

УДК 553.04:553.493(5+6)(470.2)

Быховский Л.З., Пикалова В.С. (ФГУП «ВИМС»)

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ — ОСНОВА СОЗДАНИЯ ЦЕНТРА РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРАНЫ¹

*Северо-Западный регион России располагает уникальной минерально-сырьевой базой многих редких металлов. Основная их часть заключена в рудах комплексных месторождений, расположенных в пределах Мурманской области. Редкометалльная продукция производится только из руд двух объектов: Ловозерского и Ковдорского месторождений. При освоении других месторождений региона редкие металлы до последнего времени не извлекались. Тем не менее, есть все предпосылки для создания на Северо-Западе страны на базе ныне разрабатываемых и перспективных разведанных месторождений редкометалльного промышленного центра, который полностью обеспечит внутреннюю потребность в редких землях, тантале, стронции и частично — в ниобии, цирконии, литии, бериллии. **Ключевые слова:** редкие металлы, редкоземельные металлы, тантал, ниобий, цирконий, литий, комплексные месторождения, первоочередные задачи ГРП, перспективы освоения, редкометалльный промышленный центр.*

Byhovskiy L.Z., Pikalova V.S. (VIMC)

MINERAL RESOURCES OF RARE METALS OF THE NORTH-WEST OF RUSSIA — THE BASIS OF CREATION OF THE REDKOMETALLNY CENTER OF THE INDUSTRY OF THE COUNTRY

*The North-Western region of Russia has a unique mineral resource base of many rare metals. The main part enclosed in complex ores of deposits Murmansk region. Rare metal products made only from the ores of two objects: the Lovozero and Kovdor deposits. Until recently during the development of other fields in the region rare metals was not extracted. However, there are all prerequisites for the creation industrial center of rare metals on the country's North-West, which will be based on the current emerging and promising explored deposits and will fully satisfy the domestic demand for rare-earth metals, tantalum, strontium and partly — in niobium, zirconium, lithium, beryllium. **Key words:** rare metals, rare-earth metals, tantalum, niobium, zirconium, lithium, complex deposits, priority tasks of exploration prospects of development, industrial center of rare metals.*

Россия — одно из крупнейших государств мира по созданному минерально-сырьевому потенциалу практически всех видов стратегических редких металлов

(РМ)². За исключением рения, германия и скандия на Северо-Западе РФ сосредоточена значительная часть запасов стратегических редких металлов (табл. 1). В составе Северо-Западного федерального округа (СЗФО) богатством имеющихся природных ресурсов РМ выделяется Мурманская область. На ее территории расположены такие известные месторождения, как Ловозерское (Ti, Ta, Nb, TR) с прилегающим участком Аллуайв (TR, Zr, Ta, Nb), Хибинская группа месторождений (Nb, Sr, Al, TR, P), Ковдорское (Zr, P, Fe), Колмозерское (Be, Li) и др. (рис. 1).

Единственное в стране Ловозерское месторождение лопаритовых руд, разрабатываемое на редкоземельные металлы (РЗМ), тантал и ниобий, расположено в Мурманской области. В нем сосредоточено РЗМ — 15,4 %, Nb₂O₅ — 17,7 % и Ta₂O₅ — 22,9 % от общероссийских запасов кат. А+В+С₁. Руда месторождения характеризуется следующим химическим составом (%): 0,018–0,027 Ta₂O₅; 0,20–0,46 Nb₂O₅; 0,7–1,7 TR₂O₃; 0,07 SrO; 1,70–2,31 TiO₂. В лопарите содержится 31,76 % РЗМ преимущественно цериевой группы, 8,7 % Nb₂O₅, 0,61 % Ta₂O₅ и 39,64 % TiO₂. Руды месторождения комплексные и кроме основных элементов (Ta, Nb, TR) содержат также титан и стронций [1].

Месторождение разрабатывается ООО «Ловозерский ГОК». Добытая руда поступает на обогатительную фабрику, где из нее производится лопаритовый концентрат. Химико-металлургическая переработка концентрата ведется на Соликамском магниевом заводе по хлорной технологии с получением соединений РЗМ, тантала, ниобия и титана.

