

Однако если задаться содержанием никеля в концентрате 15%, то теоретически возможно получить извлечение в концентрат на уровне 88%. В таком концентрате имеет место существенное разубоживание, поскольку он будет включать в себя зерна с долей пентландита от 0 до 25% масс. и 25–50% масс.

Расчетные результаты показывают, что повышение содержания никеля в концентрате приводит к резкому снижению извлечения и неэффективно. Доизмельчение до тонких классов -24+20мкм может повысить извлечение в концентрат на 10–12%.

## **Выводы**

Методика минералогического моделирования может быть применена для оценки технологических свойств руд различного состава.

Минералогическому моделированию предшествует скрупулезная работа по изучению вещественного состава руды в аншлифах и изучения химического состава минералов методом микрорентгеноспектрального анализа. Последнее необходимо для контроля минералогического анализа посредством сравнения данных химического состава сырья, рассчитанных теоретически и полученных непосредственно из химической лаборатории.

Изучение раскрытия главных рудных минералов позволяет по теоретическим данным обоснованно подойти к выбору рациональной крупности первичного измельчения руды.

Представленная методика позволяет рассчитывать идеальные минералогически лимитированные показатели обогащения руд. Безусловно, результаты практических испытаний по конкретным схемам будут ниже, чем теоретические показатели. Однако, если практическая кривая содержания/извлечения находится ниже теоретической кривой, но в целом повторяет ее, выбранную схему обогащения и ее параметры следует считать оптимальной. В том случае, если теоретическая и практическая кривые окажутся разнонаправленными, следует откорректировать либо саму схему обогащения, либо параметры схемы (реагентный режим, введение дополнительных перечисток и т. д.) [2,3].

В настоящее время имеется опыт применения данной методики для медно-никелевых руд по усовершенствованию схемы переработки и комплексных медно-железных руд, для которых разрабатывается новая схема обогащения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Максимов В.И., Козырев С.М., Лялинов Д.В. Выполнение минералого-технологического анализа продуктов, отобранных при Генеральном опробовании ТОФ, с целью разработки рекомендаций по повышению качества концентратов и снижению потерь металлов. /Отчет НИР ОАО «Институт Гипроникель», СПб, 2003, 207с
2. Ламберг П., Лишо Ю. Использование анализа изображения при моделировании флотации сульфидных медно-никелевых руд / Обогащение руд — Цветные металлы, № 6, 2001 г., сс. 44–47.
3. Сотка П., Ламберг П. Прикладная минералогия в обогащении полезных ископаемых / Обогащение руд — Цветные металлы, № 6, 2001 г., сс. 33–36.

## **ИЗУЧЕНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ РУД НА СТАДИИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ**

*Бубнова Т.П., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В.*

ИГ Кар.НЦ РАН, г.Петрозаводск, [bubnova@krc.karelia.ru](mailto:bubnova@krc.karelia.ru)

При рассмотрении геологического объекта (месторождения) на стадии поисково-оценочных работ основное внимание уделяется всестороннему изучению его геологических характеристик и минералогических особенностей с построением геолого-технологической модели, чтобы получить необходимые исходные данные для составления технико-экономического обоснования на проведение последующей стадии работ. Технологическая минералогия играет в этом процессе ведущую роль, давая ответ на практический вопрос о типоморфных особенностях минералов (целая гамма необходимых параметров химических, физических и механических свойств в зависимости от поставленных задач, что позволяет сделать выбор наиболее оптимальной схемы обогащения минерального сырья.

Технологическая минералогия имеет дело с выражением вышеупомянутых свойств в количественном выражении. Таким образом, после всестороннего анализа объекта появляется возможность оценить его перспективы на стадиях, предшествующих геологоразведочным работам.

В своей обобщающей работе В.М.Изоитко обобщила факторы, непосредственно влияющие на технологический процесс [1]:

- качественно-количественный состав исходной руды;
- структурно-текстурные особенности
- физические свойства;
- состав самих минералов;
- форма нахождения полезных компонентов;
- присутствие минералов, близких по свойствам, используемым в технологии обогащения;
- наличие «активных» минералов (легко растворимых или сильно сорбирующих реагенты и тонкораздробленных).

