

— для пор в диапазоне от 20...30 Å до 200...300 мкм методом ртутной порометрии;

— для объема микропор, объема и поверхности мезопор (их распределение по размерам), поверхности макропор — методом адсорбции азота.

Измерения методом адсорбции азота при 77 °К осуществляли на приборе ASAP-2400 (Micrometrics, США). Ртутно-порометрические исследования проводили на автоматическом порометре фирмы Micrometrics (США), Auto Pore 9200 (предельное давление 4000 атм).

Ионообменную емкость цеолитсодержащих пород определяли спектрофотометрическим методом по отраслевой методике.

Токсиколого- и радиационно-гигиенические свойства чрезвычайно важны для оценки качества цеолитсодержащих пород по основным направлениям использования. Токсичные элементы — As, Hg, Cd, Pb, Sr определялись методом эмиссионного спектрального анализа на спектрографе ДФС-8. Радиометрические исследования проводили на высокоточном гамма-спектрометре с анализатором Au-128 и сцинтиллятором, выполненном на кристалле NaY. Содержание радиоактивных элементов — Ra, Th, K определяли в высокоэнергетической части g-спектра по пикам поглощения 1,75 МэВ для ²²⁶Ra; 1,46 МэВ для ⁴⁰K и 3,2 МэВ для ²³²Th (по пику суммирования g-квантов с энергией 2,6 МэВ и каскадных g-квантов с энергией 0,58 МэВ).

Для оценки качества цеолитсодержащих пород по основным направлениям использования изучены токсиколого-, радиационно-гигиенические и термические свойства. Эффективность комплексирования минералого-аналитических методов продемонстрирована на примере изучения цеолитсодержащих пород месторождений Восточного Забайкалья (Шивыртуйское, Холинское, Бадинское, Талан-Гозагорское).

На основании проведенных минералого-технологических исследований установлено, что содержащиеся в цеолитсодержащих породах Восточного Забайкалья основные вмещающие примеси, к которым относятся минеральные фазы железа и кремнезема образуют сростки с цеолитовыми и породообразующими минералами, а также разного рода включения в них, размер которых достигает 5 мкм. В процессе проведения исследований также определено, что по причине достаточно тонкого взаимопрорастания минералов группы цеолита с другими породообразующими минералами их селективное выделение затруднено, что обуславливает необходимость применения методов направленного разупрочнения (дезинтеграции) по границам сростания минералов для обеспечения требуемого раскрытия сростков. При этом сходство физических свойств цеолитов с некоторыми из основных сопутствующих минералов (монтмориллонит, кварц, кальцит, опал, халцедон, кристобалит, полевые шпаты и пр.) определяет необходимость использования методов повышения контрастности технологических свойств разделения минеральных ассоциаций, а также их раз-

упрочнения (дезинтеграции) с применением комплекса направленных физических и физико-химических воздействий.

Таким образом, на основе проведенных минералого-технологических исследований цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья дано обоснование необходимости применения физических, физико-химических и энергетических методов воздействия (химическое обогащение, ультразвуковая обработка, мощные наносекундные электромагнитные импульсные воздействия, обработка ускоренными электронами, обжиг) в технологиях переработки данного вида сырья, обеспечивающих максимальную полноту вскрытия минеральных комплексов с увеличением извлечения загрязняющих примесей (до 99 %) и обуславливающих получение высококачественных товарных продуктов.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117092750073-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко, Ю.В. Цеолитовые месторождения Восточного Забайкалья / Ю.В. Павленко. — Чита: ЧитГУ, 2000. — 101 с.
2. Хатькова, А.Н. Оценка возможности комплексной переработки цеолитсодержащего сырья / А.Н. Хатькова, К.К. Размахнин // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 6. — С. 48–49.
3. Шушков, Д.А. Анальцимсодержащие породы Тимана как перспективный вид полезных ископаемых / Д.А. Шушков, О.Б. Котова, В.М. Капитанов, А.Н. Игнатъев. (Науч. рекомендации — нар. хоз-ву / Коми науч. центр УрО РАН. — Вып. 123). — Сыктывкар, 2006. — 40 с.
4. Юсупов, Т.С. Способы концентрирования и выделения цеолитов из горных пород // Методы диагностики и количественного определения содержания цеолитов в горных породах / Т.С. Юсупов. — Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1985. — С. 161–168.

© Хатькова А.Н., Размахнин К.К., 2018

Хатькова Алиса Николаевна // alisa1965.65@mail.ru
Размахнин Константин Константинович // constantin-const@mail.ru

УДК 622.7:553(470.21)

**Левченко Е.Н.¹, Газалеева Г.И.², Власов И.А.²,
Бузунова Т.А.² (1 — ФГБУ «ИМГРЭ»,
2 — ОАО «Уралмеханобр»)**

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АНОМАЛЬНОЙ ЗОНЫ РУД КОВДОРСКОГО МЕСТО- РОЖДЕНИЯ

Приведены результаты минералого-технологических исследований руд аномальной зоны Ковдорского бадделит-апатит-магнетитового месторождения. Проведенными исследованиями показано, что руды имеют сложное геологическое строение и содержат, кроме основных минералов (магнетит, апатит и бадделит), акцессорные минералы группы пирохлора (гатчеттолит), а также циркелит. Изучением вещественного состава и технологических свойств рудных минералов выявлено, что минералы циркелит и гатчеттолит имеют степень раскрытия в крупности 10–30 мкм, обладают сверх высокой шламуемостью и супертонким взаимопрорастанием. Разработка технологии извлечения редкометаллических элементов Та и Nb, исхо-

для из природной морфологии и технологических особенностей руды, проблематична. **Ключевые слова:** Ковдорское месторождение, аномальная зона, апатит, бадделеит, акцессорные минералы, гатчеттолит, циркелит.

