

Геологический институт КНЦ РАН  
Кольское отделение РМО

Всероссийское совещание

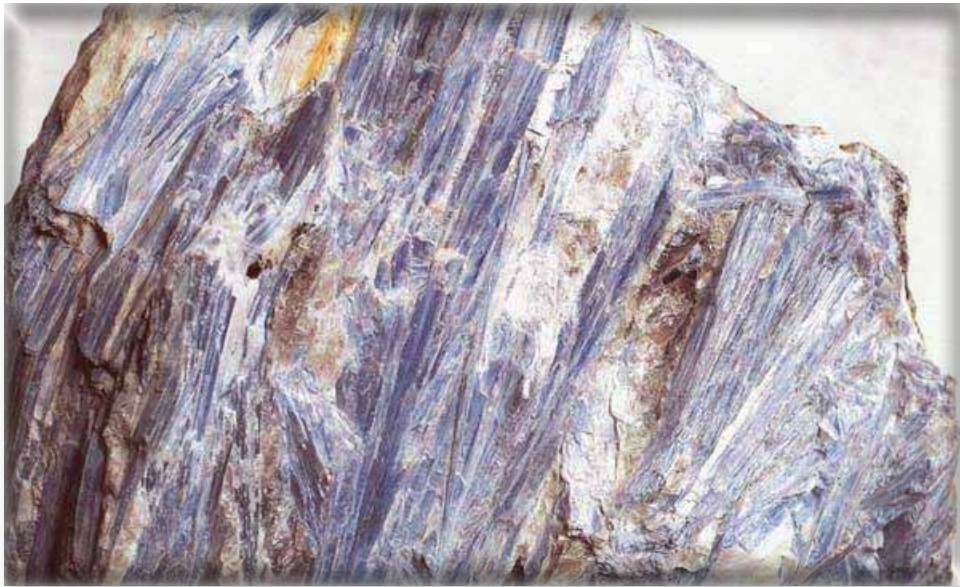
«Проблемы освоения кианитовых месторождений  
Кольского полуострова, Карелии и Урала»,  
посвящённое 80-летию Кольского НЦ РАН

Апатиты, 15 ноября 2010 г.

*Учреждение Российской академии наук  
Геологический институт КНЦ РАН*

*Российское минералогическое общество  
Кольское отделение*

*«Проблемы освоения кванитовых месторождений  
Кольского полуострова, Карелии и Урала»*



*Материалы Всероссийского совещания,  
посвящённого 80-летию Кольского ИЦ РАН  
15 ноября 2010 г.*

*Апатиты, 2010*

УДК 549.613.3 + 553.615 (234.85 + 470.21 + 470.22)  
ISBN 978-5-902643-08-1

Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала. Материалы Всероссийского совещания, посвящённого 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, Кольское отделение РМО, 15 ноября 2010 г. / Ред. Ю.Л. Войтеховский. – Апатиты: Изд-во К & М, 2010. – 186 с.

Сборник содержит материалы Всероссийского совещания по программе № 23 фундаментальных исследований Президиума РАН «Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов», посвящённого новейшим результатам изучения геологии и минералогии кианитовых месторождений Кольского п-ова, Карелии и Урала, а также технологиям обогащения и извлечения полезных компонентов из этого нетрадиционного комплексного высокоглинозёмистого сырья. Издание представляет интерес для геологов широкого профиля и студентов геологических специальностей.

Электронная версия: <http://geoksc.apatity.ru/print/files/knt.pdf>

Научный редактор: проф., д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский  
Компьютерный дизайн: А.А. Тележкин, Н.А. Мансурова, Л.Д. Чистякова

© Коллектив авторов, 2010

© Российское минералогическое общество, Кольское отделение, 2010

© Учреждение Российской академии наук Геологический институт Кольского научного центра РАН, 2010

### ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА



Конференция «Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского п-ова, Карелии и Урала» была созвана в соответствии с программой № 23 фундаментальных исследований Президиума РАН «Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов», возглавляемой акад. РАН Д.В. Рундквистом (фото), и состоялась в Геологическом институте КНЦ РАН 15 ноября 2010 г. под научным руководством акад. РАН В.А. Коротеева (фото), координатора раздела «Минералы группы силлиманита...». В конференции также принял участие председатель Кольского НЦ РАН акад. РАН В.Т. Калинин (фото), что подтверждает её высокий статус. Конференция проведена по результатам двухлетних исследований по программе с целью оптимального планирования и финансирования её заключительного этапа.

Участниками программы № 23 (Геологический институт КНЦ РАН, Горный институт КНЦ РАН, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Институт геологии КарНЦ РАН) получены результаты, указывающие на комплексный характер руд (попутные Au, Zr, Ce, Ni, Co, Te) и возможность существенного увеличения (за счёт ставролитовых и силлиманитовых сланцев) ресурсов кианитовых месторождений Кольского п-ова, Карелии и Урала – стратегического резерва РФ по Al. Экспериментально показана возможность раздельного получения кианитового, ставролитового (с Zr, Ce), сульфидного (с Au, Ni, Co, Te) и графитового (с Au) концентратов. Сделан шаг вперёд в разработке технологии получения глинозёма из кианитовых руд. Эти результаты и стали предметом обсуждения на конференции.



Конференция состоялась в Геологическом институте КНЦ РАН не случайно, ведь именно Б. Кейвы на Кольском п-ове содержат около 95 % балансовых запасов кианита РФ, что существенно превышает суммарные запасы зарубежных стран. Именно здесь около 40 лет назад поставлены на государственный баланс более 20 месторождений кианитовых руд. Вполне закономерно, что проблема их освоения имеет сильный региональный акцент и предусмотрена в новой стратегии развития горно-геологической отрасли Мурманской области, разрабатываемой под руководством губернатора Д.В. Дмитриенко (фото). Также понятно, что с учётом масштабов проблемы и географии промышленных мощностей к её решению должны быть привлечены горно-промышленный и металлургический комплексы Урала и Сибири.

В программу конференции было заявлено 8 докладов. Все они приведены в настоящем сборнике. Некоторые авторы предоставили материалы в виде статей, другие – в формате PowerPoint. В первом случае преобладает текст, во втором – иллюстрации, подчас не менее содержательные. С целью сохранить максимум информации оргкомитет решил опубликовать после редактирования и то, и другое, а также приложить публикации в ведущих региональных газетах, активно освещавших конференцию (ещё бы, ведь отработка кианитовых месторождений на Кольском п-ове обеспечила бы региону немалое число рабочих мест!), и фоторепортаж. Надеюсь, материалы конференции будут интересны геологам широкого профиля, студентам геологических специальностей и историкам науки.



*Директор Геологического института КНЦ РАН  
Председатель Кольского отделения РМО  
Проф., д.г.-м.н.*

*Ю.Л. Войтеховский*

## МИНЕРАЛЫ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КИАНИТОВЫХ СЛАНЦАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ Н. ШУУРУРТА, Б. КЕЙВЫ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ

Войтеховский Ю.Л., Нерадовский Ю.Н., Савченко Е.Э.  
Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

*В статье сообщаются новые результаты минералогического изучения кианитовых руд месторождения Н. Шуурурта, Б. Кейвы, Кольский п-ов. В периферических зонах кианитовых конкреций установлена редкометальная и редкоземельная минерализация (циркон, монацит), что может в итоге привести к стоимостной переоценке этих комплексных руд. Предполагается, что минерализация сформировалась не за счёт выталкивания элементов при росте конкреций (Бельков, 1963), а скорее за счёт привноса минералообразующих элементов в систему при метаморфизме кейвской толщи или воздействии на них щелочных гранитов.*

Месторождение Н. Шуурурта – одно из самых перспективных по размерам и изученности. Здесь проведено детальное технологическое изучение обогатимости руд (Алексеев, 1974; Бельков, 1981). Необходимо дальнейшее изучение особенностей распределения минералов, определяющих технологические свойства руд. Один из вопросов – условия накопления редких металлов в кианите. Ему посвящён ряд работ (Лутц, 1967; Гаскельберг, Рубинраут, 1974; Бельков и др., 1976). В отличие от ранее выполненных геохимических исследований, нами проведено минералогическое исследование редкометальной минерализации и её связи с основными текстурно-структурными элементами кианитовой руды.

Главный тип руд на месторождении Н. Шуурурта – конкреционные. На поверхности они имеют бугристый излом со слюдистой оболочкой вокруг агрегатов кианита (рис. 1). Конкреции имеют разнообразные формы и строение, наиболее распространённой является эллипсоидальная. Форма конкреции, видимая в сколе, не совпадает с истинной формой кианитового агрегата, поскольку излом проходит не по границе кианита, а по прожилкам слюдисто-кварцевого состава, обрамляющим конкрецию (рис. 2). Размеры конкреций на месторождении Н. Шуурурта по измерениям в сечениях – от 10 × 7 до 110 × 60 мм, средний размер для 49 конкреций 36.6 × 20.3 мм, что соответствует крупно-конкреционным рудам (Бельков, 1963).



Рис. 1. Бугристая текстура конкреционной руды (Бельков, 1963).