В настоящее время Ловозерский ГОК работает на 1/4 проектной мощности с низкими показателями экономической эффективности, обусловленными его расположением на Крайнем Севере, трудными горнотехническими условиями, преимущественно подземной отработкой, сложной технологией обогащения руд и пр. В результате реализации программы по обновлению устаревшего оборудования и изменению технологии добычи руд в ближайшие годы планируется добыча руды до 500 тыс. т в год, из которой может быть получено около 3300 т РЗО, 870 т Nb₂O₅ и 70 т Ta₂O₅ [7]. В составе лопаритового концентрата РЗМ относятся преимущественно к цериевой группе, доля металлов иттриевой группы составляет около 2 %.

В перспективе растущие потребности в редких металлах могут быть удовлетворены за счет дополнительного освоения новых участков Ловозерского массива. Так при отработке эвдиалитовых руд участка Аллуайв при аналогичной (500 тыс. т) производительности может быть получено около 1700 т РЗО (доля TR_v — 30 %) и 12 тыс. т ZrO₂ в концентратах.

¹ По материалам доклада на IV Международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее». Россия, г. Кировск Мурманской обл., 20–21 ноября 2014 г.

² К стратегическим редким металлам распоряжением Правительства России № 50-р от 16.01.1996 г. отнесены: тантал, ниобий, цирконий, иттрий и лантаноиды иттриевой группы, скандий, бериллий, литий, германий, рений.

Таблица 1

Значение Северо-Запада России в запасах и добыче редких металлов страны

РМ / всего балансовых м-ний (из них разрабатываемых)	% к запасам (А+В+С ₁) РФ	% к запасам (А+В+С ₁ +С ₂) РФ	% к добыче РФ	Крупные месторождения
Редкие земли / 9 (8)	71,7	71,2	100	Ловозерское, Коашвинское, Юкспорское и др.
Ниобий / 7 (3)	21,3	32,2	100	Ловозерское
Тантал / 6 (2)	25,9	16,6	100	Ловозерское
Ванадий / 7 (-)	5,8	4,0	—	Юго-Восточная Гремяха
Цирконий / 2 (1)	19,4	39,2	99,2	Ковдорское
Литий / 3 (-)	41,7	34,0	—	Колмозерское
Бериллий / 3 (-)	15,1	12,2	—	Полмостундровское
Галлий / 12 (7)	89,9	89,7	—	Коашвинское и др. апатит-нефелиновые, Иксинское, Верхнее Щугорское
Цезий / 8 (7)	3,7	6,0	—	Кукисвумчоррское, Юкспорское, Коашвинское и др.
Рубидий / 8 (7)	57,7	54,0	78,5	
Стронций / 8 (7)	—	96,6	98,0	

Запасы Ta₂O₅, Nb₂O₅ и РЗМ в лопарит-эвдиалитовых рудах данного участка учтены Госбалансом РФ. Запасы TR₂O₃ учтены только в лопарите. Разработанные ранее технологии обогащения руд позволяют получить эвдиалитовый, лопаритовый, эгириновый и полевошпатовый концентраты. Для подтверждения промышленной значимости объекта в современных условиях необходимо доизучение обоих типов руд с разработкой технологии получения товарной циркониевой, редкоземельной и другой редкометаллической продукции. При этом надо учесть то обстоятельство, что если циркон — дефицитный в настоящее время в России материал, то потребность в цирконии, который может быть получен из эвдиалита, значительно ниже. Это связано с тем, что более 85 % производимого циркониевого сырья используется в минеральной форме в виде циркона (в производстве строительной и сантехнической керамики, огнеупоров, литейном производстве), около 10 % — в виде диоксида циркония и различных его соединений (при получении высокоогнеупорных изделий, жаростойких эмалей, тугоплавких стекол и др., а также в волоконной оптике) и только 5 % приходится непосредственно на металл и сплавы (используется в ядерных реакторах для покрытия ТВЭЛов, из сплавов изготавливают медицинское оборудование, а также имплантанты и нити для нейрохирургии).

Вторым разрабатываемым объектом является коренное бадделейтсодержащее комплексное Ковдорское месторождение (Мурманская обл.). Запасы ZrO₂ составляют 1167,5 тыс. т кат. А+В+С₁

(19,4% России) и 1168,5 тыс. т кат. С₂ [4].