Levchenko E.N.¹, Gazaleeva G.I.², Vlasov I.A.², Buzunova T.A.²
(1 — IMGRE, 2 — Uralmekhanobr)

MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL ESTIMATION OF ORE FROM THE ANOMALOUS ZONE KOVDOR DEPOSIT

*The paper presents the results of mineralogical and metallurgical studies of ore from the Anomalous Zone of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit. As demonstrated, the ore has a complex geological structure, and contains, along with the major minerals (magnetite, apatite, and baddeleyite) the accessory minerals of the pyrochlore group, hachettolite and zirkelite. Studies of the mineral and chemical composition of the ore, as well as the metallurgical properties of the ore minerals demonstrated that zirkelite and hachettolite occur as super-fine intergrowings and are best liberated into the 10–30 μm grain size fraction, so these minerals very easily join the slimes. Thus, due to the natural properties of the host Ta and Nb minerals and metallurgical features of the ore, the development of the extraction techniques for these metals (Ta and Nb) is problematic. **Keywords:** Kovdor deposit, anomalous zone, apatite, baddeleyite, accessory minerals, gatchettolite, zirkelite.*

Ковдорское месторождение апатит-магнетитовых (или бадделеит-apatит-магнетитовых) руд было открыто в 1933 г. К.М. Кошицем на юго-западе Мурманской области в 20 км к востоку от границы с Финляндией. Месторождение приурочено к западной части Ковдорского массива. С этого времени началось интенсивное изучение геологии месторождения и самого массива [1, 6, 7].

Для различных типов железных руд и карбонатитов был детально изучен и описан акцессорный минерал бадделеит — ZrO_2 , а также отличительные особенности минерального состава тех железных руд, которые впоследствии стали называться «аномальными» или «редкометалльными», вследствие содержания в них акцессорных минералов группы пироклора (гатчеттолит и собственно пироклор) и циркелит, называемый некоторыми авторами также ниобоцирконолитом и цирконолитом [2].

Выделяемые аномальные рудные тела, расположенные в центральной части Ковдорского апатит-магнетитового месторождения, отличаются от ранее сформированных руд появлением минералов группы гумита, тетраферрифлогопита и редкометалльных минералов с повышенной радиоактивностью. Содержание железа в магнетите этих руд самое высокое по месторождению — до 69 %.

Главными носителями тантала, ниобия, урана и тория в рудах аномальной зоны являются минералы гатчеттолит и циркелит. Содержание редкометалльных компонентов в каждом из названных минералов колеблется в широких пределах (табл. 1).

Содержание редкометалльных минералов в рудах аномальной зоны (АЗ) — сотые доли процента (Ta_2O_5 — 0,012 %; Nb_2O_5 — 0,076 %), в рудах месторождения — тысячные. Размер вкрапленности редко превышает 0,2 мм. Для обоих минералов характерна значительная хрупкость и соответственно тенденция к переизмельчению. Компоненты микровключений максимально могут быть отделены от бадделеита только путем полного химического вскрытия, поскольку размеры включений обычно не превышают 10 мкм, а степень насыщенности зерен бадделеита такими включениями достаточно высока. Доля такого бадделеита в балансе U_2O_3 около 20 %, а в балансе ThO_2 — около 33 % [8, 12].

Целью описанных исследований являлось выявление минералого-технологических особенностей руд аномальной зоны Ковдорского месторождения и возможности получения при их обогащении товарных селективных бадделеитового и редкометалльного концентратов.

В 2017 г. в институт Уралмеханобр для проведения минералого-технологических исследований поступила проба руды АЗ Ковдорского месторождения массой 7 т. Представленная на исследования проба близка по химическому составу средним показателям руд аномальной зоны (табл. 2, 3). На рис. 1 показан общий вид характерного кускового материала руды технологической пробы АЗ Ковдорского месторождения.

Основными минеральными фазами в пробе являются магнетит (~ 30 об. %), карбонаты (~ 19 об. %), флогопит (~ 4 об. %), апатит (~ 12 об. %), оливин (~ 18 об. %) и ильменит (табл. 4). Кроме того, присутствуют минералы групп пироксенов (эгирин-авгит) и амфиболов (актинолит и амфиболовый асбест), сульфиды (пирротин и халькопирит), бадделеит, минералы тантала и ниобия (гр. пироклора), монацит и также цирконийсодержащие тантало-ниобаты.

Для диагностики и определения форм нахождения редких и редкоземельных минеральных фаз было проведено электронно-микроскопическое изучение дробленого материала пробы. Исследования образцов выполнены в ИМГРЭ на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (Япония) в отраженных электронах (BSE COMPO) [5].

Преобладающий минерал в пробе — *магнетит*, который содержится в количестве около 30 об. %, обогащен магнием, марганцем и титаном. Иногда он представляет собой твердый раствор магнетита и титаномагнетита. В крупных классах магнетит находится в сростках с оливином, апатитом, флогопитом, карбонатами и сульфидами. Кроме того, он присутствует в этих минералах в виде мелких включений, размеры частиц от 0,002 до 0,01 мм. В самом крупном классе

Таблица 1
Содержание редкометалльных компонентов в характерных минералах аномальной зоны Ковдорского месторождения

Минералы	Nb_2O_5	Ta_2O_5	U_3O_8	ThO_2	ZrO_2
Гатчеттолит	19,0–51,5	4,6–16,0	4,3–19,6	0,11–5,7	2,0–12,0
Циркелит	14,6–30,2	0,4–2,5	0,0–3,4	0,02–3,7	18,3–41,0

Таблица 2

Химический состав пробы руды в среднем по участку из АЗ (данные Ковдорского ГОКа)

Компонент, %	P ₂ O ₅	Fe _{общ.}	ZrO ₂	CO ₂	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅
Массовая доля, %	5,96	23,40	0,140	—	0,012	0,061

Таблица 3

Химический состав средней пробы (данные ОАО «Уралмеханобр»)

Элементы и оксиды	Массовая доля, %	Элементы и оксиды	Массовая доля, %
CaO	22,80	K ₂ O	0,47
MgO	10,70	Na ₂ O	0,16
SiO ₂	7,47	V ₂ O ₅	0,10
Nb ₂ O ₅	0,055	BaO	0,052
Ta ₂ O ₅	0,011	SO ₃	0,21
ZrO ₂	0,18	F	0,18
TiO ₂	1,27	Sb	<0,005
Cr ₂ O ₃	0,19	Cu	0,16
Al ₂ O ₃	0,54	Zn	0,024
P ₂ O ₅	5,88	Pb	<0,020
Fe _{общ.}	25,00	As	<0,005
FeO	12,0	Mo	<0,005
Fe _{mt}	<0,50	Co	0,0082
Bi	<0,020	Ni	0,072
Hg	<0,10 г/т	Cd	<0,0005
MnO	0,28	ПМПП	12,82
S _{общ.}	0,31	C _{общ.}	3,92

(+1.0 мм) часть магнетита свободна, часть — в сростках. В более тонких классах доля свободного магнетита увеличивается, полное раскрытие сростков происходит в классе крупности $-0.16+0.1$ мм.