Рис. 2. Слюдяная корка на поверхности конкреции, обусловленная сколом по мусковит-графит-кварцевому прожилку.

В срезах конкреций видно (рис. 3), что они не являются изолированными образованиями, а связаны взаимными переходами, что обусловлено их метасоматическим происхождением (Бельков, 1963). Независимо от размеров конкреции сложены тонковолокнистым кианитом, образующим сноповидные агрегаты, веерообразно расходящиеся от центра к периферии (рис. 4). Толщина кристаллов до 0.3 мм, соотношение с длиной 1:50 до 1:100. Кианит между зернами содержит включения графита, поэтому имеет серый цвет, но в центре крупных конкреций встречаются выделения белого кианита, не содержащего графита.

Химический состав кианита из конкреций стабилен, различий в содержаниях элементов не наблюдается (табл. 1). Состав кианита близок теоретическому. Кроме следов Fe, других примесей не обнаружено. Ранее приведенные данные о примесях TiO<sub>2</sub>, CaO и др. не подтвердились. Вероятно, они были связаны с минеральными включениями.

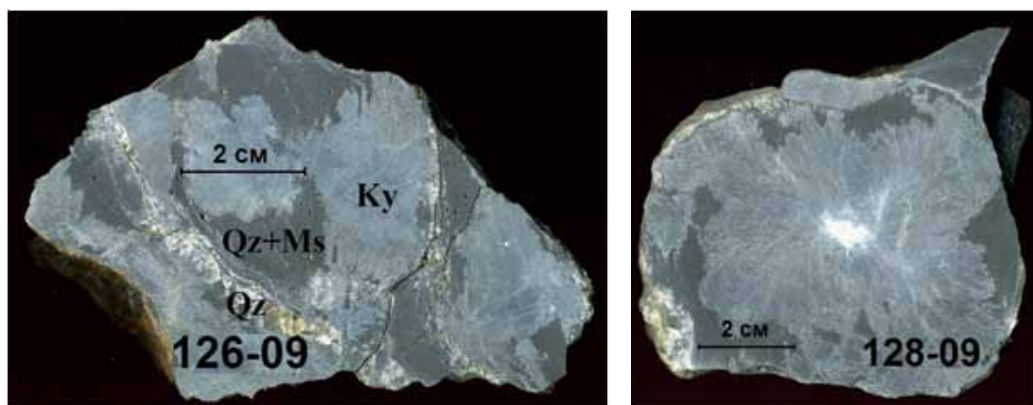


Рис. 3 (слева). Конкреционная текстура кианитовой руды. Кианит (Ky), кварц (Qz), субстрат (Qz+Ms).

Рис. 4 (справа). Строение крупной конкреции в срезе: ядро – кианит без примесей графита, периферия – тонкоигольчатый агрегат кианита в смеси с графитом. Чёрное – мусковит-графит-кварцевый субстрат. По оболочке конкреции видна мусковит-кварцевая жила.

Таблица 1. Химический состав кианита из конкреций.

Компоненты	Обр. 11/50	126/19	122-3	122-2	128-2	128-1
	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	35,2	35,6	36,87	36,9	37,13	36,49
TiO <sub>2</sub>	0,26	0,19	0	0	0	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61,55	60,05	62,97	62,94	62,95	63,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74	0,29	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
FeO	-	0,14	0,04	0,04	0,07	Не опр.
MgO	0	0,04	0	Не опр.	Не опр.	Не опр.
CaO	0,15	0,18	0	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Na <sub>2</sub> O	0	0,02	0	Не опр.	0,05	Не опр.
K <sub>2</sub> O	0	0	0	Не опр.	Не опр.	Не опр.
H <sub>2</sub> O	0	0	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
П.п.п.	2,19	3,44				
Сумма	100,09	99,95	99,92	99,88	100,2	99,73

Примечание: 1 – тонковолокнистый кианит крупных конкреций из поверхностной окисленной зоны, г. Тяпш-Манюку; 2 – тонковолокнистый кианит крупных конкреций из керна с глубины 92 м, г. Тяпш-Манюку (Бельков, 1963, мокрая химия); 3 – тонковолокнистый кианит на краю мелкой конкреции; 4 – тонковолокнистый кианит в центре мелкой конкреции; 5 – тонковолокнистый кианит на краю крупной конкреции; 6 – тонковолокнистый кианит в центре крупной конкреции; 3-6 коллекция авторов, месторождение Н. Шуурга. Микронзондовый анализ, Cameca MS-46, аналитик Е.Э. Савченко.

В минеральном составе конкреций выявлена интересная закономерность, подтверждённая на мелких и крупных конкрециях: в их периферических частях во включениях в кианите и в сростках с ним кроме кварца и графита присутствует группа аксессуариев: рутил, циркон, монацит, а также вкрапления (Zn, Fe, Mg), которые в центральных частях конкреций не встречаются. В строении конкреций также наблюдается чёткое различие между центральной и периферической частями. В центральной части структура конкреций тонкозернистая, кианит без огранки, включений других минералов не содержит. В периферической части зёрна кианита огранённые, структура идиоморфнозернистая, метазернистая, ситовидная (рис. 5-8), кристаллы кианита содержат многочисленные включения кварца, рутила, циркона, монацита и других минералов, между зёрнами присутствует графит. Результаты текстурно-структурного анализа подтверждают гипотезу о метасоматическом росте кианита в конкрециях и накоплении примесей графита по краям конкреций (Бельков, 1963). По данным ранее проведенных исследований конкреционные стяжения кианита образуются за счет замещения кианитом мусковит-графит-кварцевого субстрата. При этом кианит не включает примеси графита и рутила из субстрата, а выталкивает их к границам зёрен, что ведет к накоплению примесей в краевых частях. Но не все примеси, на-

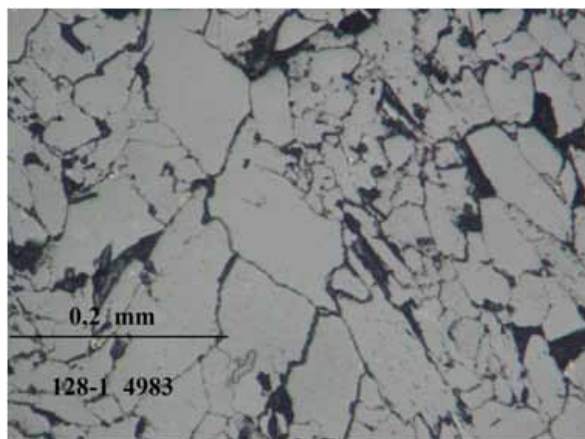


Рис. 5. Тонкозернистая структура конкреции в центральной части. Фото в отраженном свете.

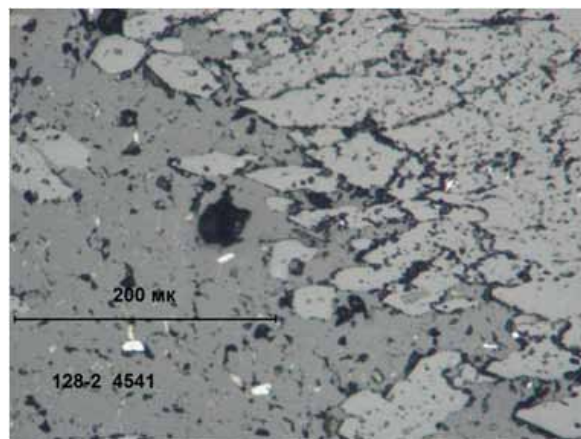


Рис. 6. Метазернистая структура кианита на периферии конкреции. Фото в отраженном свете.

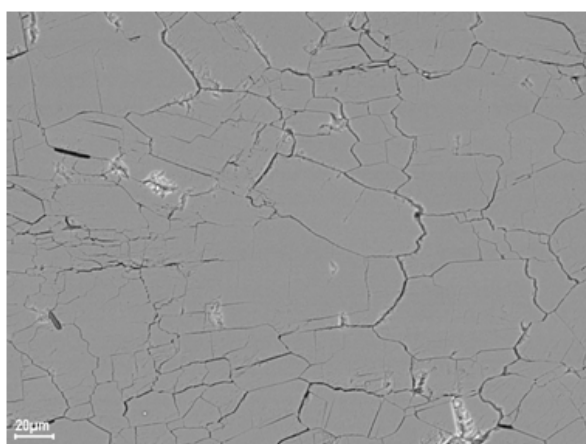


Рис. 7. Распределение минералов-примесей в кианите в центре конкреции: видны единичные зерна графита. Изображение в отраженных электронах.

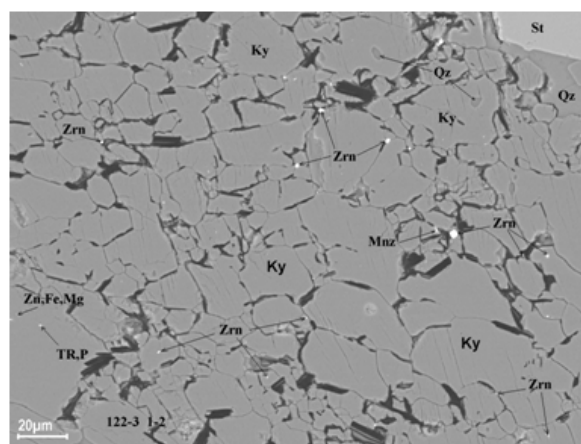


Рис. 8. Распределение минералов-примесей в кианите на краю конкреции: видны многочисленные зерна графита, циркона, кварца, монацита, ставролита и др. Изображение в отраженных электронах.

