

Таким образом, минералого-технологические исследования показали, что хвосты обогащения являются несвязанным мелко- и тонкообломочным материалом, по минеральному составу аналогичным сплошным и вкрапленным колчеданным рудам. В основном, сульфиды цветных металлов в хвостах встречаются в виде включений, прожилков, интерстиционных выделений и взаимных прорастаний, поэтому такие сростки невозможно раскрыть механическим путем.

Вскрытие минеральных сростков с последующим извлечением цветных металлов возможно только химическим путем, поэтому для переработки текущих хвостов обогащения целесообразно применять метод кучного выщелачивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленников В.В. Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 1999. 348 с.
2. Преображенский И.А., Саркисян С.Г. Минералы осадочных пород. М.: ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1954. 363 с.
3. Серавкин И.Б. Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. М.: Наука, 1986. 268 с.

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИАНИТА БОЛЬШИХ КЕЙВ КАК НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

Войтеховский Ю.Л.¹, Нерадовский Ю.Н.¹, Гришин Н.Н.², Гершенков А.Ш.³

¹ Учреждение Госсийской академии наук Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

² Учреждение Российской академии наук Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, Апатиты

³ Учреждение Российской академии наук Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Россия – второй в мире производитель алюминия, но обеспеченность металлургических заводов отечественным глиноземом удовлетворяется на 45%, остальной ввозится из-за рубежа. Главная проблема алюминиевой отрасли России – дефицит бокситов высокого качества. Ресурсы бокситов невелики, их значительная часть находится на больших глубинах. Вероятность обнаружения месторождений высококачественных бокситов чрезвычайно мала. Кроме бокситов, для производства глинозёма в России используется также низкокачественное алюминиевое сырьё – нефелиновые руды (уртиты) и нефелиновые концентраты из хвостов флотации апатит-нефелиновых руд. По состоянию на 2008 г. добыча бокситов в России составила 5,5 млн. т, а нефелиновых руд – 30 млн. т. Производство глинозема из этого сырья составило в целом 3,3 млн. т [15]. Согласно этим данным, извлечение глинозема из всех типов алюминиевых руд составило в 2008 г. лишь 34%. Низкое качество используемого в России собственного сырья для производства глинозема ведет к огромным затратам электроэнергии и вызывает необходимость кардинального решения проблемы. Учитывая высокий уровень технологии комплексной переработки и практически неограниченные запасы нефелина, в ближайшей перспективе он останется важным сырьем для производства алюминия. Вместе с тем, альтернативой бокситам и многим видам небокситовых видов алюминиевого сырья могут быть кианитовые руды с высоким содержанием глинозема (рис. 1), заслуживающие внимания в первую очередь [8].

Минералы группы дистена, в частности, кианит, представляют собой ценное минеральное сырьё. Широкое применение он может найти в цветной металлургии. Кианит, как силлиманит и андалузит, является высокоглиноземистым сырьем для производства высококачественных огнеупоров, применяемых в керамической, стекольной, цементной промышленности, в черной и цветной металлургии, для производства специальных изоляторов, свечей, тиглей и т. п. Кианит используется также в литейном производстве. Он содержит 63% Al_2O_3 (рис. 1), что стимулирует попытки его применения в глиноземной промышленности. Из-за крайне низкого кремневого модуля (<2) и отсутствия щелочей, эффективных промышленных технологий переработки его на глинозем пока нет. Лабораторными исследованиями ВАМИ показана принципиальная возможность получения глинозема из кианита электротермическим методом, но такой процесс слишком энергоемок. В то же время, разработана технология получения из кианита кремний-алюминиевых сплавов типа силумина. Эффективность силуминового производства возрастет, если оно будет основано на использовании кианитового концентрата (в сравнении с производством силумина синтетическим методом). В настоящее время ведутся поиски новых способов производства силумина из кианитового концентрата, которые позволили бы отказаться от глинозема и электролитического алюминия. Это цинковый и фильтрационный способы, а также плазменный метод, с помощью которых можно восстанавливать алюминий до чистого металла непосредственно из концентрата.

Для промышленного использования кианита, силлиманита и андалузита важны поведение при нагревании и температура перехода в муллит. Для производства муллита наиболее пригоден кианит, из трех полиморфных модификаций имеющий наименьшую температуру муллитообразования. При этом он увеличивается в объеме на 18%.

Поведение при нагревании определяет подход к выбору кианита как огнеупора. В этом качестве он широко используется во всем мире, в том числе и Скандинавскими странами, где около 90% кианита применяется в огнеупорной промышленности. В незначительных количествах он потребляется при производстве керамики и стекла. В России кианит используется незначительно при производстве огнеупорных материалов в различных отраслях промышленности – авиационной, строительной, металлургической и др. Но в основном для производства огнеупорных материалов применяется технический глинозем, получаемый из бокситов.