Немаловажно изучение характеристик, не влияющих непосредственно на процесс переработки, но определяющих типоморфные особенности руд и минералов и сказывающихся через факторы первой группы на технологических процессах:

- унаследованность состава руд от вмещающих пород,
- характер и степень тектонической деятельности (крепость и степень ошламования руд, окисленность поверхности минералов и др.).

В лаборатории геологии, технологии и экономики минерального сырья Института геологии проводятся многоплановые работы по изучению промышленных минералов Карелии на стадиях, предшествующих поисковым или разведочным работам. В последние годы технолого-минералогические исследования охватывали ряд новых и перспективных объектов. Среди них можно отметить месторождения и проявления промышленных минералов Тикшеозерско-Елетьозерского раннепротерозойского щелочного интрузивного комплекса (Лоухский район) – апатитсодержащие карбонатиты и пироксениты, нефелиновые сиениты, оливиниты. На территории Лоухского рудного района также изучались анортозиты Котозерского массива, мусковитовые кварциты, гранатсодержащие породы архейской зеленокаменной Хизоваарской структуры. На основе исследований промышленных минералов выявляются области нетрадиционного их использования, что расширяет сферу возможного потребления.

При рассмотрении геологического объекта (месторождения) в плане его последующего промышленного освоения, первостепенное внимание уделяется изучению *качественно-количественного состава*. Соответственно, устанавливаются закономерные количественные связи между *вещественным составом* и показателями переработки. Наглядно это представляется в виде таблиц, диаграмм, графиков. Наличие зависимостей подтверждается корреляционным анализом, а привлечение методов математической статистики позволяет установить и выразить в виде уравнений зависимость между изучаемыми факторами и прогнозировать, соответственно, технологические параметры. В качестве примера такого подхода можно рассмотреть апатитсодержащие карбонатиты Тикшеозерского массива, поскольку для этого объекта накоплен достаточно большой объем данных по вещественному составу. На рисунке 1 показана определенная взаимосвязь между основными породообразующими оксидами и технологическими показателями.