блюдающиеся в настоящее время в краевой зоне конкреций, присутствовали ранее в субстрате.

Наши исследования показали, что некоторые минеральные фазы отсутствовали в исходном субстрате и были привнесены в ходе роста конкреций. Об этом свидетельствуют состав и структура субстрата. Вмещающая среда конкреций – мусковит-графит-кварцевый субстрат. Он представляет собой тонкозернистый агрегат кварца (%) 88 (80-95) с примесью мусковита 6 (1-10) графита 5 (3-10) и рутила 2 (1-5) (рис. 9, 10). В его составе отсутствует кианит, отмечаются редкие зёрна пирротина и пирит. Размеры зёрен кварца преимущественно менее 0.1 мм (0.05-0.09). Субстрат неравномерно рассланцован и пронизан минерализованными зонами сдвига (рис. 11, 12). В них сформированы жилки, где кроме первичных кварца, мусковита, рутила и графита появляются циркон и монацит. Обнаружены включения в кианите, представленные (Zn, Fe, Mg). Мощность прожилков до 5 мм. В основном они проходят по субстрату, но также контактируют с конкрециями и параморфозами, пересекая их. Конкреции «обтекаются» прожилками (рис. 4). Минеральный состав прожилков (%): кварц 85-93, мусковит 5, рутил 1-10, графит 0-1. Они не содержат кианита. Содержание примеси рутила и графита в кварце возрастает в тонких прожилках. Жилки часто пересекаются, переходят одна в другую вдоль плоскостей рассланцевания. В жилках кварц, мусковит и графит укрупняются относительно исходного субстрата.

#### Обсуждение результатов

Рассмотренные материалы показывают, что на кианитовые сланцы с конкрециями наложены поздние тектонические трещины, по которым проникали гидротермальные растворы, способствовавшие перекристаллизации первичных кварца, мусковита, графита, рутила и привнесу редкометалльных и редкоземельных элементов с образованием циркона, монацита и других соединений. Кианит конкреций на заключительном этапе кристаллизации захватывал часть привносимых элементов в виде включений минеральных фаз.

Рост конкреций происходил под влиянием тектонических движений при участии просачивающихся растворов. Они морфологически подчинены текстуре пород, имеют эллипсоидную форму, согласную с линзами сланцев между плоскостями скольжения со слюдой, кварцем и графитом. В то же время рост конкреций контролировался внутренними трещинами, секущими структуру сланцев, поэтому они переходят друг в друга, секут сланцеватость. По этим же трещинам на поздних стадиях процесса поступали растворы с редкими элементами и цветными металлами и создавались условия для обогащения ими краевых частей конкреций.

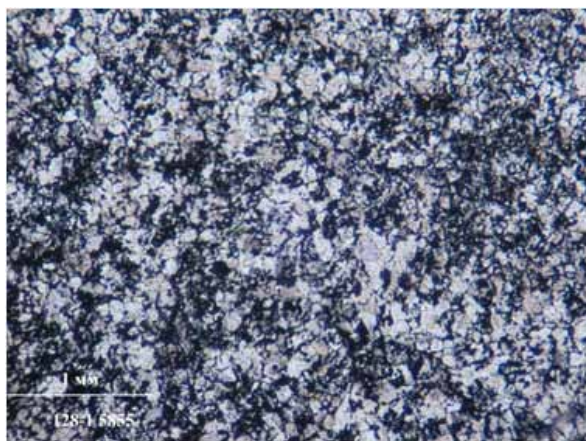


Рис. 9. Тонкозернистая структура первичного кварцевого субстрата с графитом (чёрное). Фото в проходящем свете. Николи II.

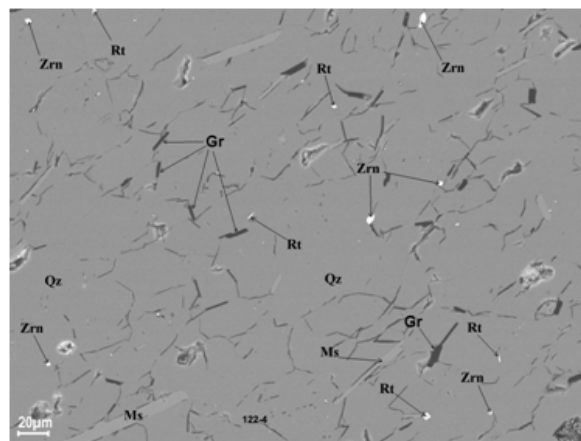


Рис.10. Минеральный состав субстрата: кварц (Qz), муско-вит (Ms), графит (Gr), рутил (Rt), циркон (Zrn). Изображе-ние в отраженных электронах.

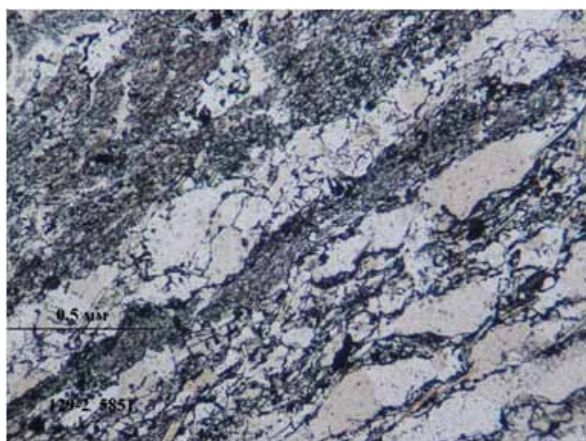


Рис. 11. Полосчатая текстура рассланцованного суб-страта, видно укрупнение зёрен кварца и мусковита. Фото в про-ходящем свете. Николи II.

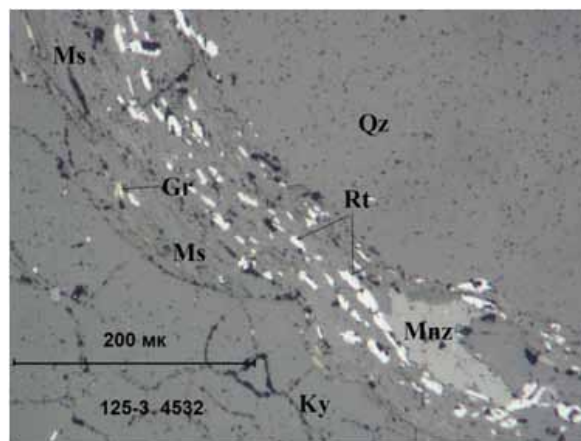


Рис. 12. Распределение минералов в жилках по тектониче-ским швам: кварц (Qz), рутил (Rt), мона-цит (Mnz), графит (Gr).

В целом наши наблюдения согласуются с выводами И.В. Белькова (1963). Но мы рассматриваем механизм обогащения краевых частей конкреций Ti, Zr и редкими элементами не только и не столько за счёт вещества, выталкиваемого кианитом в ходе роста, сколько за счёт привноса редких элементов в сланцы и его отложения (или переотложения) на заключительной стадии формирования конкреций. Монацит ранее он не отмечался в кианитовых сланцах. Известен был ортит, но он не содержит фосфора, который фиксируется в ассоциации с Се и другими TR.

Источником редкометальной минерализации могли быть сами кианитовые сланцы. Известно, что в разрезе кейвской серии сланцы пачек А, Б и Д обогащены редкими элементами за счёт присутствия кластогенного материала (Бельков и др., 1976), а в высокоглиноземистых породах Вост. и Мал. Кейв в пачке Д имеются древние россыпи, в которых установлены циркон, монацит и ортит, а также ильменит, рутил, титанит, флюорит, молибденит и золото (Гаскельберг, Рубинраут, 1974). Метаморфический процесс мог привести к переотложению редких минералов первично осадочного происхождения.

Редкие элементы и фосфор могли поступать и со щелочными интрузиями, внедрившимися в кейвскую толщу и оказавшими активное контактово-метасоматическое воздействие на киа-



нитовые сланцы. Они несут широкий спектр аксессуарных минералов, по химическому составу соответствующих минерализации кейвских сланцев (Бельков, 1962). Со щелочными интрузиями может быть связано поступление растворов, обогащённых Се, Р и обусловивших формирование монацитов минерализации. С ними же нами предварительно связывается поступление в сланцы Fe, Zn, Cu, Pb, Ni, Se с образованием цинксодержащего ставролита (Нерадовский и др., в печати), полиметаллической и медно-никелевой минерализации: галенита, сфалерита, селенистого пирротина, пентландита и халькопирита.