Карбонаты преимущественно представлены доломитом, анкеритом, кальцитом. Они обогащены стронцием и барием. В крупных фракциях карбонаты представлены сростками с апатитом, редкими и редкоземельными минералами.

Оливин представлен несколькими разновидностями с преобладанием форстеритового минала. Обломки зерен минерала имеют неправильные осколочные формы разного цвета: от прозрачных бесцветных или матовых светло-зеленого цвета до темно-коричневых зерен, что обусловлено химическим составом разновидностей оливина. Наиболее магнезиальные — прозрачные бесцветные зерна, с увеличением содержания железа цвет минерала становится более темным. Часто оливин обогащен никелем и титаном (Ti ~ 1–2,5 масс. %, Ni ~ 0,5–0,7 масс. %), кроме того, содержит включения сульфидов, размер частиц которых от 3–5 до 100 мкм.

Минералы группы слюд в пробе представлены преимущественно **флогопитом**, который представляет собой пачки правильных шестигранных кристаллов желтовато-бурого цвета с разным содержанием железа, что обуславливает интенсивность бурого цвета.



Рис. 1. Текстура руды АЗ Ковдорского месторождения — вкрапления магнетита (черное) и слюды (бурое) среди зерен карбоната (светлое)

Anatum содержится в пробе в виде прозрачных бесцветных зерен осколочных неправильных форм, а также правильных кристаллов и их обломков и имеет разный состав: чистый кальциевый фосфат, фтор-апатит, фтор-карбонат-апатит [10, 15]. Последняя форма, представленная в руде АЗ на 40 %, содержит в кристаллической решетке карбонат более стехиометрического содержания. В некоторых зернах содержатся включения монацита, бадделеита или тантало-ниобатов (рис. 2). Иногда редкие минералы выделяются на поверхности кристаллов апатита в виде тонких примазок. В крупных классах (+1.0 мм) апатит находится в сростках с оливином, флогопитом, магнетитом и другими минералами. Полное раскрытие сростков происходит в классе крупности $-0.1+0.071$ мм.

Кроме электронно-микроскопических исследований для объяснения нетипичного поведения апатита

Таблица 4

Минеральный состав исходной технологической пробы

Минералы		Содержание, масс. %
Рудные	Магнетит Fe ₃ O ₄	30
	Ильменит FeTiO ₃	<1
	Бадделеит ZrO ₂	<1
	Сульфиды (пирит, халькопирит, галенит)	1
	Пироксид (гетчингтонит) (NaCa) ₂ Nb ₂ O ₆ (OH,F)	<1
	Циркелит (Ca, Th, Ce)Zr(Ti, Nb) ₂ O ₇	<1
	Оксиды железа (гетит, гематит)	<1
	Прочие рудные (SrO, монацит и пр.)	<1
Нерудные	Оливины (форстерит, фаялит)	18
	Апатит Ca ₅ [PO ₄] ₃ (F, Cl, OH)	12
	Кальцит CaCO ₃	19
	Доломит, анкерит Ca(Mg, Fe)(CO ₃) ₂	12
	Слюды (флогопит, аннит)	4
	Пироксены (диопсид, энстатит и пр.)	2
Серпентины (лизардит, антигорит)	2	

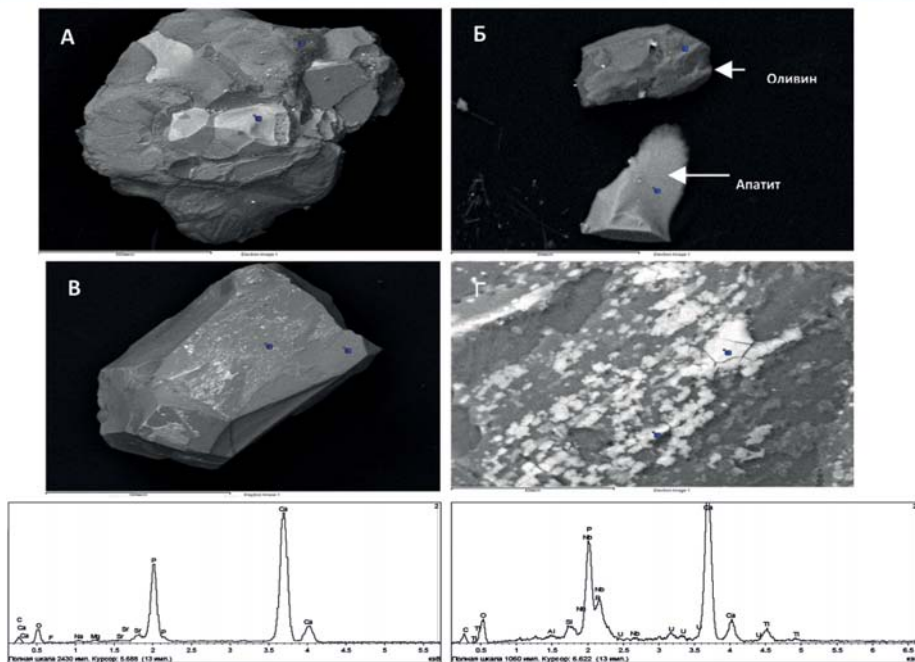


Рис. 2. А – сросток апатита (светлое в центре) с оливином; Б – фтор-карбонат-апатит; В, Г – выделение на поверхности кристалла апатита минерала группы пирохлора (размер частиц от 5 до 15 мкм)