Бадделейтовый концентрат, единственным в мире производителем которого является ОАО «Ковдорский ГОК», используется в процессе выпуска абразивов, огнеупоров, электроники, тонкой керамики, пигментов и красителей. В 2013 г. на месторождении добыто 18,1 млн. т товарных апатит-магнетитовых руд, из которых попутно с основной продукцией получено 7526 т бадделейтового концентрата (98,44 % ZrO₂). Еще 864,6 т концентрата произведено при переработке лежалых

«хвостов» мокрой магнитной сепарации (Ковдорское техногенное месторождение). Всего комбинатом выпущено около 8400 т бадделейтового концентрата, основная часть (95 %) которого экспортируется за рубеж (в Японию, США, европейские страны), и только около 5 % поставляется на внутренний рынок. Большая часть потребности российских предприятий в циркониевом сырье удовлетворялась за счет импорта из Украины.

Другие разрабатываемые месторождения, одним из компонентов руд которых являются редкоземельные металлы, — месторождения Хибинского массива (Мурманская обл.). Доля балансовых запасов РЗМ восьми Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд (Юкспор, Кукисвумчорр, Апатитовый Цирк, Плато Расвумчорр, Коашва, Ньюркпакх, Олений Ручей и Партомчорр) составляет около 57 % от общероссийских. ОАО «Апатит» разрабатывает первые шесть из перечисленных месторождений. В 2013 г. из них добы-