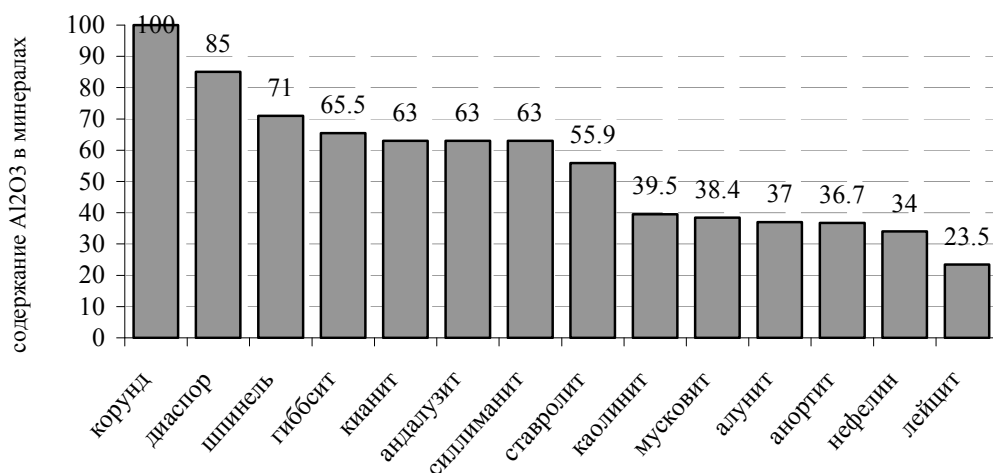


Рис. 1. Главные высокоглиноземистые минералы и сырье для производства глинозема

В Европейской части Российской Федерации имеются уникальные ресурсы небокситовых руд, представленные кианитовыми сланцами Больших Кейв. Месторождения Кейвской группы расположены в северо-восточной части Кольского п-ова (рис. 2).



Рис. 2. Географическое положение Кейвской провинции высокоглиноземистых сланцев

Высокоглиноземистые сланцы представляют собой метаморфизованные осадки архейского возраста. Сланцы смяты в синклиналию протяженностью около 200 км. Мощность продуктивной серии – до 1 км. В ее пределах выделяются три свиты и семь пачек. В наиболее высокоглиноземистой пачке Б мощностью 25-340 м выявлено 27 месторождений кианита: Воргельурта, Тавурта, Тяпш-Манюк, Червурта, Большой Ров, Безымянная, Кырпурта, Ягельурта, Шууурта и др. (рис. 3). Кианит и другие высокоглиноземистые минералы присутствуют и в других пачках, что может обеспечить значительное расширение ресурсов. В настоящее время Б. Кейвы представляют крупнейшую в мире провинцию высокоглиноземистого сырья. В кейвских сланцах сосредоточено более 90% разведанных запасов кианитовых руд России. Запасы руды до глубины 100 м – 966 млн. т, ресурсы – 11 млрд. т. Запасы кианита – 338 млн. т, ресурсы – 2 млрд. т. Благоприятные условия залегания рудных тел позволяют отрабатывать их открытым способом при высоких технико-экономических показателях [6].



Рис. 3. Положение главных месторождений кианитовых и силлиманитовых руд в структуре Больших Кейв

Минеральный состав кианитовых сланцев: главные – кианит, кварц; второстепенные – мусковит, плагиоклаз, ставролит, цинксоодержащий ставролит, графит, диксит, пирротин, пирит, рутил, ильменит; аксессуары – халькопирит, пентландит, виоларит, магнетит, молибденит, галенит, сфалерит, золото, макинавит, халькозин, лимонит, гематит, биотит, хлорит, гранат, клиноцоизит, апатит, циркон, ортит, монацит, хатонит, титанит, флюорит. Химический состав кианитовых сланцев (%): SiO_2 58,47-61,58; Al_2O_3 28,83-35,76; TiO_2 0,66-2,28; Fe_2O_3 0,07-2,28; FeO 0,20-1,07; CaO 0,18-0,74; MgO 0,08-0,50; S 0,01-0,68; P_2O_5 0,12-0,26; $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 1,0-2,21.

Существенных различий в составе кианитовых руд разных месторождений не наблюдается, отмечается обогащение Al_2O_3 в месторождениях с преобладанием конкреционных руд, что соответствует повышенной концентрации в них кианита. Игольчатые руды в отличие от конкреционных беднее глиноземом, но содержат больше щелочей, а конкреционные обогащены железом и графитом [4, 5]. Заметим, что примеси железа и титана связаны со ставролитом, ильменитом и рутилом, которые при обогащении удаляются [2].

Текстуры кианитовых руд

Особенностью кейвских месторождений кианита является значительное изменение текстур руд в разных месторождениях. Последняя играет существенную роль для выбора метода обогащения. Вслед за И.В.Бельковым [4] выделяют три основных типа руд. К первому относятся волокнисто-игольчатые руды, в которых кианит присутствует в виде радиально- и сноповидно-лучистых агрегатов (рис. 4). Второй тип – параморфические руды, в которых кианит имеет вид игольчатых и призматических кристаллов (рис. 5). Третий тип – конкреционные руды, в которых кианит представлен эллипсоидными или шаровидными конкрециями (рис. 6). Некоторые месторождения представлены смешанными рудами. Роль разных типов руд в формировании месторождений неодинакова. Наибольший объем составляют волокнисто-игольчатые руды (61,9%), менее развиты параморфические (35,7%) и конкреционные руды (2,4%).