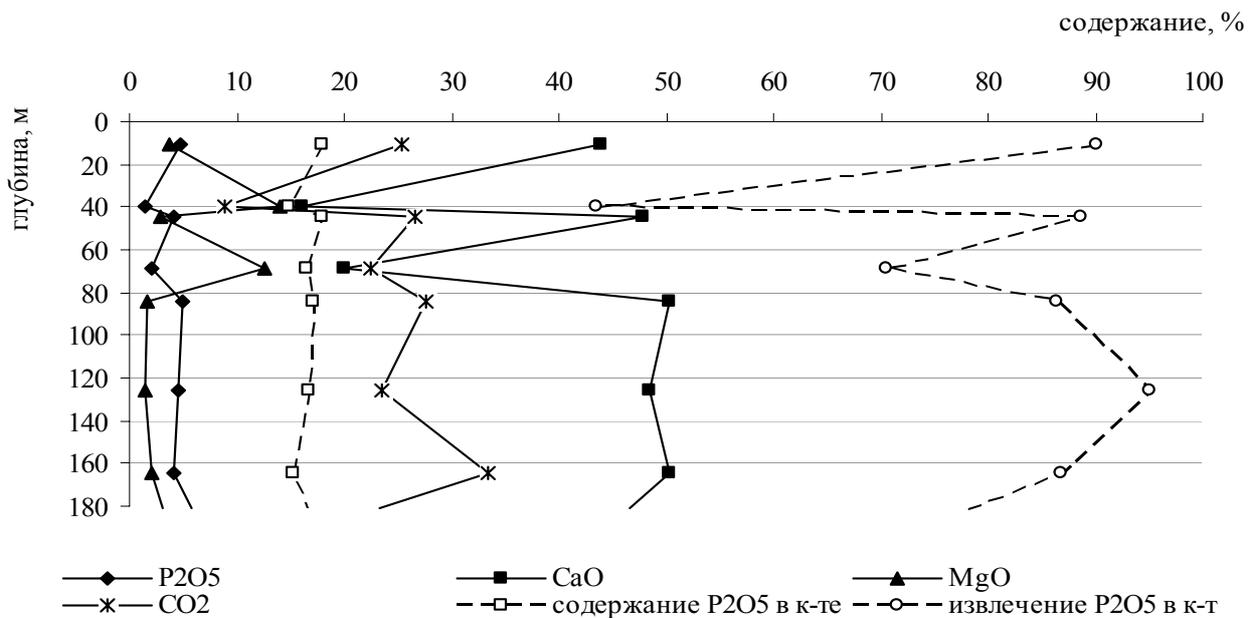


Рис. 1 Вариации содержания породообразующих оксидов и технологических показателей апатитсодержащих карбонатитов Тикшеозерского массива (скв.146)

Результаты факторного анализа при изучении апатитсодержащих карбонатитов Тикшеозерского массива представлены в виде распределения всех проб в плоскости первых двух главных компонент (рис. 2). Исходный массив данных состоит из количественных показателей химического состава породы и показателей технологического передела. В данном случае после математической обработки возможно выделение двух групп проб, располагающихся в пределах влияния различных факторов.

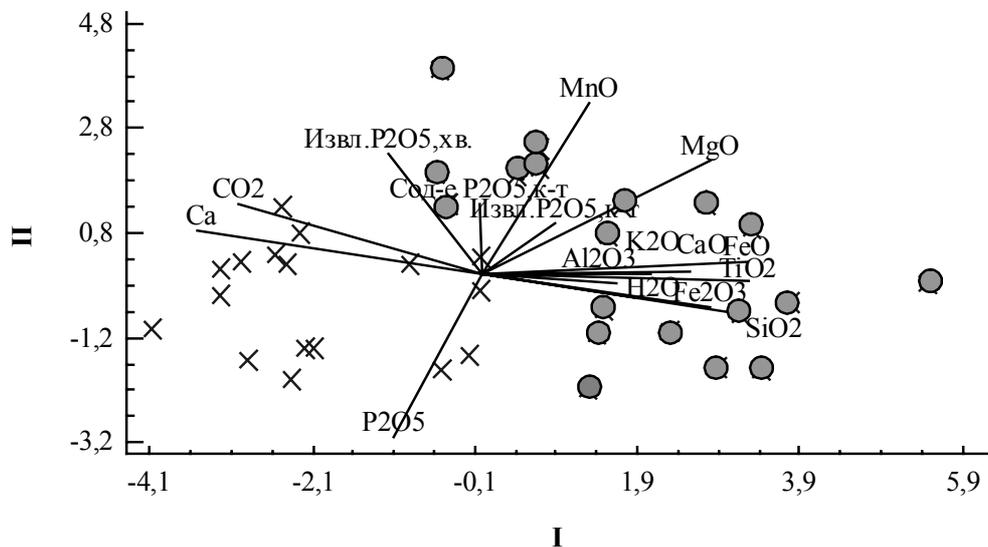


Рис. 2. Классификация апатит-карбонатитовых проб по вещественному составу и технологическим показателям в плоскости I-II главных компонент

При попытке составления статистической модели для отдельных технологических показателей можно использовать уравнения прогнозирования различных видов (линейной регрессии – простые и многофакторные, нелинейной – полиномиальные, логарифмические и др.) с использованием прикладной программы STATGRAPHICS Plus (Version 5). В качестве независимых переменных вводились значения содержаний оксидов в исходной руде. Исследование связи между извлечением апатита в концентрат и содержанием  $P_2O_5$  в исходной породе показало, что в целом по массиву ни один вид уравнения не удовлетворяет требованиям прогнозирования (табл. 1). Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) слишком низок и вследствие недостаточной информационной способности модели, использование ее нецелесообразно. При составлении же уравнений прогнозирования для выделенных групп проб возможно построение статистически значимых моделей в 90% доверительном интервале.