Образование монацита в поздних мусковит-кварцевых жилах, секущих кристаллические сланцы пачки Б, указывает на движение редких металлов с растворами и противоречит ранее сделанному заключению об инертности всех компонентов системы (Бельков, 1963; Лутц, 1967). Есть основания полагать, что хотя бы в отдельных участках кианитовых сланцев создавались благоприятные условия для концентрирования ряда промышленно интересных элементов.

### Выводы

Установлена редкометалльная минерализация (циркон, монацит) в периферических частях кианитовых конкреций и в мусковит-кварцевых жилах в кианитовых сланцах месторождения Н. Шуурурта. Предположительно, образование редкометалльных минералов произошло во время регионального метаморфизма кейвской толщи и/или под воздействием щелочных интрузий.

Редкометалльные минералы образуют самостоятельные минеральные формы, не входят в состав примеси в кианит и графит. Можно ожидать их неравномерное распределение в толще кианитовых сланцев.

Редкометалльные минералы ассоциируют с кианитом во внешних частях конкреций, но преимущественно располагаются в мусковит-графит-кварцевом субстрате. При комплексной переработке руд следует обратить внимание на мусковит-кварцевые отходы как возможный источник редкометалльного сырья.

### Список литературы

1. Алексеев В.С. Обогащение кианитовых руд // Освоение минеральных богатств Кольского полуострова. Мурманск: Мурманское кн. изд-во, 1974. С. 191-211.
2. Бельков И.В. Аксессуарная минерализация щелочных гранитов Западных Кейв // Матер. по минералогии Кольского п-ова. Вып. 3. Выборг: Типография Леноблполиграфиздата, 1962. С. 5-20.
3. Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 321 с.
4. 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.
5. Бельков И.В., Белолипецкий А.П., Ильин Ю.И. и др. К геохимии метаморфических пород кейвской серии // Геохимическая эволюция метаморфических комплексов докембрия Кольского п-ова. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1976. С. 5-14.
6. Гаскельберг В.Г., Рубинраут Г.С. Комплексная минерализация в разрезах Б. и М. Кейв // Вопросы геологии и металлогении Кольского п-ова. Вып. 5. Ч. 1. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1974. С. 208-212.
7. Лутц Б.Г. Парагенетический анализ и TR-минерализация глиноземистых пород амфиболитовой и гранулитовой фаций Алдана и Кольского п-ова // Редкие элементы в породах различных метаморфических фаций. М.: Наука, 1967. С. 30-58.

## КАРБОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КИАНИТА

<sup>1</sup>Гришин Н.Н., <sup>1</sup>Белогурова О.А., <sup>1</sup>Иванова А.Г., <sup>2</sup>Нерадовский Ю.Н.

<sup>2</sup>Войтеховский Ю.Л., <sup>1</sup>Калинников В.Т.

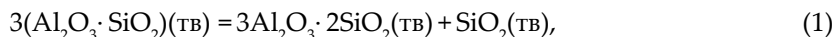
<sup>1</sup> Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН

<sup>2</sup> Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

*Рассмотрена термодинамика процессов в системе  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ -C для продуктов муллитизации кианита  $3(Al_2O_3 \cdot SiO_2) \rightarrow 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + SiO_2$ . Экспериментально показано, что система ведет себя как две формально независимые подсистемы  $SiO_2$ -C и  $Al_2O_3$ -C. В них термодинамически наиболее вероятны реакции, приводящие к образованию карбида кремния:  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + SiO_2 + 9C \rightarrow 3Al_2O_3 + 3SiC + 6CO$  с частичным образованием и транспортированием по объёму монооксида кремния и последующим образованием карбида ( $SiO_{(газ)} + 2C = SiC_{(мс)} + C$ ). Карбидизация алюмосиликатной матрицы позволяет получать высокотермостойкие муллитографитовые огнеупоры. Созданием условий, обеспечивающих*

преимущественное образование газообразного  $\text{SiO}$  и удаление его из объёма образцов, получен высокоглиноземистый прекурсор  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (95 %) с отношением  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 10-60$ . Химическое дообогащение прекурсоров приводит к образованию высокомолекулярного глиноземистого продукта ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 260$ ), перспективного для получения металлического  $\text{Al}$ .

Запасы кианитовых руд в месторождениях Кейвской группы Кольского п-ова оцениваются более чем в 2 млрд. т., ресурсы – около 10 млрд. т. Кроме  $\text{Al}$  и  $\text{Si}$ , сланцы содержат цветные металлы,  $\text{TR}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Au}$  и другие компоненты. Разработка способов переработки этого комплексного сырья является масштабной стратегической задачей. Кианит востребован как огнеупорное и керамическое сырье и рассматривается как перспективное сырье для получения  $\text{Al}$ . С целью теоретического и экспериментального обеспечения этих направлений использования кианита изучено его карботермическое восстановление [1]. При температуре выше 938 К он переходит в муллит с выделением кремнезема:



$$\Delta G_T^0 = 44746.8 - 42.676 \cdot T \text{ Дж/моль}$$

Дальнейшей термообработке подвергается система  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2 - \text{C}$ . Многочисленными исследованиями методом высокотемпературной масс-спектрометрии определено, что при нагревании в вакууме испарение алюмосиликатных систем, включая муллит, происходит как испарение индивидуальных оксидов, а парциальное давление компонентов от испарения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на три порядка меньше, чем от  $\text{SiO}_2$  [2, 3]. В условиях карботермического восстановления кианитового концентрата фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  пространственно разделяются, поэтому анализ его поведения в этом случае целесообразно провести путём раздельного изучения систем  $\text{SiO}_2 - \text{C}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$ . На правомерность такого подхода указывает обнаруженное в процессе восстановительного обжига кианита перераспределение  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  в отдельные фазы, формирование которых подтверждается данными рентгенофазового и микронзондового анализа [4]. При взаимодействии  $\text{SiO}_2$  с углеродом термодинамически более вероятными являются реакции, приводящие к образованию карбида кремния (рис. 1) по сравнению с альтернативными реакциями образования  $\text{SiO}$  (рис. 2).

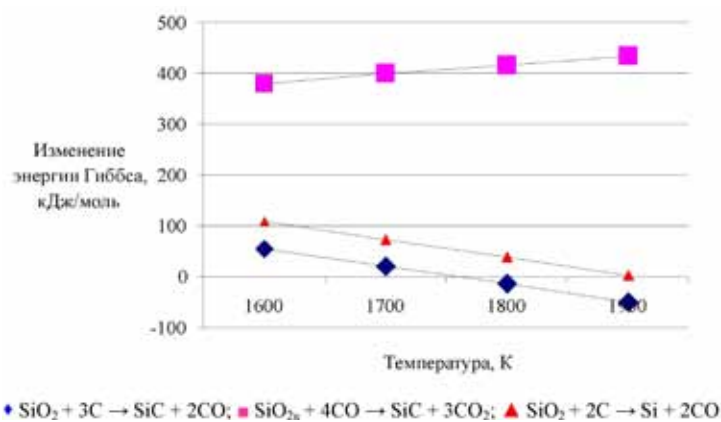


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры для реакций восстановления  $\text{SiO}_2$  до  $\text{SiC}$ .

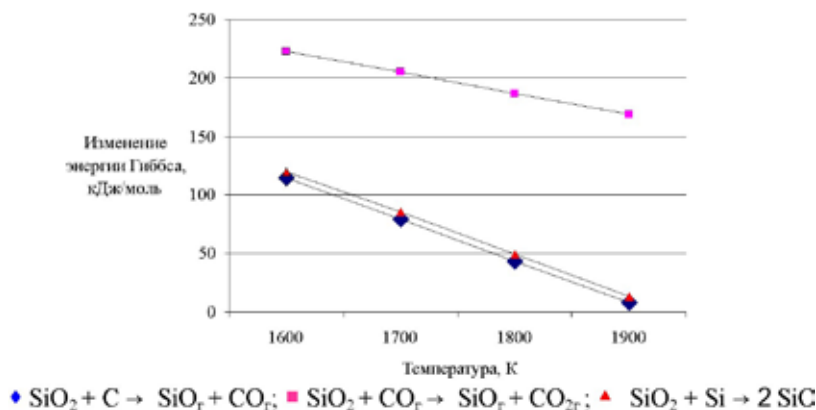


Рис. 2. Изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры для реакций образования  $\text{SiO}$ .

В случае возникновения контакта образовавшегося  $\text{SiO}_r$  с углеродом происходит его связывание в карбид на поверхности углеродных частиц (рис. 3), поэтому при высоком содержании углерода доля кремния, задерживаемого в системе, возрастает.