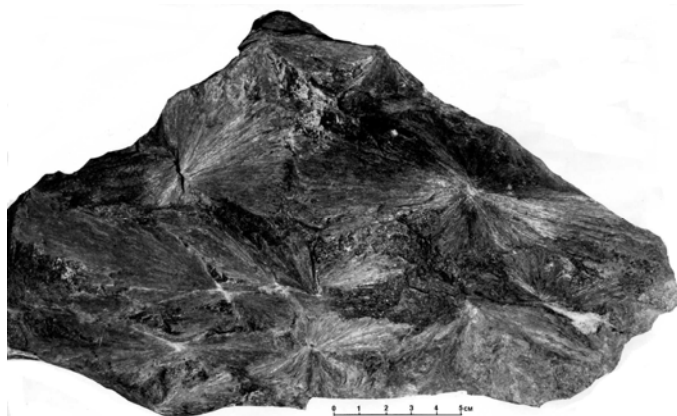


Рис. 4. Волокнисто-игольчатая руда

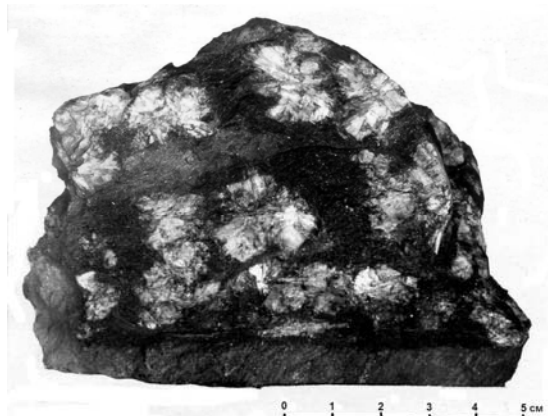


Рис. 5. Параморфическая руда



Рис. 6. Конкреционная руда. Светлое – кианит, темное – кварц

Обогащение руды каждого типа требует специальной технологии [1, 3]. Конкреционные руды относятся к крупновкрапленным и являются наиболее важными для промышленности. Из них можно извлекать зернистые агрегаты плотного кианита, необходимые для производства огнеупоров и электротехнического силумина, поскольку они изначально содержат крупные богатые сростки кианита, в которых находится небольшое количество вредных примесей – железа и титана. Наиболее рациональной технологией обогащения таких руд является гравитационно-флотационная, включающая обогащение в тяжелых суспензиях с получением зернистых кианитовых концентратов и флотацию кианита из отсевов и промежуточных продуктов обогащения.

Волокнисто-игольчатые, радиально-лучистые и параморфические руды имеют мелкую вкрапленность кианита во вмещающей породе в виде не крупных игольчатых кристаллов, призм или игольчато-лучистых скоплений, хаотически рассеянных в породе. Для раскрытия кианита необходимо измельчение руды. Такие руды целесообразно обогащать флотацией. Гравитационные процессы обогащения для них неприменимы из-за отсутствия хорошо выраженных обособлений кианита, а поэтому и небольшой разницы в удельных весах между полезным минералом и пустой породой.

Смешанные руды содержат крупно- и мелковкрапленные агрегаты кианита. Такие руды можно обогащать флотацией, но наиболее экономичной технологией может стать технология с предварительным обогащением в тяжелых суспензиях с целью отброса части пустой породы в отвал. Полученную тяжелую фракцию, в которой основная масса кианита присутствует в виде сростков с пустой породой, и мелкие классы руды, так называемые отсеvy, можно дообогащать флотацией с получением готовых кианитовых концентратов. Разработанная «Механобром» и КФ АН СССР гравитационно-флотационно-магнитная схема обогащения крупноконкреционной кианитовой руды месторождения Новая Шуурурта, проверенная в опытно-промышленных условиях на заводе «Сибэлектросталь», обеспечивает получение кианитовых концентратов с содержанием 56-57% Al_2O_3 , около 40% SiO_2 и 0,6% FeO [1-3]

В 1971 г. ВАМИ совместно с другими организациями составлен технико-экономический доклад «О промышленном использовании кианитов Кейвских месторождений». В нем сделан вывод о том, что на базе этих месторождений целесообразно организовать производство кианитового концентрата для получения из него высокоглиноземистых огнеупоров и алюминиевых сплавов. Мощность Кейвского ГОКа могла составить около 3,2 млн. т. руды с выпуском 1 млн. т. кианитового концентрата, из которого 650 тыс. т. предусматривалось для производства высокоглиноземистых огнеупоров и 350 тыс. т. – алюминиевых сплавов. Основными препятствиями для освоения кейвских месторождений считается удаленность от транспортных магистралей и потребителей, а также отсутствие источников электроэнергии. В настоящее время ситуация меняется в положительную сторону. Во-первых, на побережье Баренцева моря, в 70 км от карьера Новая Шуурурта, в п. Гремиха после ликвидации военной базы освобожден незамерзающий морской порт (рис. 2). Во-вторых, в связи с освоением Штокмановского газоконденсатного месторождения появляется возможность строительства тепловой станции на природном газе.

Геологическое строение месторождения Новая Шуурурта

Месторождение Н. Шуурурта расположено в центральной части Б. Кейв напротив п. Гремиха на побережье Баренцева моря. Это наиболее крупное месторождение с широким развитием богатых крупноконкреционных руд. Оно является одним из самых перспективных по размерам и изученности. Здесь проведено детальное технологическое изучение обогатимости руд, месторождение рекомендовано к первоочередному освоению [6]. Залежь кианитовых сланцев представлена тремя разновидностями, залегающими пластами (снизу вверх): параморфическими кианитовыми рудами со средней мощностью 35 м; крупноконкреционными кианитовыми рудами со средней мощностью 105 м, мелкоконкреционными кианитовыми сланцами со средней мощностью 25 м. Простираение залежи субширотное, падение к северу под углом 35-40°. Размеры залежи: длина около 6 км, ширина до 300 м. Рудное тело выходит на поверхность и

прослежено до глубины 300 м (рис. 7). Ресурсы руд оцениваются в 1 млрд. т при содержании кианита 41,5% [6]. Таким образом, имеются благоприятные условия отработки открытым способом.