Таблица 1

Уравнения прогнозирования извлечения апатита из различных групп апатит-карбонатитовых проб

Группа проб	Номер уравнения	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, $R^2$	Стандартная ошибка прогноза, $\sigma$
1	1	$\varepsilon=634,69-45,82Al_2O_3+17,69Fe_2O_3-48,00FeO-6,56MnO-5,04MgO-10,92CaO+34,32K_2O-15,29P_2O_5+2,56CO_2$	99,98	0,29
2	2	$\varepsilon=205,42-399,93P_2O_5+234,96P_2O_5^2-1,62P_2O_5^3+3,82P_2O_5^4$	67,44	8,24
	3	$\varepsilon=37,66+4,20TiO_2+9,06FeO-90,85H_2O-10,54P_2O_5$	80,01	5,50
Весь массив	4	$\varepsilon=-72,04-0,78SiO_2+55,95TiO_2-0,27Al_2O_3-0,37Fe_2O_3+2,29FeO-103,33MnO+0,59MgO+3,05CaO+22,93Na_2O+3,52K_2O-66,69H_2O-4,83P_2O_5-0,57CO_2$	54,60	9,72

Структурно-текстурные особенности являются одними из главных диагностических и классификационных признаков горной породы и дают представление о степени развития, размерах отдельных минералов и их взаимоотношении между собой.

Так, изучение структурно-текстурных и минералогических особенностей кварц-мусковитовых пород (мусковитовых кварцитов) месторождения Восточная Хизоваара позволяет выделить несколько типов пород, отличающихся по минеральному составу (табл. 2), степени метасоматической переработки и содержанию мусковита:

- I. Слабомусковитизированная порода (рис. 3-а);
- II. Метаандезиты, интенсивно метасоматизированные (рис. 3-б);
- III. Мусковитовые кварциты (рис. 3-в).

Средний минеральный состав основных типов пород

Тип породы	Содержание, %								
	мусковит	биотит	кварц	плаггиоклаз	кианит	сульфиды	турмалин	рутил	ставролит
I	1,35	2,60	58,80	13,90	8,95	6,40	0,15	0,80	0,15
II	14,61	1,84	56,25	14,95	6,35	4,08	0,45	0,52	0,36
III	25,37	0,72	53,11	9,43	7,03	2,93	0,63	0,59	0,08

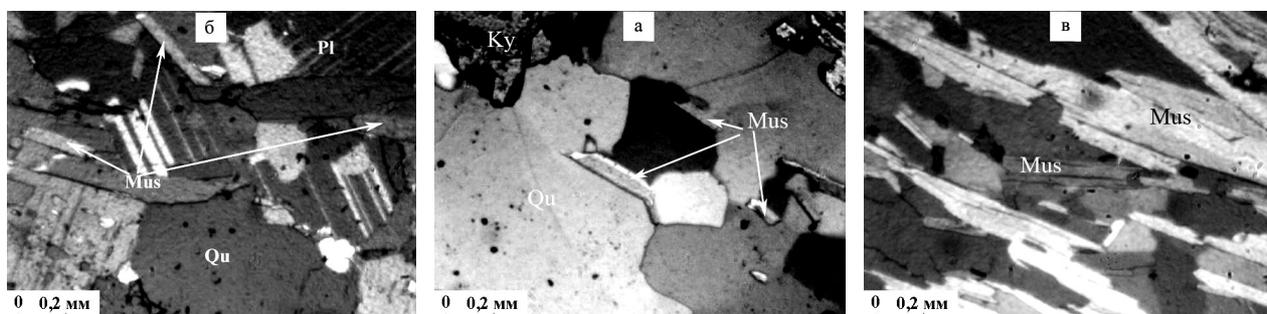
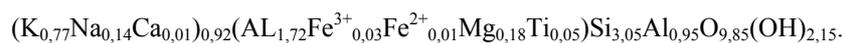


Рис. 3. Текстурно-структурные особенности и вариации минерального состава различных типов мусковит-содержащих пород месторождения Восточная Хизоваара (фото шлифов):

а – I тип: кварц-кианитовая порода с содержанием мусковита 2-3% (николи +), б – II тип: метасоматически измененная порода с содержанием мусковита 5-15% (николи +), в – III тип: мусковитовые кварциты с содержанием мусковита 20-35% (николи +), Mus – мусковит, Ky – кьянит, Qu – кварц, Pl – плаггиоклаз

