. 7. pp. 1529–1559.
6. Yakovenchuk V. N., Ivanyuk G. Yu., Pakhomovsky Ya. A., Menshikov Yu. P. Khibiny. Laplandia Minerals. Apatity: Laplandia Minerals Ltd., 2005. 463 p.
7. Sarapää O., Al Ani T., Lahti S. I., Lauri L. S., Sarala P. et al. Rare earth exploration potential in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. Vol. 133. pp. 25–41.
8. Ogata T., Narita H., Tanaka M., Hoshino M., Kon Y., Watanabe Y. Selective recovery of heavy rare earth elements from apatite with an adsorbent bearing immobilized tridentate amido ligands. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 159. pp. 157–160.
9. Chakhmouradian A. R., Zaitsev A. N. Rare Earth Mineralization in Igneous Rocks: Sources and Processes. *Elements*. 2012. Vol. 8, No. 5. pp. 347–353.
10. Ihlen P. M., Schiellerup H., Gautneb H., Skår Ø. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential – A review. *Ore Geology Reviews*. 2014. Vol. 58. pp. 126–147.
11. Osmak A. V., Nikolaeva I. I., Gorshkova N. V. Method of processing rare-earth elements concentrate. Patent RF, No. 2595672. Applied: 16.06.2015. Published: 27.08.2016. Bulletin No. 24.
12. Nikolaev A. I., Larichkin F. D., Gerasimova L. G., Nikolaeva O. A. The Kola peninsula as the titanium province of Russia. Prospects for its utilization. *Titan*. 2009. No. 3(25). pp. 12–20.
13. Kalashnikov A. O., Yakovenchuk V. N., Pakhomovsky Ya. A., Bazai A. V., Sokharev V. A. et al. Scandium of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource. *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. pp. 532–537.
14. Lebedev V. N. Extraction and purification of scandium in baddeleyite concentrate treatment. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2007. Vol. 8, No. 1. pp. 33–37.
15. Lebedev V. N., Lokshin E. P., Melnik N. A., Shchur T. E., Popova L. A. Possibility of Integrated Processing of the Baddeleyite Concentrate. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2004. Vol. 77, No. 5. pp. 708–710.
16. Lebedev V. N., Lokshin E. P. Niobium and tantalum recovery from baddeleyite concentration tailings. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2008. Vol. 9, No. 12. pp. 651–654.
17. Nikolaev A. I., Kalinnikov V. T. By-product manufacturing of rare-earth metals during the processing of perovskite concentrate of the Afrikanda deposit. *Tsvetnye Metally*. 2013. No. 3. pp. 64–69.
18. About the state and use of mineral resources of Russian Federation in 2016 and 2017: state report. Moscow: LLC Mineral-Info, 2018. 372 p.
19. Davris P., Stopic S., Balomenos E., Panias D., Paspaliaris I., Friedrich B. Leaching of rare earth elements from eudialyte concentrate by suppressing silica gel formation. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 108. pp. 115–122.
20. Mariano A. N., Mariano A. Rare Earth Mining and Exploration in North America. *Elements*. 2012. Vol. 8, No. 5. pp. 369–376.
21. Samonov A. E. Prospects for production and use of rare earths in Russia. *Typomorphic Minerals and Associations as Size and Quality Indicators of Natural and Manmade Deposits: All-Russian Conference—Annual Meeting of the Russian Mineralogical Society*. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2008. pp. 134–138.
22. Lebedev V. N. Sulfuric Acid Technology for Processing of Eudialyte Concentrate. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2003. Vol. 76, No. 10. pp. 1559–1563.
23. Mikhailova J. A., Pakhomovsky Ya. A., Ivanyuk G. Yu., Bazai A. V., Yakovenchuk V. N. et al. REE mineralogy and geochemistry of the Western Keivy peralkaline granite massif, Kola Peninsula, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 82. pp. 181–197.
24. Kalinnikov V. T., Nikolaev A. I., Gerasimova L. G. Kola chemical technology cluster to solve ecological and economical problems in Russia's Arctic. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo porydka*. 2014. No. 3(40). pp. 27–31.