Общая характеристика руд

Геохимической особенностью кейвских сланцев является сочетание глинозема с углеродом, серой, титаном, редкими и редкоземельными элементами, золотом [4-6, 11]. Хотя специализация кейвских руд определяется кианитом, дополнительно выявленные черты металлоносности несомненно заслуживают специального изучения. Наибольший интерес представляют акцессории: оксиды титана - рутил и ильменит; сульфиды - пирротин, пентландит и халькопирит; графит (рис. 8), а также минералы редких и редкоземельных элементов – как возможные источники дополнительных полезных компонентов кианитовых руд, повышающие их значение как комплексного сырья. Вместе с тем, и главные породообразующие минералы кианитовых сланцев – кварц и мусковит – могут успешно выделяться в отдельные продукты, что позволяет предполагать возможность разработки почти безотходной технологии использования кианитовых руд Б. Кейв (рис. 8).

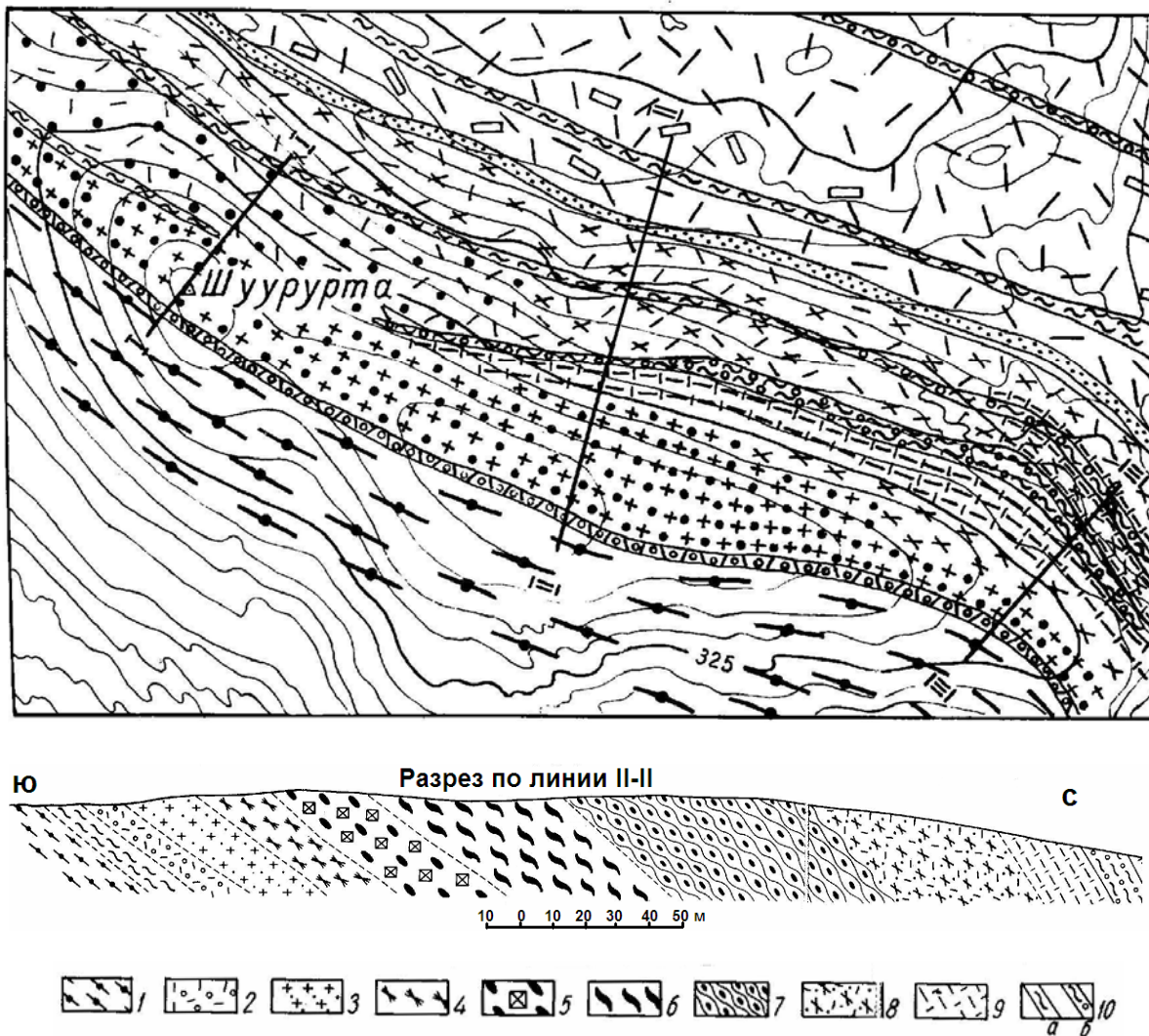


Рис. 7. Геологическая схема месторождения Н. Шуурурта [4]: 1 - гранат-биотитовые гнейсы; 3 - сланцы пачки А; 3-7 - кианитовые сланцы: 3 - мелкоконкреционно-параморфические, 4 - агрегатно-волокнистые, 5 - конкреционно-параморфические, 6 - крупноконкреционные, 7 - мелкоконкреционные; 8 - ставролитовые порфиробластические сланцы; 9 - ставролит-кианитовые порфиробластические сланцы. 10 - амфиболиты: а – полевошпатовые, б – гранат-полевошпатовые.