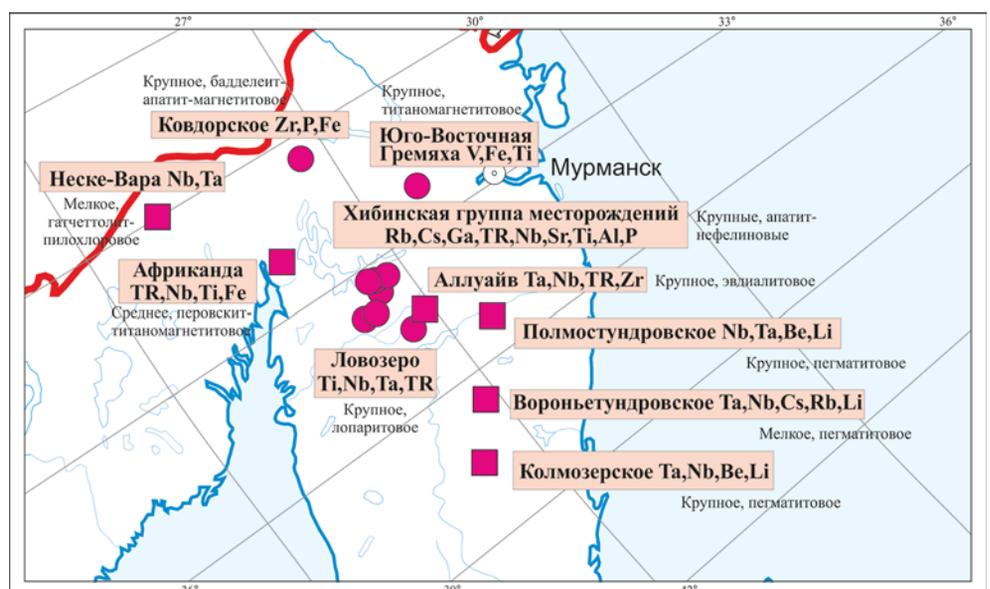


Рис. 1. Ресурсная база редких металлов Карело-Кольского региона

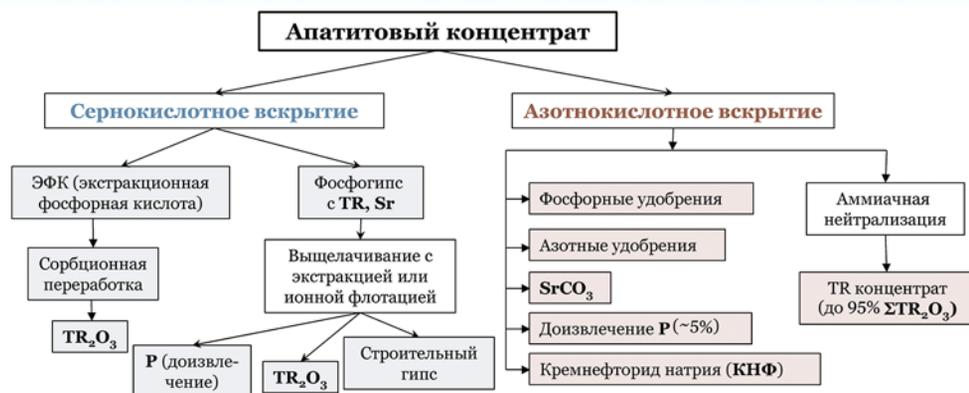


Рис. 2. Технологии переработки апатитового концентрата

то 26 млн. т руды, содержащей 88,6 тыс. т РЗМ. Редкие земли являются попутным компонентом, их содержание в руде — 0,3 %, в апатитовом концентрате ~1 %. Добытые руды перерабатывались на обогатительных фабриках с получением апатитового и нефелинового концентратов. При переработке апатитовых концентратов (8 млн. т/год) редкоземельные металлы и стронций в настоящее время не извлекаются. При этом РЗМ в апатитовых концентратах — именно те металлы и их соединения (Nd, Eu, Tb, Dy, Er, Y), которые пользуются наибольшим спросом в сфере высоких технологий и имеют большую цену на мировом рынке. Доля иттриевых земель составляет 10–12 %.

Два оставшихся месторождения — Олений Ручей и Партомчорр в настоящее время подготавливает к промышленному освоению ЗАО «Северо-Западная Фосфорная компания». Месторождение Олений Ручей разрабатывается, причем в 2013 г. добыча составила 2,7 млн. т руды. К концу 2014 г. планируется выход ГОКа на проектную мощность — 1 млн. т/год апатитового концентрата, а после завершения строительства подземного рудника — 2 млн. т/год (2018 г.). По состоянию на 01.10.2014 г. предприятием добыто 2,3 млн. т руды, из которой получено 630 тыс. т апатитового концентрата. Переработка последнего осуществляется на предприятиях Группы «Акрон». РЗМ пока не извлекаются.

Для вскрытия хибинского апатитового концентрата, содержащего около 1 % РЗО, в России используют две основные технологические схемы — серно- и азотнокислотную (рис. 2). Значительную часть (~80 %) апатитовых концентратов перерабатывают на минеральные удобрения по сернокислотной технологии, отходом производства которой и концентратом ~50 % РЗМ является фосфогипс (0,5–0,6 % ΣРЗО). Остальная часть редких земель переходит в минеральные удобрения [7].

С целью одновременного получения фосфорных и азотных удобрений все шире применяется разложение фосфатов азотной кислотой, которая входит составной частью в конечный продукт. По этой технологии перерабатывается ~15 % апатитовых концентратов. При этом выделение редкоземельных металлов происходит в одном технологическом процессе с переработкой апатита в удобрения, т.е. с максимально низкими затратами и с минимальными отходами и более высоким по сравнению с сернокислотной технологией извлечением

РЗМ — 55–60 % в конечный продукт. Имеющиеся в России мощности нитратного вскрытия контролируются ОАО «Акрон», ОАО «Уралхим» и ОАО «Россошанские удобрения». В настоящее время строятся опытные установки по переработке апатита на удобрения с попутным извлечением редкоземельных металлов: в Великом Новгороде для азотнокислотной технологии мощностью 200 тыс. т РЗМ в год, а в Кирово-Чепецке —

для сернокислотной с извлечением РЗМ из ЭФК мощностью 12 т в год.

При комплексной переработке планируемых на ближайшие годы объемов выпуска апатитового концентрата (8,5–9 млн. т) возможно произвести около 36–39 тыс. т РЗО (при расчетах извлечение принимается равным 60 % при азотнокислотной технологии переработки и 40 % — при сернокислотной) и 62–66 тыс. т Sr_2O_3 . Это позволит полностью покрыть как существующие, так и прогнозируемые к 2020 г. потребности России в данной продукции и выйти с ней на мировой рынок.

В нефелин-apatитовых месторождениях также утверждены запасы галлия, цезия и рубидия в нефелине, ниобия и титана в сфене. Галлий и рубидий извлекались в незначительных количествах при переработке нефелинов на Пикалевском глиноземном заводе [2].