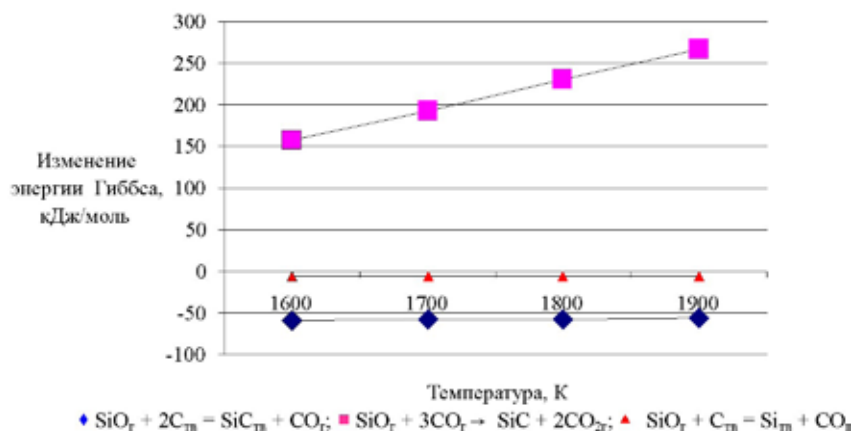
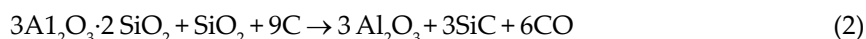


Рис. 3. Изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры для реакций восстановления  $\text{SiO}$ .

Диффузия  $\text{SiO}_r$  в объеме образца способствует переносу кремния по поровому пространству с последующим диспропорционированием ( $2\text{SiO}_r \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Si}$ ) или карбидизацией (рис. 3). Суммарная реакция для восстановления продуктов муллитизации приобретает вид:



$$\Delta G_r^0 = 1824.213 - 1.018753 \cdot T \text{ кДж/моль}$$

Частичное восстановление оксидкремниевой составляющей кианита, приводящее к образованию карбида кремния при условии его переноса по объёму образцов за счет частичного образования  $\text{SiO}$  и  $\text{Si}$ , позволила получить муллитографитовые огнеупоры с высокой термостойкостью. При обжиге шихты, содержащей кианитовый концентрат и углерод, кроме карбида кремния образуются другие фазы, идентифицируемые рентгенофазовым методом (табл. 1). Как видно, для изученных систем в присутствии углерода характерно образование карбидов  $\text{Al}$  и  $\text{Si}$ . Причём на рентгенограммах образцов после обжига шихты, состоящей из кианитового концентрата и графита, линий кристобалита нет. Вероятно, диоксид кремния находится в скрытокристаллическом (аморфном) состоянии, т.к. химический анализ образцов показывает незначительное изменение его содержания (рис. 4, табл. 2).

Высокие показатели термостойкости муллитосодержащих огнеупоров достигаются созданием комплекса структурных особенностей керамической матрицы [5, 6]. Восстановительные условия обжига смеси на брикет обеспечивают увеличение показателя термостойкости даже в случае обжига чистого кианитового концентрата, в то время как контрольные образцы из подобного брикета, полученного в окислительных условиях показали всего лишь 2 теплосмены (1300 °С – вода).

Таблица 1. Фазы, полученные при восстановительных условиях обжига составов с кианитовым концентратом.

Компоненты шихты	Фазы					
	муллит	корунд	углерод	$\text{SiO}_2$	$\text{SiC}$	$\text{Al}_4\text{C}_3$
Кианитовый концентрат	+			+		
Кианитовый концентрат + графит	+		+		+	+
Кианит + $\text{Al}_2\text{O}_3^*$ + графит	+	+			+	+

\* $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученный из  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , прокаленного при 800 °С.

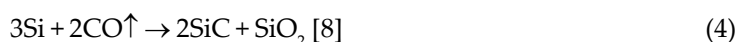
Таблица 2. Химический анализ образцов после восстановительного обжига.

Состав шихты	Содержание оксидов, мас. %				
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
кианитовый концентрат	53.60	36.01	2.00	1.94	4.80
кианитовый концентрат и углерод	54.35	35.94	1.91	1.70	4.61

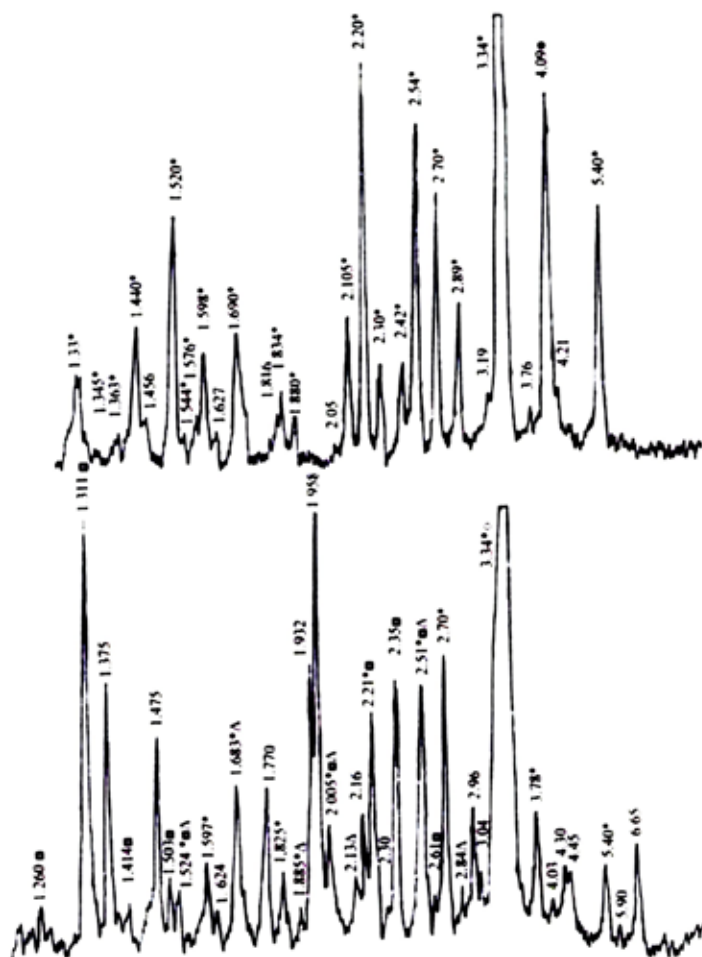
Из технологической целесообразности в системе кианит-углерод необходим предварительный восстановительный обжиг на брикет в присутствии углеродистого компонента с защитой его антиоксидантом. В качестве такового использован Si в виде отхода производства ферросилиция. На рентгенограммах отмечено образование карбида кремния. Реакция его образования происходит за счёт взаимодействия добавленного в шихту кремния с кремнеземом и далее с углеродом шихты или с CO:



$$\Delta G_T^0 = 690240 - 356.23 \cdot T \text{ Дж/моль}$$



$$\Delta G_T^0 = -807992 + 370.496 \cdot T \text{ Дж/моль}$$



\* муллит; ■ карбид кремния; ○ углерод; ● α-кристобалит; Δ карбид алюминия  
1 – кианитовый концентрат, 2 – смесь кианитового концентрата и углерода

Рис. 4. Рентгенограммы образцов после восстановительного обжига.

Чтобы убедиться в работоспособности предлагаемой методики, были опробованы составы, содержащие в качестве основного ингредиента кианитовую руду. Химический состав руды (мас. %): оксид алюминия 40.94; оксид кремния 53, оксид калия 1.31, оксид кальция 1.57, оксид титана 1.16, оксид железа (III) 0.58, углерод 2.33. Гранулометрический состав руды (мас. %): 32 (фр. 2.5-1 мм), 12 (1-0.4 мм), 5 (0.4-0.315 мм), 10 (0.315-0.16 мм), 14 (0.16-0.063 мм), 27 (< 0.063 мм). На рентгенограммах руды присутствуют линии кианита и кварца. За счёт протекания разрешенных термодинамически химических реакций с транспортом SiO в объёме образца из кианитовой руды месторождения Н. Шуурурта с модифицирующими добавками получены муллитографитовые огнеупоры с термостойкостью более 50 теплосмен.

Создание условий, препятствующих образованию прямого контакта зёрен муллита, SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с углеродом, блокирующих протекание термодинамически наиболее вероятных реакций карбидизации и обеспечивающих удаление из реакционного объема газообразных продуктов реакций, позволило направить реакции восстановления в сторону образования газообразного монооксида кремния с последующим его удалением из системы и концентрированием в остающейся твердой фазе оксида алюминия в виде корунда. Для создания свободной диффузии 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 [1]:



Присутствие в системе свободного углерода сдвигало равновесие в сторону образования газообразных продуктов. Так, при 1873 К давление кислорода над углеродом падает до величины порядка 10<sup>-12</sup> ат, вместо 10<sup>-7</sup> при его отсутствии [9]. При условии сохранения равновесия реакций (5-7), на соответственное число порядков должна возрастать концентрация монооксида кремния в газовой фазе. Определяющая роль SiO в переносе кремнезема подтверждена нами в специальных экспериментах. Так, при двукратном избытке углерода в шихте против стехиометрического без введения разрыхляющих добавок реакции диспропорционирования и карбидизации монооксида кремния частично протекали непосредственно в образцах вследствие более высокой концентрации SiO, возникающей благодаря влиянию С и затруднению диффузии газов из объёма образца. Образцы получались с низкой механической прочностью, имели зеленоватый цвет, свидетельствующий о присутствии SiC, характеризовались повышенным содержанием кремния (табл. 3).