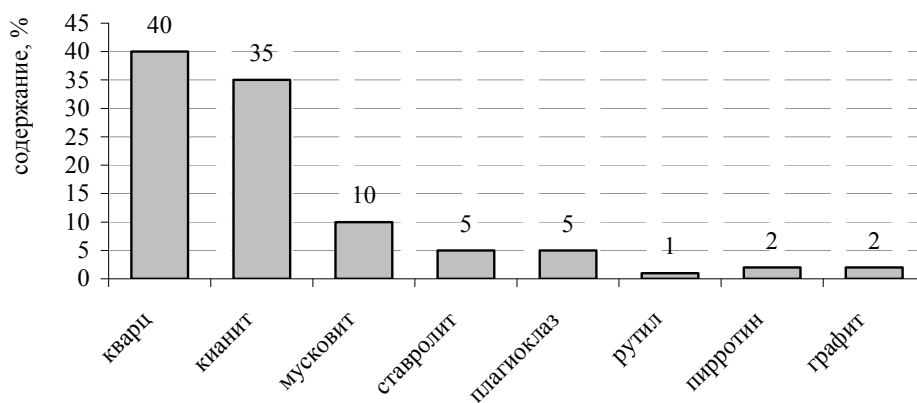


Рис. 8. Содержание главных минералов кианитовых руд

Следует иметь в виду, что в конкреционных кианитовых рудах месторождения Н. Шууурта выделяют четыре компонента: кианитовые конкреции и параморфозы, кварцевый субстрат и прожилки (рис. 9, табл. 1).



Рис. 9. Текстура руды месторождения Н. Шууурта: 1 – конкреции, 2 – параморфозы, 3 – субстрат, 4 – кварцевые прожилки

Таблица 1. Минеральный состав основных компонентов кианитовых руд

	Конкреции	Параморфозы	Кварцевый субстрат	Кварцевые жилки
Объем, %	40	10	45	5
Содержание минералов				
Кианит	75-97	40-85	0	0
Кварц	1-20	7-50	80-95	85-93
Мусковит	0-3	5-10	1-10	5
Рутил	0,1-2	<1	1-5	1-10
Графит	1-5	<1	3-10	0-1
Сульфиды	<1	<1	<1	ед. зерна

Из этих данных следует, что 50% объема руды не содержит кианита, а границы между кианитовыми и «пустыми» фазами контрастные.

Технология обогащения кианитовых руд месторождения Новая Шууурта

Технологические исследования обогатимости руд выполнены на ряде типичных месторождений, но наиболее основательные исследования проведены с рудами месторождения Н. Шууурта [2], поскольку здесь заложен карьер и отобрано несколько крупных технологических проб. Лабораторные исследования выполнены на конкреционной руде (рис. 6, 9), средний состав которой (%): Al_2O_3 32,53, TiO_2 0,98, Fe_2O_3 1,12, K_2O 0,94, SiO_2 60,68. В чистых разностях конкреционного кианита содержание глинозема высокое и составляет 60,21%, а вредных примесей – низкое (%): Fe_2O_3 - 0,12, TiO_2 - 0,35. Это соответствует минералогическим данным о составе конкреций (табл. 1).

В результате разработана технологическая схема (рис. 10), позволяющая получать качественные кианитовые концентраты (табл. 2), пригодные для использования в различных отраслях народного хозяйства, в первую очередь в алюминиевой промышленности [3]. Флотационная ветвь схемы извлечения кианита из руды месторождения Н. Шуурурта проверена на непрерывно действующей установке производительностью 40 кг/ч. По этой схеме проведены полупромышленные испытания представительной пробы руды месторождения Новая Шуурурта весом 1200 т. на заводе «Сибэлектросталь» в г. Красноярске. Состав руды (%): кианита 38,53, TiO_2 1,03; Fe_2O_3 0,95; S 0,16. Результаты полупромышленных испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты лабораторных исследований обогащения руды месторождения Новая Шуурурта (%) [2]

Концентрат	Выход	Извлечение Al_2O_3	Содержание		
			Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2
Концентрат из отсевов (5+0 мм)	8,5	17,8	54,99*	1,13	2,69
Концентрат из промпродукта	7,1	16,0	57,63**	0,41	0,85
Концентрат из руды крупностью -16+5 мм	20,5	44,0	56,16***	0,25	0,45

Примечание. Содержание Al_2O_3 на прокаленное вещество (%): * 56,36; ** 58,91; *** 57,86

Таблица 3. Суммарные результаты полупромышленных испытаний (%)

Продукты	Выход	Содержание			Извлечение кианитового глинозема
		Al_2O_3 (кианитовый)	Fe_2O_3	TiO_2	
Концентраты					
Тяжелой суспензии	20,1	56,7	0,55	0,5	42,1
Флотоконцентрат из отсевов	5,6	50,1	2,1	5,0	10,5
Флотоконцентрат из промпродуктов	7,0	57,5	0,6	0,9	15,0
Общий	35,7	55,3	-	-	67,6
Хвосты					
Тяжелой суспензии	15,5	8,4	-	-	4,8
Флотация отсевов	20,2	8,3	-	-	6,4
Флотация промпродукта	5,9	15,0	-	-	3,3
Магнитная фракция отсевов	1,0	28,6	-	-	1,1
Магнитная фракция промпродуктов	0,15	35,8	-	-	0,2
Общие хвосты	42,75	9,8	-	-	15,8
Шламы					
Из первичных отсевов	4,6	15,5	-	-	2,7
От флотации отсевов	16,0	14,0	-	-	8,7
От флотации промпродукта	3,95	35,6	-	-	5,2
Общие шламы	24,55	18,1	-	-	16,6
Исходная руда	100,0	26,8	-	-	100,0

В результате испытаний получена опытная партия кианитового концентрата около 170 т. для промышленных плавов на силумин на Днепровском алюминиевом заводе. Электротермической плавке было подвергнуто 100 т. концентрата. Плавки показали, что этот способ получения силумина и алюминиевых литейных сплавов из кианитового концентрата экономически гораздо более выгоден в сравнении с синтетическим. Кианитовое сырье позволяет полностью исключить затраты на получение кремния и сократить потребность в электролитическом алюминии. Кроме того, кианитовый концентрат отличается более высоким качеством по сравнению с каолином – содержание Al_2O_3 56% вместо 37,5% при одинаковом содержании оксидов железа и титана [1].