Запасы лития СЗФО связаны с редкометалльными пегматитами: Колмозерское, Полмостундровское и Вороньтундровское месторождения (Мурманская обл.), на долю которых приходится около 35 % общероссийских запасов кат. А+В+С₁+С₂ [6]. Наиболее крупным и перспективным является собственно литиевое месторождение сподуменовых пегматитов Колмозерское. Оно находится в нераспределенном фонде и включает 23,7 % российских балансовых запасов лития кат. А+В+С₁+С₂ при содержании Li_2O — 1,14 %. Попутные полезные компоненты — бериллий, тантал, ниобий, рубидий. Месторождение детально разведано, 65 % запасов может быть отработано открытым способом, но требуется совершенствование технологии переработки руд. При производительности 750 тыс. т руды в год количество редких металлов, извлекаемых в конечную товарную продукцию, может составить около 2 тыс. т Li_2O , что полностью удовлетворит современную и более половины прогнозируемой на 2020 г. потребности в нем России, а также до 30 т Ta_2O_5 , 40 т Nb_2O_5 , 50 т BeO [5]. Поэтому, хотя месторождение и находится в экономически неосвоенном районе, оно является наиболее предпочтительным среди балансовых месторождений литиевых руд для первоочередного освоения.

В 60 км к северо-западу от Колмозера располагается второе месторождение сподуменовых пегматитов — Полмостундровское. По содержанию лития оно явля-

ется самым богатым балансовым месторождением в России (1,25 % Li_2O), по запасам — среднее. Попутно с литием из руд могут быть извлечены бериллий, тантал и ниобий. Для определения перспектив освоения месторождения в современных условиях необходима геолого-экономическая и технологическая переоценка.

В 2 км от Полмстундровского месторождения находится Вороньтундровское месторождение редкометалльных пегматитов, основными полезными компонентами руд которого являются тантал (Ta_2O_5 — 0,0298 %), цезий (Cs_2O — 0,39 %) и литий (Li_2O — 0,896 %), а попутными — бериллий и рубидий. По запасам тантала и лития месторождение мелкое, но с богатыми рудами (по танталу). Руды труднообогатимые. Месторождение может обрабатываться карьером до глубины 100 м. При мощности ГОКа в 100 тыс. т руды в год может быть получено около 15 т Ta_2O_5 и 300 т Li_2O в концентратах. Перспективы месторождения в современных условиях могут быть определены в результате переоценки, но в первую очередь они будут связаны с танталом.

Еще одно месторождение ниобиевых руд, учтенное государственным балансом, — Неске-Вара, которое расположено в Мурманской области. Попутными редкими металлами являются тантал и цирконий. Месторождение по запасам мелкое (доля запасов от общероссийских Nb_2O_5 — 0,1 %, запасов Ta_2O_5 — 0,06 % по кат. А+В+С₁+С₂), по ниобию — малоперспективное, извлечение попутных полезных компонентов неэффективно.

Также в Мурманской области учитывается титаномагнетитовое месторождение Юго-Восточная Гремяха с запасами V_2O_5 кат. А+В+С₁ — 467,1 тыс. т, кат. С₂ — 116,1 тыс. т, забалансовыми — 154,5 тыс. т. При ежегодной переработке 3 млн. т руды месторождения могут быть получены 360 тыс. т чугуна, 200 тыс. т титанового и 10 тыс. т ванадиевого шлаков.

Другой потенциальный источник ванадия — месторождение уран-ванадиевых руд Средняя Падма, расположенное в Онежском прогибе (Республика Карелия). Запасы V_2O_5 кат. А+В+С₁ составляют 58,8 тыс. т, кат. С₂ — 48,9 тыс. т, забалансовые — 33,0 тыс. т. Кроме ванадия в рудах месторождения обнаружен рений, автюрские запасы которого определены в 459 кг.

Нетрадиционными источниками редкометалльного сырья Северо-Запада России являются месторождения Сахарйок и Африканда (Мурманская обл.) [3].

Прогнозные ресурсы кат. Р₁ полезных компонентов месторождения бритолитовых руд Сахарйок оцениваются в следующих количествах: $\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$ — 160 (в т.ч. Y_2O_3 — 26,3) тыс. т, ZrO_2 — 330 тыс. т при содержании 1,074 % ZrO_2 и 0,03 % Y_2O_3 . На месторождении проведены поисково-оценочные работы, требуется технологическая переоценка.

Месторождение Африканда перовскит-титаномагнетитовых руд детально разведано и подготовлено к освоению: в 1950-х годах была начата его опытно-промышленная отработка, впоследствии остановленная из-за недостаточной радиационной безопасности технологического процесса глубокого передела [9]. В последние годы Кольским научным центром были разработаны инновационные технологии обогащения руд и химико-металлургического передела концентратов, по одной из которых при переработке 45 тыс. т перовскитового концентрата в год возможен выпуск 20 тыс. т пигментного TiO_2 , 600 т Nb_2O_5 , 13–16 т Ta_2O_5 и до 900 т карбонатов редких земель (в основном цериевой группы).