Таблица 3. Содержание элементов в образцах и засыпке в зависимости от количества восстановителя, мас. %.

Содержание углерода	Объект исследования	Содержание элемента	
		Al	Si
10	Образец	36,2	9,3
	Засыпка	2,1	63,7
15	Образец	34,3	11,6
	Засыпка	5,8	58,4

В созданных нами условиях, моделирующих открытую систему, углерод шихты, присутствующий в объёме образца, не принимает участия в восстановлении оксида кремния, свободного или связанного в муллит путём прямого контакта с ним, но сдвигает равновесие реакций (5-7) в сторону образования SiO. Благодаря такому побочному действию углерода кремнезём, образующийся в процессе муллитизации кианита в присутствии углерода, эффективно диссоциирует при высокой температуре с образованием газообразного SiO, который диффундирует из объёма образца, перенося кремний в углеродистую засыпку, там восстанавливается и диспропорционирует на углероде по реакциям  $(\text{SiO}_r + 2\text{C}_{\text{тв}} = \text{SiC}_{\text{тв}} + \text{CO}_r$  и  $2\text{SiO}_r \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Si})$  с образованием SiC, SiO<sub>2</sub> и Si [1]. С этих позиций исследовалось карботермическое обогащение кианитовой руды месторождения Н. Шуурурта со следующим составом основных компонентов (мас. %): Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 38, SiO<sub>2</sub> 55, С 2.3. На основании проведенных ранее экспериментов температура обжига была установлена в 1700 °С, когда подвижной фазой является SiO<sub>2</sub>, а удаление Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> мало вероятно и технологически нежелательно.

Для получения высокоглинозёмистого материала отслеживали зависимость содержания  $Al_2O_3$  от количества углерода,  $T$  и времени выдержки при максимальной температуре, а также влияние разрыхляющей добавки (сульфата аммония) на восстановление кианитовой руды. Обжиг проводили с подъёмом  $T$  в течение 8 час и выдержкой 4 час при максимальной  $T$ . Помол окатышей после обжига производился в агатовой ступке во избежание намолла металлического железа. Затем материал прокаливали для удаления излишков угля при  $850\text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 3 час. Рентгенограммы показывают, что при содержании углерода 5 % в окатышах ещё сохраняется большое количество неразложившегося муллита. Заметное увеличение содержания  $Al_2O_3$  наблюдали после обжига окатышей с добавкой 7.5 и 10 % восстановителя (рис. 5). При избытке углерода (12.5 %) в шихте в образцах зафиксировано повышенное содержание кремния. Это подтверждается данными химического анализа (табл. 4), согласующимися с данными табл. 3. Из табл. 4 следует, что после восстановительного обжига окатышей с добавкой 7.5 и 10 % углерода содержание  $Al_2O_3$  увеличилось с 38 до 84-86 %, а  $SiO_2$  уменьшилось в 5-6 раз.

Таблица 4. Содержание основных компонентов в материале после обжига сырой кианитовой руды при  $1700\text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой при максимальной температуре 4 час.

Добавка углерода, %	$Al_2O_3$ , %	В пересчете на $SiO_2$ , %	$Fe_2O_3$ , %	$TiO_2$ , %	$Al_2O_3/SiO_2$ %
2,5	67.88	25.39	1.4	2.49	2.7
5	69.12	23.92	1.85	2.3	3
7,5	86.43	9.62	1.17	1.68	9
10	84.14	8.4	3.09	3.10	10
12,5	73.99	19.28	3.4	2.24	4

Несмотря на то, что с увеличением времени выдержки при максимальной температуре от 4 до 6 час. выход оксида алюминия уменьшается на 1-2 % из-за частичного образования и уноса газообразных оксидов алюминия, кремниевый модуль повышается особенно при обжиге шихты с добавками 7.5 % угля (табл. 5). Это связано с тем, что удаление кремния из окатышей в виде монооксида кремния возрастает более значительно, чем алюминия. При содержании в шихте 7.5 и 10 % углерода при обжиге с выдержкой 6 час. и введении разрыхляющей добавки в виде сульфата аммония в количестве 20 % достигается полное восстановление кианитовой руды, но на 2-5 % возрастает выход  $Al_2O_3$ .

Таблица 5. Содержание основных компонентов в обогащенном продукте.

Содержание восстановителя, масс. %	Без разрыхляющей добавки			С разрыхляющей добавкой		
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Al_2O_3/SiO_2$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Al_2O_3/SiO_2$
Выдержка при максимальной температуре 4 час.						
7.5	86,43	9,62	9	84,7	8,04	10,5
10	84,13	8,42	10	84,35	7,78	10,8
Выдержка при максимальной температуре 6 час.						
7.5	94.1	2.89	32.6	95.7	1.6	59.8
10	84,66	7,7	11	86,32	6,67	12,9

Микронзондовый анализ образующегося алюмосодержащего материала на сканирующем электронном микроскопе LEO 420 "ZEISS", оснащённом энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 400 "OXFORD Instrument" показал, что все области в образце имеют лишь остаточный оксид кремния (рис. 6, табл. 6), который можно удалить, используя химическое дообогащение (табл. 7).

Таблица 6. Элементный состав обогащённого продукта по данным микронзондового анализа.

№ спектра	Содержание элемента			
	O	Al	Si	Ti
1	40,33	56,99	1,56	1,12
2	40,76	52,28	2,80	4,16
3	30,72	65,91	1,24	2,13
4	52,89	35,19	1,54	10,37

Таблица 7. Химический состав материала после химического дообогащения.

Оксид	Без разрыхляющей добавки	С разрыхляющей добавкой
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95.7	96.5
SiO <sub>2</sub>	1.6	0.37
TiO <sub>2</sub>	3.01	2,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7	0.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>	59.8	260,8

Полученный продукт можно рассматривать как перспективное сырьё для производства металлического алюминия.



Количество добавки углерода (масс. %): 1 – 5; 2 – 7, 3 – 10, 4 – 12.5, ● корунд, ■ муллит, ▲ кристобалит

Рис. 5. Рентгенограммы материалов после обжига окатышей из сырой кианитовой руды месторождения Н. Шуурурта с добавкой углерода (1700 °С, выдержка 4 час. при максимальной Т).

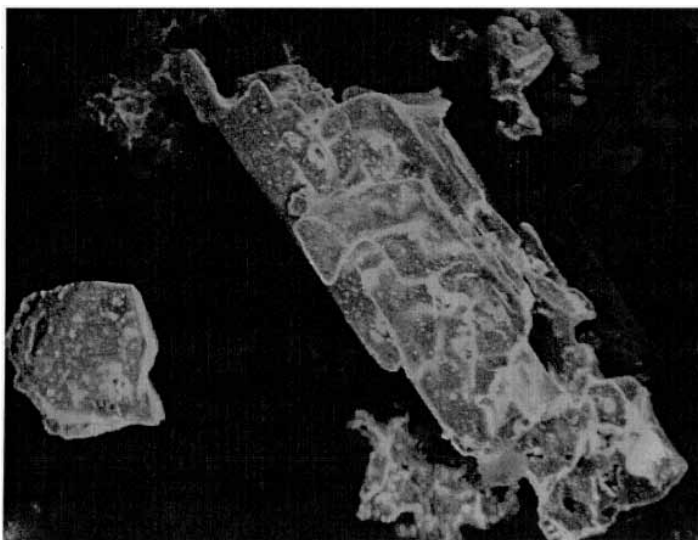


Рис. 6. Образец, в котором проанализирован элементный состав.

#### Список литературы

1. Гришин Н.Н., Белогурова О.А., Иванова А.Г. Обогащение кианита путем карботермического восстановления // Новые огнеупоры. 2010. № 6. С. 11-20.
2. Бондарь В.В., Лопатин С.И., Столярова В.Л. Термодинамические свойства системы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> при высоких температурах // Неорганические материалы. 2005. Т. 41. № 4. С. 434-441.
3. Шульц М.М., Шорников С.И., Столярова В.Л. Процессы испарения и термодинамические свойства муллита // Докл. АН. 2004. Т. 336. № 3. С. 368-371.
4. Гришин Н.Н., Иванова А.Г., Белогурова О.А. и др. Карботермическое восстановление кианита // Технология металлов. 2010. № 2. С. 37-42.
5. Белогурова О.А., Гришин Н.Н. Высокотермостойкие муллитографитовые материалы // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 9. С. 35-39.
6. Гришин Н.Н., Белогурова О.А. Структурирующие добавки для повышения термостойкости муллитсодержащих материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 3. С. 16-25.
7. Кайнарский И.С., Дегтярева Э.В. Карборундовые огнеупоры. Харьков: ГНТИ, 1963. 252 с.
8. Стрелов К.К., Кащеев И.Д. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1996. 607 с.
9. Куликов И.С., Ростовцев С.Т., Григорьев Э.Н. Физико-химические основы процессов восстановления окислов. М.: Наука, 1978. 134 с.

## УРАЛЬСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КИАНИТА – ПЕРСПЕКТИВНАЯ БАЗА ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ОГНЕУПОРОВ, СИЛУМИНА И АЛЮМИНИЯ

Коротеев В. А., Огородников В. Н., Поленов Ю. А.\*, Сазонов В. Н., Савичев А. Н., Коротеев Д. В.  
Институт геологии и геохимии УрО РАН, г.Екатеринбург  
\*Уральский государственный горный университет

Глиноземистое сырье может быть получено из большого числа минералов и пород (бокситы, корунд, пирофиллит, каолинит, гиббсит, диаспор, полиморфы  $Al_2SiO_5$  – силлиманит, андалузит, кианит и др.). В настоящее время на Урале практически только гидраты алюминия из бокситов используются в качестве руды для получения алюминия. Хотя в Сибири разработана промышленная технология получения силумина из нефелина и минералов группы силлиманита (МГС), одновременно разрабатываются дешевые электротермические методы получения из них алюминия (Алексеев, 1976; Головенко, 1977; Небокситовое ..., 1988).

Другой важной областью применения высокоглиноземистого сырья является производство высокоогнеупорных материалов, искусственных и естественных абразивов, химических и красящих веществ. Производство высокоглиноземистых огнеупоров занимают ведущее место в структуре потребления металлургических производств развитых стран. По составу они подразделяются на муллито-кремнеземистые, муллитовые и муллито-корундовые с огнеупорностью 1750-1850, 1800-1900 и 1850-1950 °С. Их получают из минералов группы силлиманита.

Минералы группы силлиманита (МГС) для нашей страны являются стратегическим видом сырья, в них будущее Российского алюминия. Разведанные запасы руд, содержащих МГС в пересчете на конечный продукт-алюминий, превышают 400 млн. тонн (табл. 1). Если его производить по 3.5 млн. тонн в год, как это делается сейчас, то их хватит более чем на 100 лет. Для сравнения отметим, что суммарные разведанные запасы того же типа руд западных стран составляют около 450 млн. тонн. Реализация программы позволит ликвидировать дефицит глинозема и сделать алюминиевое производство России независимым от импорта. Из таблицы видно, что основные запасы высокоглиноземистого сырья сконцентрированы на Кольском п-ове, в Карелии и в Сибири. На Урале запасы на порядок ниже.

Месторождения высокоглиноземистого сырья принадлежат к нескольким генетическим типам, среди которых можно выделить седиментогенный и метаморфогенно-метасоматический. К седиментогенному типу месторождений глиноземистого сырья относится формация бокситов. Среди метаморфогенных месторождений глиноземистого сырья выделяются прометаморфические, промышленные концентрации которых возникли при бокситообразовании и латеритном выветривании и ортометаморфические, образовавшиеся непосредственно в процессе регионального метаморфизма и сопровождающего его алюмокремниевое метасоматоза (Огородников, 1975, 1993; Добрецов, 1980; Основы ..., 1984; Небокситовое ..., 1988).

Таблица 1. Разведанные запасы и прогнозные ресурсы руд, минералов группы силлиманита ( $Al_2SiO_5$ ), глинозема и алюминия в России, тыс. тонн

Район	Руда	$Al_2SiO_5$	$Al_2O_3$	Al
Разведанные запасы (категории $C_2$ , $C_1$ , B, A)				
Кольский п-ов	3400000	1186879	676518	358556
Карелия	116820	25000	14250	7553
Урал	66684	11710	6675	3537
Сибирь	511750	13109	74732	39608
Итого	4095254	1236698	772175	409254
Прогнозные ресурсы (категории $P_2$ , $P_3$ )				
Кольский п-ов	11000000	3840000	2188230	1159762
Урал	109890	30000	17100	9063
Сибирь	8138400	2588517	1475455	781991
Итого	19248290	6458517	3680785	1950816

Урал считается типичным палеозойским складчатым поясом. Однако не менее значительную роль в его развитии играл докембрийский этап, так как из под «уралид» повсеместно обнажаются архейско-протерозойские метаморфические комплексы, которые представляют собой тектонические блоки оторванные от Восточно-Европейской платформы – гнейсо-амфиболитовые ядра (по определению Г. А. Кейльмана, 1974). Щиты и кристаллические основания древних плат-



форм сложены глубоко измененными породами, которые являются продуктами метаморфизма вулканогенных, вулканогенно-осадочных и осадочных образований (Белевцев, 1990).

Для докембрия характерны маломощная и мобильная кора Земли, высокая интенсивность вулканизма, специфические условия седиментационных процессов, а также повышенный поток тепловой энергии, приведший к интенсивному развитию метаморфизма и ультраметаморфизма пород.

Процессам регионального метаморфизма и сопутствующему ему, определенному типу магматизма, как рудогенерирующему фактору придается все более значительная роль в формировании месторождений, залегающих в глубокометаморфизованных комплексах докембрия. Установление природы происхождения метаморфогенных руд заключается в установлении генетических связей с тем или иным типом регионального метаморфизма, сопутствующего магматизма и сопровождающих их гидротермально-метасоматических преобразований. В выявлении причин локализации руд в определенных частях кристаллических толщ, в установлении зависимостей состава и масштабов рудогенеза от ряда геологических факторов, из которых наиболее значимыми являются разрывные дислокации шовных зон, которые в докембрии и на начальной стадии образования палеоокеана представляют собой зоны рифтинга (растяжения). Во время коллизионных преобразований шовные зоны представляют собой зоны сжатия (дислокационного метаморфизма).

В фанерозое ультраметаморфизм и магматизм сосредоточены в основном в зонах дислокационного метаморфизма глубинных разломов и связаны с локальными термическими аномалиями. В этом проявляются наиболее общие особенности метасоматизма в докембрии и его отличие от фанерозойских процессов (Рундквист и др., 1989).

Среди прометаморфических формаций докембрия развит достаточно широкий спектр месторождений полезных ископаемых (глиноземистые, марганцевые, железорудные, золотурановые и др.). Подавляющее большинство месторождений глиноземистого сырья, связанных с глиноземистыми сланцами осадочного генезиса, независимо от их возраста (архей или протерозой) залегают в породах, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации. Масштабы их зависят от формационной принадлежности.

Можно наметить две группы продуктивных метаморфогенно-метасоматических пород, обогащенных высокоглиноземистыми минералами: 1) стратифицированные горизонты в толще плагиогнейсов раннего архея и протерозоя – **глиноземистая (кианитовая) формация щитов и древних платформ (метаморфогенный, кейвский тип)**; 2) нестратифицированные метасоматические породы, слагающие внутренние и внешние шовные зоны полифациальных метаморфических комплексов андалузит-силлиманитового и кианит-силлиманитового термодинамических типов, образующихся по разновозрастным, обычно пелитовым породам – **глиноземистая формация складчатых поясов (гидротермально-метасоматический, уральский тип)**.

Древнее основание метаморфических комплексов (Салдинский, Мурзинско-Адуйский, Верхисетский, Сысертско-Ильменогорский, Уфалейский, Джабык-Карагайский, Адамовский и др.) сложено высокометаморфизованными архейскими и протерозойскими отложениями. Они сложены двуслюдяными, биотитовыми, пироксен-амфиболовыми, *биотит-гранат-кианитовыми*, *биотит-кианитовыми* и *биотит-гранат-силлиманитовыми* плагиогнейсами с реликтами двупироксеновых, клинопироксен-гранатовых кристаллосланцев и гиперстен-магнетитовых кварцитов, амфиболитами. Центральные зоны метаморфических комплексов претерпели гранитизацию и ультраметаморфизм. В обрамлении древних гнейсовых блоков, в зонах дислокационного метаморфизма, сопровождающего развитие шовных зон смятия, наблюдается высокоградиентный метаморфизм, магматизм и весьма контрастный метасоматоз, которые сочетаются с разновозрастными и разнотипными структурными элементами, причем более ранние переработаны в результате поздних движений.

В геологическом плане для дислокационного метаморфизма характерна связь с зонами разломов, в петрологическом – совмещение разновозрастных и разнотипных минеральных ассоциаций, большое, но еще слабоизученное влияние одностороннего сжатия (стресса) и, наконец, сочетание с метасоматозом и рудоотложением. В одних случаях деформация горных пород в зонах разломов происходит изохимически, в других сопровождается явным выносом и привносом петрогенных элементов (Кейльман, Огородников, 1977; Огородников, 1993). Процессы дислокационного метаморфизма играют важную роль в образовании метаморфогенно-метасоматических месторождений: они изменяют ранее существовавшие метаморфогенные рудные залежи, вызывают ремобилизацию рудного вещества и создают тектонические структуры, благоприятные для формирования новых метасоматических рудопроявлений полезных ископаемых.