Исследования по металлургии кианита

Традиционно кианит используется для получения огнеупоров муллитового ряда. ВАМИ проведены исследования по непосредственному получению из кианита алюминиево-кремниевых сплавов электротермически. Отмечается, что в интервале 1300-1800°C происходит восстановление SiO_2 , образующегося

в процессе муллитизации кианита, в интервале 1800-1900°C – свободной SiO₂, а образование алюминиево-кремниевых сплавов начинается выше 1900°C. При выплавке алюминиево-кремниевых сплавов газами уносится 5-10% алюминия и кремния [9].

Нами рассмотрена термодинамика процессов, протекающих в системе Al₂O₃ – SiO₂ – C, для продуктов муллитизации кианита $3(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$. Экспериментально показано, что система ведет себя как две формально независимые подсистемы: SiO₂ – C и Al₂O₃ – C. В ней термодинамически наиболее вероятны реакции, приводящие к образованию карбида кремния $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + 9\text{C} \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{SiC} + 6\text{CO}$ с частичным образованием и транспортированием по объему образца монооксида кремния ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO} + 2\text{CO}$) и последующим образованием карбида кремния при встрече SiO с углеродом. Организация этих процессов в реальных условиях позволила получить высокотермостойкие муллитографитовые огнеупоры (50 теплосмен, 1300°C – вода).

В системе кианит-углерод предварительный восстановительный обжиг на брикет необходим из технологической целесообразности. В качестве алюмосиликатного компонента использовали кианитовую руду месторождения Н. Шуурурта. Химический состав кианитовой руды (%): Al₂O₃ 40,94; SiO₂ 53,0; K₂O 1,31; CaO 1,57; TiO₂ 1,16; Fe₂O₃ 0,58; C 2,33. Гранулометрический состав руды (мас. %): 32 (фр. 2,5-1 мм), 12 (1-0,4), 5 (0,4-0,315), 10 (0,315-0,16), 14 (0,16-0,063), 27 (<0,063). С целью создания условий, препятствующих прямому контакту зерен муллита, SiO₂ и Al₂O₃ с углеродом, блокирующих термодинамически наиболее вероятные реакции карбидизации и обеспечивающих свободную диффузию восстановительных газов и газообразных продуктов, образцы не прессовали, а готовили в виде окатышей с добавлением разрыхлителя. В этих условиях в системе преимущественно протекали реакции высокотемпературной диссоциации диоксида кремния на газообразные компоненты [7]: (1) $\text{SiO}_2(\text{тв}) = \text{SiO}(\text{газ}) + \text{O}(\text{газ})$, (2) $2\text{SiO}_2(\text{тв}) = 2\text{SiO}(\text{газ}) + \text{O}_2(\text{газ})$, (3) $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiO}(\text{газ}) + 0,5\text{O}_2$. Присутствие в системе свободного углерода сдвигало равновесие в сторону образования газообразных продуктов. Определяющая роль SiO в процессе переноса кремнезема подтверждена нами в специальных экспериментах.

В условиях, моделирующих открытую систему, углерод шихты, присутствующий в образце, не принимает участия в восстановлении оксида кремния свободного или связанного в муллит путем прямого контакта с ним, но сдвигает равновесие реакций (1-3) в сторону образования SiO. Благодаря такому побочному действию углерода, кремнезем, образующийся в процессе муллитизации кианита, в присутствии углерода эффективно диссоциирует при высокой температуре с образованием газообразного SiO, который диффундирует из объема образца, унося кремний, восстанавливается и диспропорционирует на углероде засыпки по реакциям ($\text{SiO}_\Gamma + 2\text{C}_\text{тв} = \text{SiC}_\text{тв} + \text{CO}_\Gamma$ и $2\text{SiO}_\Gamma \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Si}$) с образованием SiC, SiO₂ и Si [7]. В условиях, моделирующих псевдооткрытую систему, получен концентрат Al₂O₃ (98%) с отношением Al₂O₃ / SiO₂ более 700 – прекурсор для получения корундовых огнеупоров, силумина и металлического алюминия.

Перспективы извлечения попутных компонентов

Сульфиды. В кианитовой руде присутствуют селенистый пирротин, пентландит, халькопирит, сфалерит, молибденит и другие сульфиды. Сульфидный концентрат получен электромагнитной сепарацией и флотацией. При переработке руды выделяется 2,1% сульфидного концентрата от объема руды. Из магнитной фракции флотацией выделен пирротин с содержанием 85-87%, общий выход из руды – 1,12% (общее извлечение около 50%). В пирротине установлено присутствие примесей (%): Ni 0,176; Co 0,164; в составе сульфидного концентрата (%): Co 0,09-0,17; Ni 0,11-0,23; Se 0,0005-0,0021; Au 0,18-0,52 г/т и др. [14]. Предполагаемый выход сульфидного продукта при данном извлечении – 5 кг на каждую тонну руды. Ресурсы (т.): Au > 7000, Ni 34000, Co 26000, Se 260. Исследование состава сульфидов продолжается.