В настоящее время месторождение рассматривается ИХТРЭМС КНЦ РАН в качестве одного из перспективных для освоения, а удобное расположение вблизи Октябрьской ж/д и Кольской АЭС дополнительно повышает его инвестиционную привлекательность.

Возможный объем производства редкометалльной продукции при освоении действующих и перспективных месторождений Северо-Запада России (табл. 2) позволяет полностью удовлетворить современную и перспективную потребности страны во многих из рассматриваемых видах продукции. Максимальная прогнозируемая к 2020 г. потребность России в оксидах редких земель составляет 15 тыс. т (реальная — 5–7 тыс. т). При извлечении из хибинских апатитовых концентратов, перерабатываемых только по азотнокислотной технологии, может быть получено ~8 тыс. т РЗО. Учитывая имеющееся производство 2 тыс. т из лопаритовых концентратов (с перспективой роста в ближайшие годы до 3,3 тыс. т) для полного удовлетворения внутренней потребности достаточно будет извлечь из экстракционной фосфорной кислоты или фосфогипса 3,7–5 тыс. т РЗО. Освоение же всех перечисленных сырьевых объектов с комплексной переработкой концентратов позволит выйти на мировой рынок с объемом экспорта, превышающим 30 тыс. т РЗО (емкость мирового рынка к 2020 г. — 150–200 тыс. т).

Прогнозируемая к 2020 г. потребность в тантале (до 100 т) и стронции (10 тыс. т) также может быть полностью удовлетворена за счет освоения месторождений

Таблица 2
Потенциальный объем производства редких металлов на основе МСБ СЗФО

Месторождение	Выпуск товарной продукции, т/год					Примечание
	$\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$	Nb_2O_5	Ta_2O_5	ZrO_2	другие	
Ковдорское	—	—	—	8000	—	При сохранении мощности 2012 г.
Ловозерское	3300	870	70	—	—	При увеличении объема добычи до 500 тыс. т руды
Хибинская группа	39000	—	—	—	Sr_2O_3 — 66000	При комплексной переработке 9 млн. т апатитового концентрата
Аллуйв	1700	—	—	12000	—	При добыче 500 тыс. т эвдиалитовых руд
Колмозерское	—	40	30	—	Li_2O — 2000 BeO — 50	При добыче 750 тыс. т руды
Африканда	500	600	15	—	—	При переработке 45 тыс. т перовскитового концентрата
Итого	44500	1510	115	20000		

Кольского полуострова с наличием дополнительных экспортных возможностей.

Максимальный спрос в России на ниобиевую продукцию к 2020 г. может составить до 20 тыс. т Nb_2O_5 (реально не более 5 тыс. т), в т.ч. до 18 тыс. т в виде феррониобия и до 2 тыс. т в виде Nb_2O_5 . Последний большей частью может быть покрыт продукцией сырьевых объектов СЗФО. Такая же ситуация с цирконием: потребность в диоксиде и других соединениях циркония и в чистом металле может быть полностью удовлетворена за счет получения их из эвдиалитового концентрата месторождения Аллуайв. Потребность в литии (до 3,5 тыс. т Li_2O к 2020 г.) наполовину покрывается за счет освоения Колмозерского месторождения.

В заключение можно наметить первоочередные задачи по доизучению и геолого-экономической переоценке редкометалльных месторождений Северо-Запада России:

1. Ловозерское месторождение многие годы было и остается флагманом отечественной редкометалльной промышленности. Для сохранения этого статуса необходима геолого-экономическая переоценка всего месторождения, включающая все участки развития лопаритовых, лопарит-эвдиалитовых и эвдиалитовых руд: Карнасурт, Умбозеро, Кедыквырпахк, Аллуайв (включая Сенгийок), Сенгисчорр, Ангвундасчорр и др. Вместе с тем, учитывая, что часть запасов месторождения (~19 %) находится в распределенном фонде (отдельные горизонты участков Карнасурт и Кедыквырпахк) в первую очередь необходимо переоценить эвдиалитовые и эвдиалит-лопаритовые руды участка Аллуайв, разработать ТЭО разведочных кондиций для подсчета запасов и утвердить их в ГКЗ. В новых кондициях в число параметров следует дополнительно включить: «подсчитать запасы ZrO_2 , TR_2O_3 , Ta_2O_5 и Nb_2O_5 в эвдиалитах».