при флотации, и в целом при механическом обогащении интересными и достаточно объективными являются исследования проб рентгеноспектральным микрозондовым анализом (РСМА) [6]. Исследования проводились с помощью модернизированного микроанализатора «Самбах-микробит» фирмы CAMECA (оснащен программным комплексом «MS-Scan5»), напылительной установки ВУП-4 (пр-во СССР) и оптического микроскопа фирмы Bresser (Германия). По результатам РСМА (табл. 5, рис. 3) основу апатитовых зерен на 37–42 % представляет апатит (P_2O_5), и в то же время 51–55 % зерна – это кальцит (CaO). Все это подтверждает наличие в кристаллической решетке апатита включений дополнительного кальцита, что значительно осложняет применение практически всех процессов механической переработки для обогащения руды аномальной зоны Ковдорского месторождения.

Ильменит представлен в пробе преимущественно осколочными обломками неправильной формы черного цвета с матовой или гладкой поверхностью, в редких случаях кристаллами или их обломками. Часть зерен минерала за-

метно изменена и входит в состав легкой фракции. Химический состав непостоянен, соотношение железа и титана меняется от 0,8 до 1,3; в большинстве зерен отмечается повышенное содержание магния, причем его содержание меняется от 0,5 до 9,5 масс. %; содержание марганца в ильмените значительно меньше, оно колеблется в пределах от 1,0 до 4,0 масс. %.

Бадделейт присутствует в пробе как в свободном виде, так и в виде включений в других минералах. Он представлен уплощенными кристаллами или их обломками черного или коричневого (разной интенсивности) цвета с ярким алмазным блеском. В крупных кристаллах отмечены включения в нем апатита (рис. 4Б). Кроме того, бадделейт входит в состав сростков. На рис. 4В показан сросток измененного оливина, бадделейта и магнетита, где оливин замещен монтичеллитом. В составе бадделейта отмечено устойчивое содержание гафния (1–2 масс. %) и никеля (0,5–0,8 масс. %). По нашим данным, а также по результатам других исследований в бадделейте отмечается повышенное содержание Sc_2O_3 (0,08–0,09 масс. %) [11].

Минералы тантала и ниобия в пробе содержатся в основном в виде включений в других минералах, размеры таких включений не превышают 20 мкм. Характерной особенностью распределения пирохлора в

Таблица 5
Результаты РСМА апатитов АЗ (вес. %) в точках аншлифа (рис. 3)

Точки ан.	18	19	20	21	22	23	24	25
Na ₂ O	0,15	0,11	0,09	0,10	0,13	0,13	0,12	0,57
MgO	0,08	0,04	0,07	0,05	0,06	0,05	0,02	4,15
Al ₂ O ₃	0,01	не обн.	не обн.	0,02	не обн.	не обн.	0,01	0,03
SiO ₂	0,11	0,11	0,08	0,08	0,11	0,06	0,06	4,05
SrO	0,49	0,51	0,45	0,45	0,40	0,46	0,50	1,12
P ₂ O ₅	42,22	42,36	42,13	42,13	41,89	41,69	41,34	37,52
Nb ₂ O ₅	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	0,02	0,07	0,03	0,03
K ₂ O	0,01	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.
CaO	52,98	53,77	54,85	54,92	54,74	55,31	54,83	51,05
TiO ₂	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	0,01	не обн.	не обн.	не обн.
BaO	не обн.	0,04	0,05	0,03	не обн.	не обн.	0,01	не обн.
La ₂ O ₃	0,04	0,07	0,04	не обн.	0,06	0,04	0,02	не обн.
Ce ₂ O ₃	0,15	0,15	0,08	0,11	0,14	0,10	0,09	0,10
Nd ₂ O ₃	0,05	0,08	0,02	0,13	0,11	0,05	0,02	0,11
MnO	0,05	0,03	не обн.	не обн.	не обн.	0,01	0,02	0,12
FeO	0,05	не обн.	0,04	не обн.	0,01	0,00	0,00	0,42
сумма	96,38	97,25	97,89	98,02	97,66	97,98	97,07	99,25