Ставролит. Ставролитовый концентрат отделяют при электромагнитной сепарации кианитовых сланцев, поскольку он является вредной примесью (из-за высокого содержания железа) и рассматривается как отходы производства. Среднее содержание в руде 5%, прогнозные ресурсы в кианитовых рудах более 100 млн. т. Ресурсы ставролита в пачке Г до глубины 200 м более 4,5 млрд. т. Ставролит может быть использован как альтернативный источник применяемых в черной металлургии флюсов-разжижителей, а именно – флюорита и боксита [10]. Технология выплавки стали с применением ставролитового концентрата успешно внедрена на Макеевском металлургическом комбинате. Добавка ставролита увеличивает скорость и степень дисульфурации металла в 1,2-1,5 раза, повышает выход стали на 0,28-0,65% и снижает его себестоимость. Ставролитовый концентрат экологически чист, не содержит токсичных, в первую очередь фтористых, и взрывоопасных соединений, не гигроскопичен, имеет ровный гранулометрический состав. Его использование вместо флюорита значительно улучшает экологическую обстановку производства. Ставролит может быть самостоятельным высокоглиноземистым новым видом сырья. При положительном решении вопроса перед Мурманской областью открывается перспектива монопольного обеспечения ставролитовым сырьем металлургических заводов северо-запада России. Использование ставролита в качестве нового полезного ископаемого резко увеличивает значение Больших Кейв как источника комплексных руд. Исследования ставролита продолжаются.

Титановые минералы. Кианитовые руды содержат в своем составе от 1 до 10 % ильменита и рутила, при среднем содержании около 1-2 %. Особенно высокие концентрации рутила наблюдаются в мусковит-кварцевых жилах, развивающихся в графит-кварцевом субстрате (рис. 11). Титановые минералы практически не связаны с кианитом, поэтому они будут оставаться в хвостах обогащения в ассоциации с кварцем и мусковитом. Ресурсы более 100 млн. т.

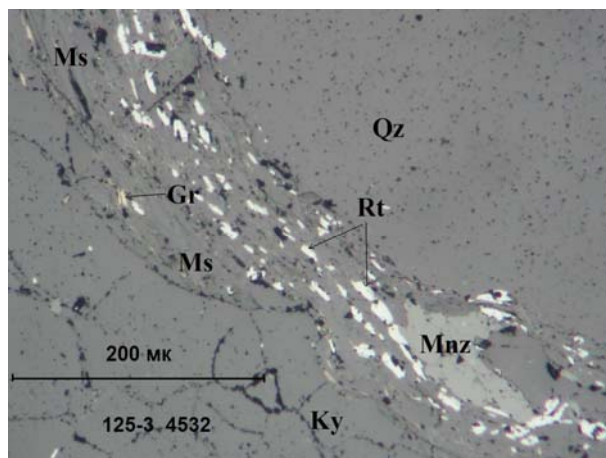


Рис. 11. Кварцевые жилы с рутилом и монацитом: Qz – кварц, Ms – мусковит, Gr – графит, Rt – рутил, Ky - кианит

Графит. Среднее содержание графита в кианитовой руде около 2%. В кварц-мусковитовом субстрате содержится 3% графита, вблизи конкреций и кварцевых жил наблюдается обогащение кварц-мусковитового агрегата графитом до 5%. Флотацией получен концентрат графита с содержанием 20-25%. В концентрате установлено присутствие Au 0,025 г/т. Ресурсы более 100 млн. т.

Редкие элементы. Содержание редких элементов Sc, Zr, Hf, Th в кианитовой руде составляет в сумме 0,23-0,25%, что позволяет оценить их ресурсы в кейвских сланцах в 27-29 млн. т. и рассматривать их как новую потенциальную базу редких элементов. Лабораторным методом из крупноконкреционной руды нами был получен черновой концентрат и достигнуто содержание редких элементов 0,37%. Тем самым доказана возможность получения концентрата редких элементов из рядовых конкреционных кианитовых руд. Дальнейшие исследования позволят определить минеральные фазы и оценить реальный выход редких элементов при комплексном обогащении кианитовой руды.

Редкоземельные элементы. Результаты химических анализов показали, что в конкреционной кианитовой руде содержание РЗЭ варьирует от 0,04 до 0,18%. Прогнозные ресурсы кианитовых руд до глубины 100 м – 11,7 млрд. т [6], ресурсы РЗЭ – от 4,7 до 21,1 млн. т. По этим показателям Б. Кейвы сопоставимы с крупными месторождениями РЗЭ [12, 13] и превосходят запасы некоторых стран-экспортеров, что позволяет рассматривать их как новую потенциальную базу РЗЭ.

Лабораторным методом из крупноконкреционной руды нами получен черновой концентрат РЗЭ. Достигнуто содержание суммы РЗЭ и иттрия 1,62%. Результаты анализа свидетельствуют, что концентрирование РЗЭ происходит неравномерно, элементы цериевой группы (от La до Gd) сконцентрировались в 11-13 раз относительно исходной руды, элементы иттриевой группы – в 1,5-8 раз. В 13 раз увеличилась и концентрация Th. Рентгенометрические данные показали присутствие в концентрате монацита. По совокупности минералогических данных можно предполагать, что основным концентратом цериевой группы РЗЭ и Th является монацит. Он ассоциирует с рутилом и цирконом в мусковит-кварцевых жилах (рис. 11). Другие концентраты РЗЭ будут установлены при более детальных исследованиях. Дальнейшие исследования позволят оценить реальный выход РЗЭ при комплексном обогащении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.С.* Обогащение кианитовых руд // Освоение минеральных богатств Кольского п-ова. Мурманск: Мурманское кн. изд-во, 1974. С. 191-211.
2. *Алексеев В.С.* Теория и практика обогащения кианитовых руд. Л.: Наука, 1976. 199 с.
3. *Алексеев В.С., Морозов Г.Г., Антоненко Л.Е.* Разработка технологии обогащения кианитовых руд Кейвского месторождения. Новые направления в обогащении руд. М.,-Л.: Наука, 1966.
4. *Бельков И.В.* Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.,-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 321 с.
5. *Бельков И.В.* Кианитовые месторождения // Минеральные месторождения Кольского п-ова / Горбунов Г.И., Бельков И.В., Макиевский С.И. и др. Л.: Наука, 1981. С. 163-177.
6. *Бельков И.В., Истомин А.В., Матвеев Б.А.* Экономические предпосылки разработки открытым способом месторождения Н. Шуурурта // Теория и практика работы карьеров Заполярья. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1974. С. 14-19.