2. Месторождение Африканда перовскит-титаномагнетитовых руд (Ti, TR, Nb, Ta) детально разведано в 1950-х годах, но в 1970-х было снято с баланса. Необходимо его переоценка, разработка разведочных кондиций, подсчет и утверждение запасов. Только после этого можно будет приступить к проектированию его освоения.

3. Разведанные комплексные редкометалльные пегматиты — Полмостундровское (Nb, Ta, Be, Li) и Колмозерское (Ta, Nb, Be, Li), Вороньтундровское (Ta, Be, Cs) — также нуждаются в геолого-экономической переоценке, т.к. их запасы были утверждены более 40–50 лет тому назад.

4. Хибинские нефелин-апатитовые месторождения могут стать крупнейшим производителем редких земель (в т.ч. иттриевой группы), стронция (из апатитовых концентратов), титана и ниобия (из сфеновых), галлия, рубидия и цезия (из нефелиновых). Большинство месторождений редких металлов — комплексные. Так, при извлечении редких земель из апатитовых концентратов будет извлекаться и стронций (в 3 раза больше, чем TR). Проблема его реализации весьма актуальна.

5. Важнейшая задача — маркетинг всей гаммы выпускаемой продукции комплексных месторождений, а так как реальная потребность в редких металлах

в РФ, к сожалению, отсутствует, эта задача становится трудновыполнимой.

Таким образом, следует еще раз подтвердить мнение Правительства Мурманской области и специалистов Кольского научного центра РАН о целесообразности создания центра редкометалльной промышленности в Мурманской области, располагающей достаточной минерально-сырьевой базой редких и в первую очередь редкоземельных металлов, развитой транспортной и энергетической инфраструктурой, высококвалифицированными научными и производственными кадрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б. Руды редкоземельных металлов России // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — М.: ВИМС, 2006. — № 19. — С. 72.
2. Быховский Л.З., Ануфриева С.И., Орлова Н.И. Современное состояние комплексной изученности и использования попутных компонентов Хибинских апатитовых месторождений / Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее: Сб. докладов II Междунар. конф. — Мурманск, 2013. — С. 31–32.
3. Быховский Л.З., Кудрин В.С., Тигунов Л.П. и др. Нетрадиционные источники получения титана и редких металлов. — М., 2003.
4. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2012 г. / Под ред. Д.Г. Храмова. — М.: Центр «Минерал» — ФГУНПП «Аэрогеология», 2013. — С. 346.
5. Карпузов А.Ф., Лебедев А.В., Житников В.А., Коровкин В.А. Минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — М., 2008. — С. 66–80.
6. Кременецкий А.А., Архипова Н.А., Усова Т.Ю. Редкие металлы России: минерально-сырьевая база, освоение, производство, потребление / Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность: Матер. Всерос. науч.-практ. совещ. с международным участием. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — С. 61–64.
7. Машковцев Г.А., Быховский Л.З. Редкие земли в комплексных месторождениях твердых полезных ископаемых / Редкоземельные элементы: геология, химия, производство и применение: Тез. Междунар. конф. РЕЕ-2012. — М., 2012. — С. 105–106.
8. Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Рогожин А.А., Темнов А.В. Перспективы рационального освоения комплексных тантал-ниобий-редкоземельных месторождений России // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 6. — С. 9–12.
9. Николаев А.И. Перспективы использования Африкандского месторождения перовскитовых руд как сырьевой базы для обеспечения отечественной промышленности стратегическими материалами, содержащими титан и редкие металлы // Север промышленный. — 2007. — № 8. — С. 62–64.

© Быховский Л.З., Пикалова В.С., 2015

Быховский Лев Залманович // lev@vims-geo.ru
Пикалова Варвара Сергеевна // pikalova@vims-geo.ru

УДК 550.839

Мезенцева А.Е. (ООО «ВНИИ-1»)

ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЧИСЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЦЕЛЬЮ ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Статья посвящена проблеме локального прогнозирования оруденения, возможности ее решения в сфере нелинейной динамики фазового и геометрического пространств числовых переменных. Исследованы месторождения золота и серебра Северо-Востока РФ посредством метода фазовых траекторий, адаптированного к геологическим задачам, в системе «поляризуемость — магнитная