Изучение структурно-текстурных и минералогических особенностей позволяет установить *форму нахождения полезных компонентов*. С увеличением степени метасоматической переработки породы наряду с изменением минерального состава формируются новые генерации или подвергается определенным воздействиям мусковит первого поколения. Например, биотит замещается мусковитом с выносом железа, образуется переходная ассоциация биотит-мусковит, далее мусковит в значительной степени освобождается от части железа. Новая генерация мусковита представляет собой более крупнозернистую разновидность с равномерной интерференционной окраской. Происходит образование мусковита в локализованных участках в виде линз, гнезд, прослоев. В результате наложенных процессов, оторванных во времени, появляется мусковит со своими типоморфными особенностями. Новые приобретенные свойства мусковита являются фактором (*состав минерала*), который непосредственно влияет на технологический процесс. В целом, мусковит данного объекта характеризуется постоянством состава в отношении основных формульных элементов и значительными вариациями изоморфных элементов. Усредненная кристаллохимическая формула его близка к теоретической и имеет следующий вид:



Получение мусковитового продукта возможно с использованием гравитационного или флотационного методов обогащения. Анализ флотационных концентратов показал существенные вариации содержания окислов железа, марганца магния и кальция для различных типов пород (табл. 3). Повышенное содержание железа отмечается во II типе пород (где содержание мусковита 5-15%), что связано с присутствием переходной разновидности биотит-мусковит (осветленный биотит) в породе, которая попадает в концентрат.

Таблица 3

Химический состав мусковитовых концентратов из различных типов пород

Тип породы	Содержание оксидов, %														Выход мусковитового концентрата
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	ппп	Pb	As	
I	45,73	0,79	31,52	0,36	0,26	0,07	5,96	0,22	0,78	9,64	0,06	4,20	0,00061	<0,001	8,80
II	47,02	0,74	33,77	0,70	0,34	0,04	1,60	0,28	1,02	9,51	0,10	4,52	0,00368	<0,001	12,04
III	47,37	0,61	34,89	0,47	0,14	0,02	1,21	0,07	1,22	9,11	0,19	4,60	0,00292	<0,001	15,58
среднее	47,01	0,70	33,94	0,59	0,26	0,03	1,90	0,20	1,06	9,38	0,13	4,52	0,0031	<0,001	12,86
Кэф. вариации	0,02	0,99	0,03	0,73	0,60	0,78	0,53	0,75	0,21	0,07	0,41	0,07	0,047	<0,001	

Существенное влияние на технологические показатели оказывает характер срastания мусковита с породообразующими минералами. В данном случае благоприятными для обогащения являются параллельные срastания мусковита с кварцем и другими минералами, определяющие слоистую, сланцеватую текстуру.

Физические свойства (оптические, люминесцентные, электрические, термические, механические). Имеют определяющее значение, если минералы обладают ярко выраженной контрастностью свойств (как правило, магнитные, люминесцентные, плотность). В большинстве случаев физико-механические свойства непосредственно влияют на процессы дезинтеграции.

Одним из таких показателей является микротвердость. В отличие от показателя твердости по шкале Мооса (где относительная твердость определяется путём царапания эталоном поверхности испытываемого объекта), микротвердость отражает способность того или иного материала сопротивляться постоянно вдавливаемой нагрузке и является величиной, характеризующих количественную оценку твердости минерала. [2]. Помимо того, микротвердость можно использовать в качестве типоморфного признака при характеристике генетического типа месторождения, генераций минералов и типов руд, изучении истории минеральных индивидов [3].

В связи с тем, что показателем различной степени измельчаемости отдельных минералов является шламообразование, анализ гранулометрического состава продуктов обогащения можно связывать непосредственно с прочностными характеристиками минералов. В целом избыточное образование мелких частиц отрицательно сказывается на дальнейших процессах обогащения, вследствие налипания шламов на частицы полезного компонента. В результате уменьшается селективность разделения. В данном случае анализ изучения результатов опытов обогащения и средней микротвердости кальцита представлен в виде аппроксимирующих графиков (рис. 4). Тренды, проведенные по точкам функций для выхода кальцитового концентрата извлечения кальцита, имеют параболический вид. Нисходящая ветвь графиков может быть связана с недостаточным раскрытием сростков, обладающих большей микротвердостью (соответственно не достигается необходимая тонина помола), что отрицательно сказывается на флотационном процессе, снижая его качество. С увеличением микротвердости кальцита, соответственно, уменьшается его содержание в шламах. Пополнение мелко-размерного продукта происходит за счет менее твердых минералов, которые в большей степени переизмельчаются.