Примечание: Pr₂O₃ не обнаружен

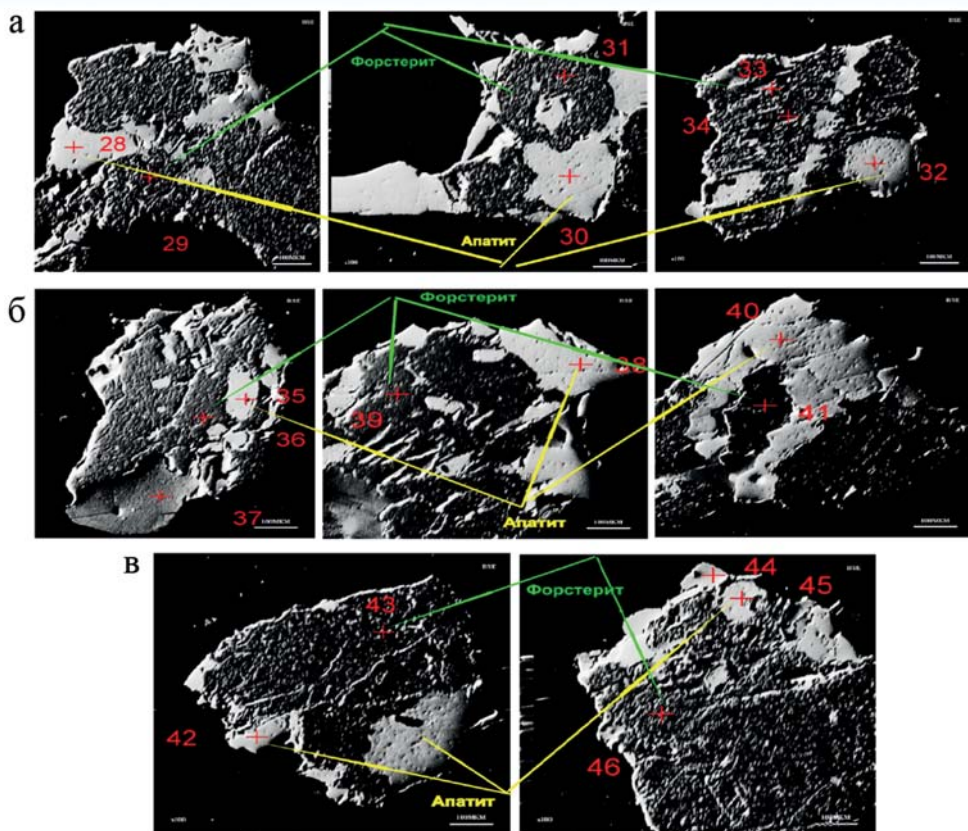


Рис. 3. BSE изображение сростков зерен апатитов с форстеритом; точки 34 (а), 44 (в) — включение и сросток карбоната с форстеритом; точка 37 (б) — сросток форстерита с флюгопитом, ($\times 100$)

апатит-магнетитовых рудах является его локализация в промежутках между выделениями главных породообразующих минералов. Внутри кристаллов магнетита, форстерита и апатита практически нет вкрапленности пирохлора. При этом большая часть кристаллов пирохлора нарастает на поверхность зерен магнетита.

Нами определены минералы группы пирохлора в пирротине и апатите, а также минеральные фазы, представляющие собой тонкие сростания минералов группы пирохлора и бадделеита (рис. 5, табл. 6).

Наблюдаются также случаи обрастания (замещения) гатчеттолита пирохлором с образованием сложных оксидов гидропирохлора — гидроксинатропирохлор, гидроксикальциопирохлор и гидроксикенопирохлор $(\text{Na, Ca, Ce})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH})$ [11, 12]. Темные разновидности

минералов не превышают 15 мкм.

Взаимоотношения циркелита и гатчеттолита достаточно сложные. В отдельных случаях циркелит в виде неправильных пятнообразных обособлений заключен в зернах гатчеттолита, но значительно чаще пластинчатые кристаллы циркелита нарастают на гатчеттолит.

Исследованиями, проведенными в ИМГРЭ, показано, что минералы тантала и ниобия в пробе содержатся в основном в виде включений в других минералах (пирротине, магнетите). Размеры таких включений не превышают 20 мкм (рис. 6 А, Б). Кроме того, в пробе в свободном виде присутствуют минералы, представляющие собой сложные оксиды ниобия, циркония и тория с никелем, кальцием, титаном и желе-

минерала постепенно светлеют, приобретают пятнистую окраску от оранжево-красной до лимонно-желтой и зеленоватой, и только центральная часть таких зерен в виде реликтовых пятен изредка остается темной. Гипергенные продукты изменения гатчеттолита обладают повышенной хрупкостью; они часто встречаются в виде корочек или мелкозернистых светлых скоплений на гранях октаэдров и поверхности зерен.

Минералы группы пирохлора, циркелит и лантанит находятся преимущественно в тонких включениях в других минералах, за исключением пирохлора, который присутствует в небольшом количестве в классе $-0.1+0.071$ в свободном виде. Остальные редкие и редкоземельные фазы освобождаются только в самом тонком классе, поскольку размеры частиц этих мине-

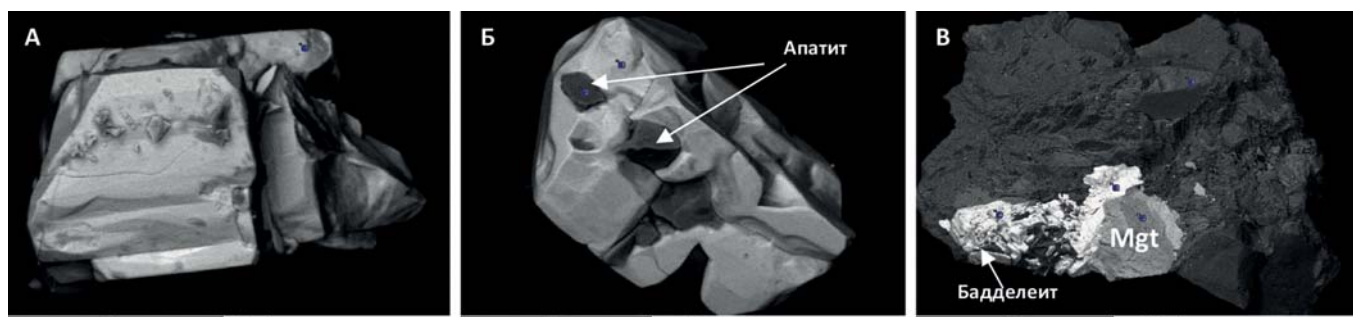


Рис. 4. Бадделеит в пробе. А — свободный кристалл; Б — включения апатита в кристалле бадделеита; В — бадделеит (белое) в сростке с магнетитом и монтичеллитом

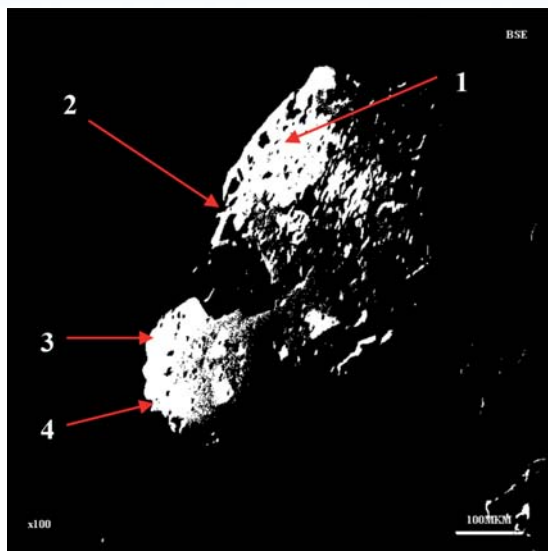


Рис. 5. Сrostок бадделеита с минералами группы пирохлора или, возможно, с циркелитом (цирконолитом). См. табл. 6

зом; они представляют собой обломки кристаллов черного цвета с высоким блеском.