7. Гришин Н.Н., Белогурова О.А., Иванова А.Г. Обогащение кианита путем карботермического восстановления // Новые огнеупоры. 2010. № 6. С. 11-20.
8. Исследование процессов комплексной переработки небокситовых руд дальневосточного региона России / Римкевич В.С., Маловицкий Ю.Н., Демьянова Л.П. и др. // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 3. С. 66-74.
9. Останин Ю.Д. Изучение промежуточных соединений, образующихся при восстановлении кианитового концентрата углеродом // Тр. ВАМИ. № 89. Производство алюминия. / Останин Ю.Д., Бухбиндер А.И., Баймаков А.Ю. Л.: ВАМИ, 1974. С. 79-85.
10. Попова Б.С., Полуновский Р.М., Кривонос В.П. Ставролит – новый прогрессивный вид горно-металлургического сырья // Тез. докл. VIII съезда ВМО. СПб.: СПГИ (ТУ), 1992.
11. Перспективы освоения новых видов минерального сырья северо-запада России / Нерадовский Ю.Н., Войтеховский Ю.Л., Касиков А.Г. и др. // Северные территории России: проблемы и перспективы развития: Матер. Всерос. конф. Архангельск: изд. ИЭПС УрО РАН, 2008. С. 958-961.
12. Распоряжение МПР РФ от 05.06.2007 N 37-р "Об утверждении Методических рекомендаций по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых".
13. Самсонов А.Е., Самсонов А.А. // www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=385.
14. Токарев В.А., Яценко А.В. Кейвский селенистый пирротин // Матер. по минералогии Кольского п-ова. Вып. 6. Л.: Наука, 1968. С. 67-69.
15. <http://www.mineral.ru/Facts/russia/131/279/index.html>.

РЗЭ В КИАНИТОВЫХ СЛАНЦАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НОВАЯ ШУУРУРТА

Войтеховский Ю.Л.¹, Нерадовский Ю.Н.¹, Гришин Н.Н.²

¹ Учреждение Российской академии наук Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

² Учреждение Российской академии наук Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, Апатиты

voyt@geoksc.apatity.ru; nerad@geoksc.apatity.ru; grishin@chemy.kolasc.net.ru

Введение

Большие Кейвы известны как уникальное месторождение высокоглиноземистых кристаллических сланцев на северо-западе европейской части России. Геохимической особенностью кейвских сланцев является сочетание глинозема с углеродом, серой, титаном, редкими и редкоземельными элементами, золотом [2, 3, 8, 9, 10, 13]. По мнению [8], «анализ распределения петрогенных и малых элементов в разрезе пород кейвской метаморфической серии и по отдельным петрографическим разновидностям пород позволяет констатировать наличие повышенных концентраций ряда элементов, указывающих на особенности металлогенической специализации отдельных типов пород и уровней разреза. Среди этих элементов выделяются алюминий, титан, железо, медь, ванадий, фосфор, цирконий, редкие земли. Хотя металлогеническая специализация всего комплекса пород кейвской серии, безусловно, определяется наличием в составе сланцев пачки Б известных месторождений кианита, дополнительно выявленные черты металлоносности отдельных разновидностей пород и уровней стратиграфического разреза несомненно заслуживают специального изучения». Наибольший интерес представляют, на наш взгляд, редкоземельные элементы как возможный источник дополнительных полезных компонентов кианитовых руд, повышающий их значение как комплексного сырья.

Распределение РЗЭ в породах Больших Кейв

Наиболее детальный анализ геохимических особенностей РЗЭ Б. Кейв ранее выполнен на основе полного разреза высокоглиноземистых кристаллических сланцев, который включает 7 пачек [2], входящих в состав трех свит: песчово-тундровской, выхчуртской и червуртской. В результате установлено неравномерное распределение РЗЭ в различных породах [8, 9] (табл. 1). Причиной неравномерного распределения РЗЭ предполагалась их связь с древними россыпями. В связи с этим особое внимание акцентировалось на породах базальной пачки А, в которых «отмечаются повышенные содержания циркония, редких земель, иногда фосфора, связанные с присутствием циркона, обнаруживающего признаки обломочного происхождения, и с другими акцессорными минералами – апатитом, сфеном, монацитом, ортитом, и верхних пачек Д, Е, Ж, в связи с приуроченностью к ним первично россыпных редкометалльных рудопроявлений [6]. Наиболее перспективным участком для выявления повышенных концентраций тяжелых минералов являются литологически разнородные породы пачек Е и Ж, завершающие разрез свиты Кейв [8]. Кианитовые и ставролит-кианитовые сланцы пачек Б и Г не рассматривались как перспективные на РЗЭ в связи с отсутствием признаков концентрирования в каких-либо минералах.

По данным [9], спектры РЗЭ пород сланцевого комплекса и подстилающих гнейсов сходны (рис. 1), те и другие обогащены легкими РЗЭ, что соответствует распределению в осадочных породах [5] и