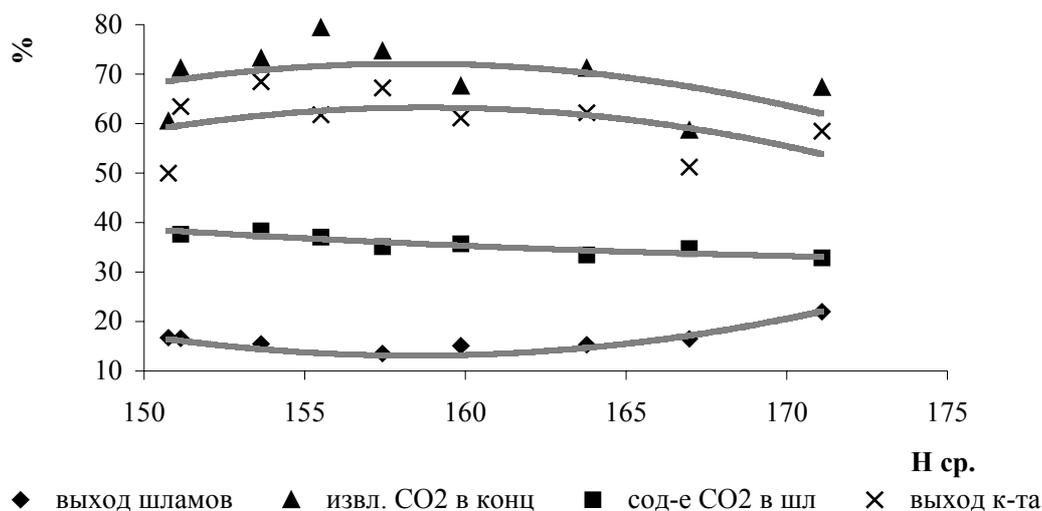


Рис. 4. Зависимость технологических показателей обогащения от средней микротвердости кальцита

Присутствие минералов, близких по свойствам, используемым в технологии обогащения. Проблема их разделения решается подбором оптимальной схемы обогащения, как правило, с использованием флотации.

К одному из востребованных промышленных минералов относится гранат. За последние годы выявлен ряд месторождений и рудопроявлений граната, расположенных, главным образом, в Лоухском районе (северная Карелия). Проявление Высота-181 является одним из таких объектов, для которого определены прогнозные ресурсы в 12 млн. тонн и выполнены работы по изучению обогатимости с наработкой опытных партий гранатовых концентратов. Гранат представляет собой сквозной минерал для практически всех парагенетических ассоциаций данной неоднородной по составу толщи (табл. 4).

Ставролит-кианит-гранатовый и кианит-гранат-сланцевый сланцы характеризуются примерно одинаковой обогатимостью и могут перерабатываться по единой технологической схеме. Присутствие в руде амфиболитов будет резко снижать качество гранатового концентрата. Поскольку в данном случае трудности обогатительных процессов связаны с весьма тонкой вкрапленностью примесных минералов в зернах граната, присутствием амфибола, ставролита в исходной руде (обладающих близкими с гранатом магнитными, флотационными и гравитационными свойствами).