По результатам минералого-технологических исследований исходной пробы по определению доли раскрытия минералов по классам крупности установлено, что основные рудные минералы — магнетит и апатит, а также нерудные — карбонаты (кальцит, доломит) достаточно хорошо раскрыты в классе менее 0,16 мм.

Бадделеит в большей степени находится в сростках с гатчеттолитом (17 %) и циркелитом (10 %) (рис. 7.1).

Гатчеттолит на 38 % находится в сростании с магнетитом и на 25 % с циркелитом (рис. 7.2).

Циркелит на 34 % находится в сростании с карбонатами и прочими минералами и на 26 % с двумя и более минералами (рис. 7.3).

Редкометалльные минералы — гатчеттолит и циркелит, являются тонковкрапленными, раскрытие сростков этих минералов происходит в крупности 10–30 мкм. Бадделеит раскрыт в классе менее 44 мкм. Таким образом, чтобы раскрыть эти минералы и затем сконцентрировать необходимо сверхтонкое измельчение.

В то же время, исходя из склонности минералов тантала и ниобия к сильному ошламованию, при разработке схемы обогащения руд аномальной зоны требуются щадящие подходы к этому процессу.

Для обоснования методов дальнейшего обогащения проанализированы разделительные признаки минералов представленной пробы (табл. 7) [4, 13]. Из данных таблицы 7 следует, что ми-

Таблица 6
Результаты РСМА: сростание минералов группы пирохлора и бадделеита в точках шлифа (вес. %) (к рис. 5)

Определяемый элемент в пересчете на оксид	№№ точек			
	1*	2	3	4
Na ₂ O	0,00	0,18	1,56	0,29
MgO	0,03	0,70	0,74	0,91
HfO ₂	2,51	0,62	0,42	0,53
ZrO ₂	95,61	25,79	15,05	23,06
Nb ₂ O ₅	0,20	13,99	20,33	15,11
ThO ₂	не обн.	1,59	2,95	2,32
UO ₂	не обн.	0,09	2,67	0,35
CaO	0,01	9,70	8,81	9,15
BaO	не обн.	0,12	0,05	0,06
TiO ₂	0,02	20,44	12,83	15,94
Fe ₂ O ₃	0,02	8,73	6,29	8,88
Ta ₂ O ₅	0,18	0,63	1,81	1,82
La ₂ O ₃	не обн.	0,10	0,08	0,10
Ce ₂ O ₃	не обн.	1,83	1,25	1,46
Nd ₂ O ₃	0,04	1,11	0,78	0,82
Sc ₂ O ₃	0,09	0,01	0,01	0,01

* анализ 1 — чистый бадделеит

нералы, присутствующие в пробе, имеют различия по следующим физическим признакам: плотность, удельная магнитная восприимчивость, удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Таким образом, предполагаемая технология обогащения может включать гравитационные, магнитные и электрические методы разделения, методы предварительного обогащения и рудоподготовку в щадящем режиме [3, 9, 14].

Приведенные выше минералогические исследования позволили выбрать и испытать последовательные циклы обогащения руды аномальной зоны Ковдорского месторождения, предполагающие последовательное выделение железного, апатитового, бадделеитового и редкометалльного концентратов.

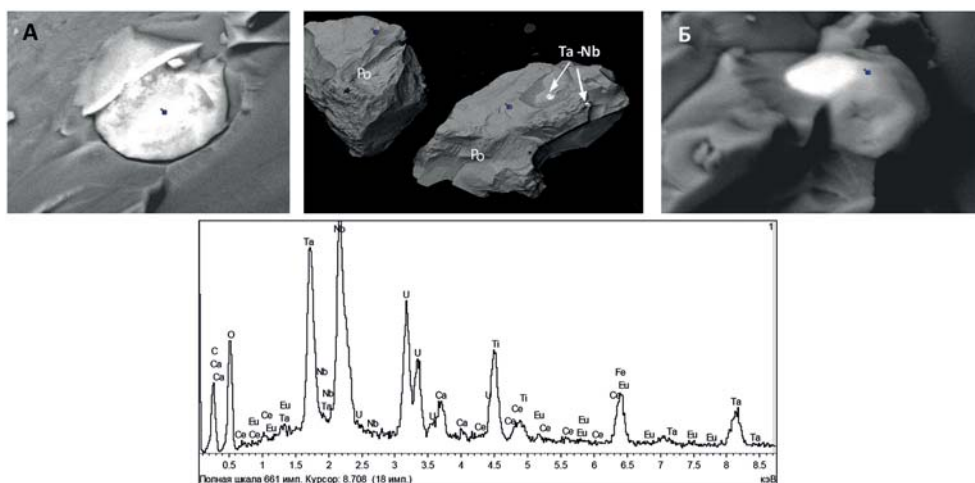


Рис. 6. Тантало-ниобаты в виде включений в пирротине — минералы группы пирохлора: А — эшинит; Б — пирохлор. Размеры включений около 20 мкм. Po — пирротин

Таблица 7

Значения разделительных признаков основных минералов в исходной пробе АЗ

Минералы	Химическая формула	Плотность, г/см ³	Удельная магнитная восприимчивость, м ³ /кг × 10 ⁻⁷	Удельная электропроводность, См/м (СИ)	Диэлектрическая проницаемость	Твердость
Кальцит	CaCO ₃	2,6–2,8	–0,05	10 ⁻⁷ –10 ⁻¹²	1,0–9,3	3
Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	1,8–2,9	–0,04–0,05	10 ⁻³ –10 ⁻⁸	6,3–8,5	3,5–4
Апатит	Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl	3,18–3,21	0,12	10 ⁻¹⁰ –10 ⁻¹²	8,0–12,8	5
Форстерит	Mg ₂ SiO ₄	3,22	2,3	—	3,3–9,1	6,5–7
Флогопит	KMg ₃ [Si ₃ AlO ₁₀]	2,7–2,85	1,0	—	6,2	2–3
Клиногумит	Mg ₉ [SiO ₄] ₄ F ₂	3,2–3,4	—	—	—	—
Магнетит	FeFe ₂ O ₄	4,9–5,2	8000	10 ² –10 ⁻⁴	—	5,5–6
Ильменит	FeTiO ₃	4,72	14,2–33	10 ³ –0,25	33,7–81	5–6
Пирротин	Fe ₂ S	4,58	63–700	0,5·10 – 0,5·10 ⁶	—	4
Халькопирит	CuFeS ₂	4,1–4,3	1–2	10 ¹ –10 ⁵	—	3–4
Пирит	FeS ₂	4,9–5,2	0,12	10 ⁵ –10 ¹	—	6–6,5
Гатчеттолит	(Na, Ca, U, Th) ₂ (Nb, Ta, Ti, Zr) ₂ (F, OH)	4,9	—	—	—	5–5,5
Пирохлор	—//—	4,2–4,6	0,1–0,3	0,5·10 ⁻⁷	4,1–5,1	4–5
Циркелит	(Ca, U, Th) Zr (Ti, Nb) ₂ O ₇	4,74	—	—	—	5,5
Бадделеит	ZrO ₂	5,5–6	0,08–0,14	—	—	6–7
Циркон	ZrSiO ₄	4,6–4,7	–0,02–0,1	—	3,6–5,2	6–8

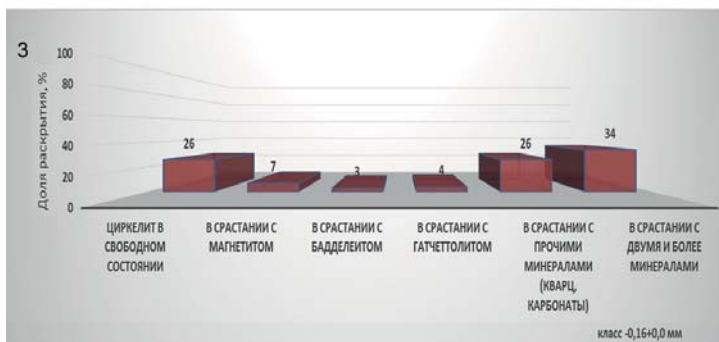
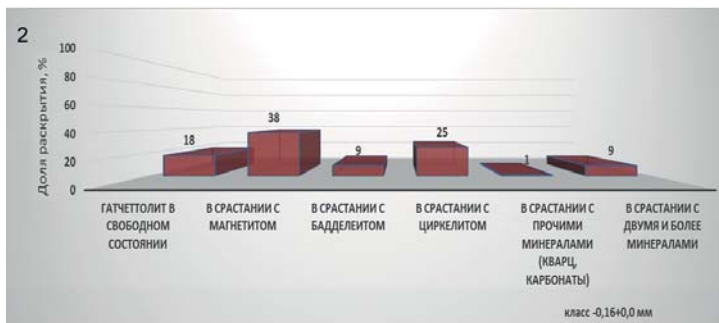
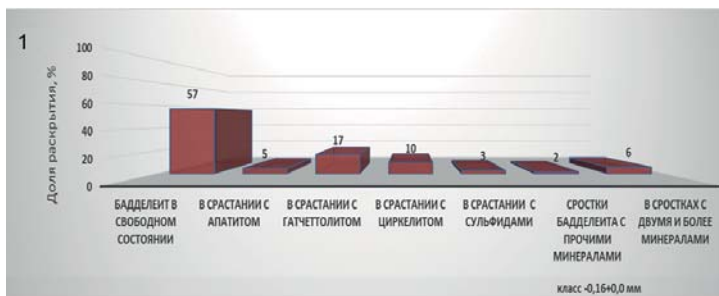


Рис. 7. Доля раскрытия бадделеита (1), гатчеттолита (2) и циркелита (3) в классе –0,16±0,0 мм

Изучение степени раскрытия основных минералов пробы позволило определить основную степень измельчения материала — 0,160 мм. В схеме мокрого магнитного обогащения с выделением железорудного концентрата данная крупность была достигнута при двухстадиальном измельчении.

Технологические исследования обогащения руды аномальной зоны Ковдорского месторождения показали, что с железорудным концентратом при двухстадиальном измельчении теряется значительное количество оксидов тантала, ниобия и циркона: соответственно — 30,4 %, 14,9 % и 24,8 %. При этом железорудный концентрат получен высокого качества как по содержанию железа общего — 67,1 %, так и по примеси оксида фосфора — 0,14 %. Потери минералов тантала и ниобия в железорудном концентрате объясняются их сложным прорастанием в других минералах, в частности, в магнетите.

Наличие нескольких разновидностей апатита, в том числе разновидность, содержащая кальцит и доломит в кристаллической решетке, не позволили получить качественный апатитовый концентрат: по гравитационной схеме получен только апатитовый промпродукт с содержанием P₂O₅ — 15,1 %, по флотационной схеме получен концентрат с содержанием 17–20 % P₂O₅, по магнитной схеме — 23,0 % P₂O₅. Потери редкометалльных элементов (Ta и Nb), исходя из природной морфологии и технологических особенностей этой руды, будут очень велики, так как минералы циркелит и гатчеттолит имеют сте-

пень раскрытия в крупности 10–30 мкм, обладают сверх высокой шламоемкостью и супертонким взаимопрорастанием.