## Статистические характеристики минерального состава природных типов пород месторождения Высота-181

Минерал	Природные типы пород								
	Ставролит-кианит-гранатовый сланец			Кианит-гранат- слюдистый сланец			Гранатовый амфиболит		
	макс	мин	среднее	макс	мин	среднее	макс	мин	среднее
Гранат	35,5	13,40	<b>21,50</b>	25,50	13,20	<b>20,35</b>	16,00	12,00	<b>13,8</b>
Ставролит	13,00	0,00	<b>4,73</b>	5,10	0,00	<b>1,97</b>	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Кварц	47,50	31,70	<b>42,00</b>	61,20	41,20	<b>49,67</b>	24,00	8,10	<b>12,2</b>
Плагиоклаз	8,00	0,20	<b>4,13</b>	16,60	0,00	<b>9,77</b>	7,90	2,90	<b>5,00</b>
Мусковит	2,10	0,50	<b>1,50</b>	4,70	0,10	<b>1,97</b>	0,01	0,00	<b>0,0005</b>
Биотит	1,50	0,10	<b>0,63</b>	5,60	0,10	<b>3,12</b>	0,50	0,30	<b>0,40</b>
Кианит	30,00	14,40	<b>22,47</b>	18,70	0,00	<b>11,45</b>	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Амфибол	0,00	0,00	<b>0,00</b>	0,00	0,00	<b>0,00</b>	69,35	58,41	<b>67,8</b>
Рудные	4,20	1,20	<b>2,33</b>	1,50	0,20	<b>0,92</b>	0,70	0,00	<b>0,50</b>
Хлорит	0,40	0,10	<b>0,27</b>	0,10	0,10	<b>0,10</b>	0,50	0,10	<b>0,30</b>
Турмалин	0,20	0,00	<b>0,07</b>	0,60	0,00	<b>0,22</b>	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Рутил	0,70	0,10	<b>0,40</b>	0,90	0,10	<b>0,45</b>	0,10	0,00	<b>0,00</b>
Карбонат	0,30	0,00	<b>0,13</b>	0,10	0,10	<b>0,10</b>	0,00	0,00	<b>0,10</b>

Таким образом оценка промышленных минералов сегодня должна обязательно включать комплекс минералого-технологических задач по определению дальнейших технологических работ, связанных с опытами по обогащению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. Наука, Спб, 1997. – 581 с.
2. *Лебедева С.И.* Микротвердость минералов. М., 1977, 118 с.
3. Типоморфизм минералов и его практическое значение. Недра, М., 1972, 260 с.

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ГЕОЛОГО-ПРОГНОЗНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ТИПОВ РУД И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

*Мелентьев Г.Б.*

НИЦ «Экология и промышленная энерготехнология»  
Объединенного Института высоких температур  
(ОИВТ) РАН, г. Москва

Редкометальные месторождения гранитовых формаций, представленные различными типами редкометальных пегматитов и гранитов, являются основными источниками собственно танталового (с ниобием), литиевого и рубидий-цезиевого сырья с сопутствующими бериллиевым и оловорудным. За рубежом редкометальные пегматиты интенсивно разрабатываются как промышленным способом, так и с применением ручной рудоразборки и селективной добычи редкометального и наиболее ценного нерудного сырья [1]. В России в условиях «переходного периода» эксплуатация редкометальных пегматитовых месторождений временно прекращена, а получение собственно танталовых и попутных оловянных концентратов из руд редкометальных гранитов Этыкинского месторождения, предусмотренное программой «ЛИБТОН» Минатома, оказалось нерентабельным из-за низких показателей обогатимости этого сырья, что ранее было доказано практикой эксплуатации подобных же руд Орловским ГОКом (Забайкалье). В то же время в нашей стране десятилетиями не осваиваются крупные разведанные месторождения редкометальных пегматитов на Кольском п-ве, в В. Саянах и ЮВ Тыве, прежде всего, в связи с расположением их в труднодоступных районах. В странах СНГ, с одной стороны, приостановлена деятельность Белогорского ГОКа (В. Казахстан), профилированного в бывшем СССР на выпуск танталовых концентратов с сопутствующими бериллиевыми, оловянными и нерудными (полевошпатовыми, включая к.п.ш., мусковитовыми и кварцевыми), а с другой – так же как и в России, не осваиваются меньшие по прогнозируемым ресурсам, но качественные месторождения редкометальных пегматитов Узбекистана и Украины [1, 2].

Таким образом, проблема прогнозирования, поисков и перспективной оценки новых месторождений редкометального пегматитового сырья представляется весьма актуальной как для России, так и других стран СНГ, прежде всего, на территориях со сложившейся ресурсодобывающей инфраструктурой (Кольский регион, В. Казахстан, Узбекистан, Украина и др.), в перспективных и легкодоступных рудных районах (Карелия) и на территориях нового строительства ж/д магистралей, нефте- и газопроводов, топливно-энергетических