Заключение

На основании проведенных минералого-технологических исследований представительной пробы руды аномальной зоны Ковдорского месторождения можно сделать вывод, что минеральный состав этой руды очень сложный. Наличие нескольких разновидностей апатита не позволяет получить качественный апатитовый концентрат. Тонкое срастание магнетита с циркелитом и особенно с гатчеттолитом ведет к потерям тантало-ниобатов с железорудным концентратом. Получить селективные редкометалльные концентраты с высокими технологическими показателями (содержание, извлечение) не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев, Б.В. // Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова / Б.В. Афанасьев. — СПб.: Изд-во «Роза ветров», 2011. — 224 с.
2. Глушкова, В.Б. // Фазовые переходы в окислах циркония, гафния и редкоземельных элементах / В.Б. Глушкова: Дис... д-ра хим. наук. — Л.: Ин-т химии силикатов им. И.В. Гребенщикова АН СССР, 1972. — 285 с.
3. Газалева, Г.И. // Теория, техника и технология процессов измельчения минерального сырья / Г.И. Газалева: Учебник. — Екатеринбург, 2017. — 352 с.
4. Козин, В.З. // Исследование руд на обогатимость: Учеб. пособие / В.З. Козин. — Екатеринбург: УГГУ, 2009. — 380 с.
5. Лапин, А.В. Микрорентгеноспектральный (электронно-зондовый) анализ редкометалльных руд и продуктов их обогащения с помощью микроанализатора с волновой дисперсией (WDS) / А.В. Лапин, Е.Н. Левченко, И.М. Куликова, О.А. Набелкин, В.И. Иванов / Метод. рекомендация НСОММИ № 186. — М.: ВИМС, 2016. — 55 с.
6. Минеральное сырье. Краткий справочник / Под ред. В.П. Орлова. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. — 302 с.
7. Римская-Корсакова, О.М. Геология месторождений Ковдорского массива / О.М. Римская-Корсакова, Н.И. Краснова. — СПб.: СПбГУ, 2002. — 146 с.
8. Субботин, В.В. Изучение бадделеита Ковдорского месторождения / В.В. Субботин, Г.Ф. Субботин: Сборник материалов КНЦ, 1995. — 180 с.
9. Цыпин, Е.Ф. Обогащение в стадиях рудоподготовки: науч. монография / Е.Ф. Цыпин. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. — 303 с.
10. Kalashnikov, A.O. Scandium of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource / A.O. Kalashnikov et al. // Ore Geology Reviews. — 2016. — Vol. 72. — P. 532–537.
11. Mikhailova, J.A. 3D mineralogical mapping of the Kovdor phosphorite-carbonatite complex (Russia) / J.A. Mikhailova et al // Mineralium Deposita. — 2016. — Vol. 51 (1). — P. 131–149.
12. Ruh, R. Thermal Analysis / R. Ruh, H. Carrett // 2-th International Conference on Thermal Analysis. — 1969. — № 5. — P. 25–30.
13. Tobias, A. A machine vision system for estimation of size distributions by weight of limestone particles / A. Tobias, M.J. Thurley, J.E. Carlson // Minerals Engineering. — 2012. — Vol. 25. — P. 38–46.
14. Tripathy, D.P. // Novel methods for separation of gangue from limestone and coal using multispectral and joint color-texture features / D.P. Tripathy, K. Guru Raghavendra Reddy // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. — 2017. — Vol. 98 (1). — P. 109–117.
15. Yakovenchuk, V.N. Kampelite, Ba₃Mg₁₅Sc₄(PO₄)₆(OH)₃·4H₂O, a new very complex Ba-Sc phosphate mineral from the Kovdor phosphorite-carbonatite complex (Kola Peninsula, Russia) / V.N. Yakovenchuk et al. // Mineralogy and Petrology. — 2017. — DOI 10.1007/s00710-017-0515-1.

© Коллектив авторов, 2018

Левченко Елена Николаевна // levchenko@imgre.ru
 Газалева Галина Ивановна // gazaleeva_gi@umbr.ru
 Власов Игорь Александрович // umbr@umbr.ru
 Бузунова Татьяна Александровна // umbr@umbr.ru

Зинчук М.Н., Зинчук Н.Н. (Западно-Якутский научный центр АН, Республика Саха (Якутия))

О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ НЕКОТОРЫХ ИНДИКАТОРНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ

*Проведенными исследованиями установлено, что для каждого типа кимберлитовых пород, слагающих трубки, характерно свое соотношение индикаторных минералов (ИМК). Присутствие в кимберлитах определенных групп глубинных ксенолитов и ксенозерен их минералов, химический и геохимический состав кимберлитов позволили сформулировать концепцию о свойствах образований верхней мантии, являющихся источником магмы каждого из выделяемых типов кимберлитов. Подтверждена существующая точка зрения, что причиной различной продуктивности кимберлитов является глубина залегания корневой магматических очагов. С изучением ИМК связано совершенствование направления исследований для создания наиболее рациональных схем переработки руды и обеспечивающих кристаллосберегающие технологии, а также расширение областей применения алмазов с учетом их реальной структуры и физических особенностей, в том числе выявления природных объектов с повышенным качеством алмазного сырья. **Ключевые слова:** алмаз и его парагенетические спутники, алмазоносные поля, Сибирская платформа.*

Zinchuk M.N., Zinchuk N.N. (Academy of Sciences of Republic Sakha (Yakutia))

ABOUT PERSPECTIVES OF STUDYING KIMBERLITE INDICATOR MINERALS

*Analysis of the results of carried out investigations of mantle modules in kimberlite diatremes of main diamondiferous regions of the Siberian platform was made. Detailed complex investigations of diamond and its paragenetic accessory minerals allow establishing material-indicative parameters of kimberlite magmatism of various productivity and geologic-structural position of kimberlite bodies, and address issues about primary sources of placer diamonds, as well. The presence in kimberlites of definite groups of depth xenoliths and xenograins of their minerals, chemical and geochemical composition of kimberlites allowed formulating a concept about properties of upper mantle formations, being the source of magma for each of distinguished type of kimberlites. Upgrading the line of research on creation of more efficient ore processing flowsheets and providing crystal-integrity technologies, expansion of diamond application areas with consideration of their real structure and physical features, as well as revelation of natural targets with increased quality of diamond raw material, are all related with investigation of primary indicator minerals of kimberlites. **Keywords:** diamond and its paragenetic accessory minerals, diamondiferous fields, Siberian platform.*

Важными составными компонентами кимберлитовых пород, обычно называемыми индикаторными минералами кимберлитов (ИМК), являются глубинные