Характерной особенностью гнейсово-мигматитовых комплексов Урала (Кейльман, 1974;

Огородников, 1975, 1993; Огородников и др., 2007; Коротеев и др., 2010), наряду с рудными месторождениями и рудопроявлениями, является существенное преобладание в их пределах неметаллических полезных ископаемых, таких как антофиллит-асбест, кварц, мусковит, **кианит**, **андалузит**, **силлиманит** (Игумнов, Кожевников, 1935), тальк и другие. Главным фактором, обуславливающим возникновение месторождений и проявлений, в данном случае может служить не столько концентрация вещества, сколько многоэтапность их преобразования, сопровождающаяся концентрацией полезного компонента, выделение его в соответствующей минеральной форме, а промышленная ценность этих, по сути, породообразующих минералов определяется их физическими свойствами, размером кристаллов, чистотой кристаллической решетки и т. д. Ведущую роль здесь, очевидно, играет не столько миграция элементов, сколько физико-химические условия преобразования горных пород, прежде всего давление (Кейльман, 1974; Кейльман, Огородников, 1977; Огородников, 1993).

При картировании метаморфической зональности в метаморфических комплексах устанавливается выдержанная последовательность изоград метаморфических минералов от центра к периферии: силлиманит – кинанит (андалузит) – ставролит – гранат – биотит – хлорит.

При внимательном рассмотрении, в частности на Светлинском хрусталоносном месторождении (Кочкарский метаморфический комплекс), оказывается, что каждый индекс-минерал, как правило, появляется в двух модификациях, образуя две «изограды появления»; одна обусловлена региональным метаморфизмом, другая – гидротермально-метасоматическими процессами. Последние прогрессивно накладываются на продукты метаморфизма так, что во внешнюю зону выходят минеральные ассоциации, отвечающие более высокому температурному уровню (Кейльман, 1974; Кейльман, Огородников, 1977; Огородников, 1975, 1993).

Связь режима щелочности-кислотности с термодинамическими условиями метаморфических процессов легче всего представить, рассмотрев кристаллохимические особенности минералов, характеризующих различные метаморфические фации.

Устойчивость минералов с возрастанием температуры как функция энергии кристаллической решетки находится в прямой зависимости от величины зарядов, входящих в нее ионов, и в обратной зависимости от их радиусов. Кроме того, уменьшение ионного радиуса катиона, а также увеличение его координационного числа, в значительной мере определяют устойчивость минералов при возрастающем давлении (Щербина, 1967; Кейльман, 1974; Ициксон, 1970; Кейльман, Огородников, 1977; Огородников, 1993).

Изменение минералов происходит в результате изменения энергетического состояния структурных частиц кристаллической решетки под воздействием внешних факторов. Неизбежным следствием этих изменений является уменьшение или увеличение расстояний между структурными частицами, что отражается в увеличении или уменьшении количества частиц в объеме решетки. В результате новая решетка, по сравнению с исходной, всегда уплотнена или разуплотнена. Степень уплотнения или разуплотнения отражает направленность в изменении внешних термодинамических факторов (Евзикова, 1966). Используется величина структурной рыхлости « $\omega$ » кристаллических решеток минералов (Ициксон, 1970).

Результаты экспериментального изучения устойчивости алюмосиликатов в условиях меняющейся кислотности-щелочности и при различных температурах и давлениях объясняют появление различных парагенезисов высокобарических минералов на разных участках шовных зон в метаморфических комплексах Южного Урала.

Общеизвестно, что в процессах динамотермального метаморфизма ведущей тенденцией в изменении состояния алюминия является переход его из четверной координации по кислороду в шестерную. Это сопровождается уменьшением молекулярного объема и увеличением плотности минералов (Ициксон, 1970).

Полевые шпаты в гнейсах и кристаллических сланцах устойчивы в щелочных условиях. Повышение температуры расширяет поле их устойчивости в сторону увеличения кислотности, а повышение давления резко сужает его (Shade, 1968). Структурная рыхлость минералов плагиогнейсов, кристаллической решетки ортоклаза, микроклина  $\omega = 8,40$ , анортоклаза  $\omega = 7,80$ , альбита  $\omega = 7,75$ , биотита  $\omega = 7,62$ . Мусковиты устойчивы в более кислых средах, нежели полевые шпаты, но увеличение давления резко расширяет поле их устойчивости. Структурная рыхлость кварца  $\omega = 7,54$ , мусковита  $\omega = 7,40$ , пироксилита  $\omega = 7,20$ , парагонита  $\omega = 7,05$ . В более кислой среде устойчивы полиморфные модификации  $Al_2SiO_5$ , а появление той или иной модификации обусловлено РТ-параметрами системы. Структурная рыхлость андалузита  $\omega = 6,36$ , силлиманита  $\omega = 6,21$ , кинанита  $\omega = 5,62$ , корунда  $\omega = 5,15$ . При формировании силлиманитовых парагенезисов в гнейсах мусковит не образуется, так как при высоких температурах он не устойчив.

Взаимодействие флюида и твердой фазы в некоторых проявлениях может иметь полярно-противоположный характер: с одной стороны, состав и состояние флюида является причиной смены минеральных ассоциаций, а с другой – наоборот, изменение состава твердой фазы под влиянием меняющихся Т-Р условий определяет состав сосуществующего с ней флюида (Кейльман, Огородников, 1977).

Выразительным примером такого двойного взаимодействия может служить выщелачивание, которое осуществляется путем кристаллохимического фракционирования при метаморфизме (*метаморфогенный тип*) или в результате воздействия на твердую фазу активного кислого раствора (*метасоматический тип*).

В первом случае низковалентные ионы с большим радиусом в определенных термодинамических условиях, среди которых наибольшее значение имеет давление, оказываются неустойчивыми в кристаллической решетке большинства силикатов и уходят в раствор. Таким образом, формируются ассоциации, содержащие высокоплотные минералы, для которых характерна шестерная координация алюминия: кианит, пироп-альмандиновый гранат, хлоритоид, ставролит и др. Геологически вполне четко устанавливается приуроченность таких ассоциаций к древним, архейско-протерозойским гнейсово-амфиболитовым комплексам, претерпевшим высокотемпературный и высокобарический метаморфизм. Так как рассматриваемые ассоциации возникают вследствие реакции породы на изменяющиеся термодинамические условия, их необходимо отнести к числу *метаморфических*, хотя формирование самих минеральных агрегатов осуществляется с помощью *метасоматического* механизма и не является вполне изохимическим.

Появление высокобарических парагенезисов в шовных зонах докембрийских метаморфических комплексов (Кольский п-ов, Карелия, Алданский щит, Урал и др.) связано не столько с гидротермально-метасоматическими преобразованиями (изменение кислотности-щелочности) пород глубинными флюидами, сколько с кристаллохимическим фракционированием, обусловленным селективным переходом под давлением в раствор «наименее надежно закрепленных» ионов в кристаллической решетке, которое меняет соотношение химических потенциалов компонентов в твердой и жидкой фазах, определяя, в частности, щелочность-кислотность и другие свойства раствора. Векторное стрессовое давление, возникающее в зонах тектонического сжатия, трансформируясь дилатационно-гидравлическим путем во флюидное давление с весьма высоким градиентом, стимулирует инфильтрационные процессы (Бельков, 1963; Жданов, 1980; Беляев, 1981; Кейльман и др., 1989, 1991; Огородников, 1975, 1993).

Поэтому кианит в плагиогнейсах Уфалейского, Сысертско-Ильменогорского, Кочкарского, Адамовского, Джабык-Карагайского метаморфических комплексов образуется по биотиту, а не по алюмосиликатам полевым шпатам или мусковиту, и минеральная ассоциация создается без кварца, в отличие от гидротермально-метасоматического способа образования кианит-кварцевых зон (рис. 1, 2). Аналогичная картина описана в гнейсах Карелии (Щербакова, 1982).

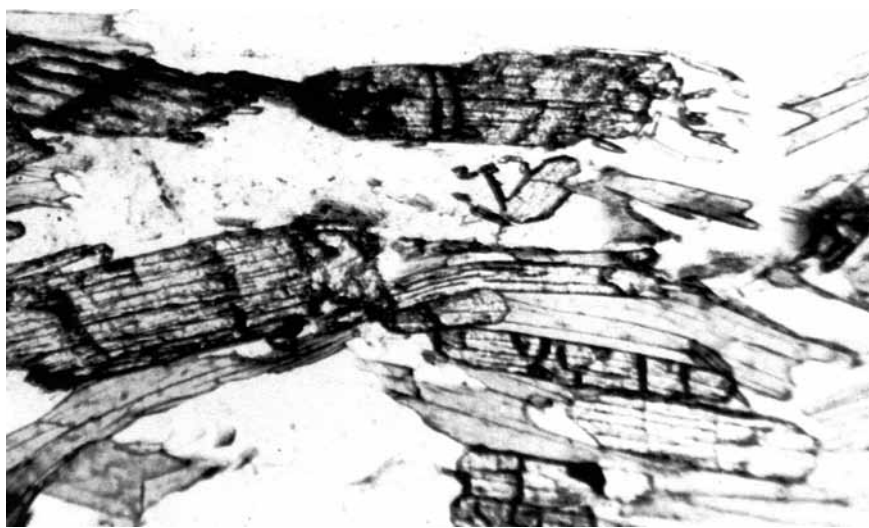


Рис. 1. Развитие метаморфогенного кианита по биотиту плагиогнейсов (а). Шумихинский купол, Сысертско-Ильменогорский комплекс. Шлиф Ш-102, без анализатора, увел. 20X.

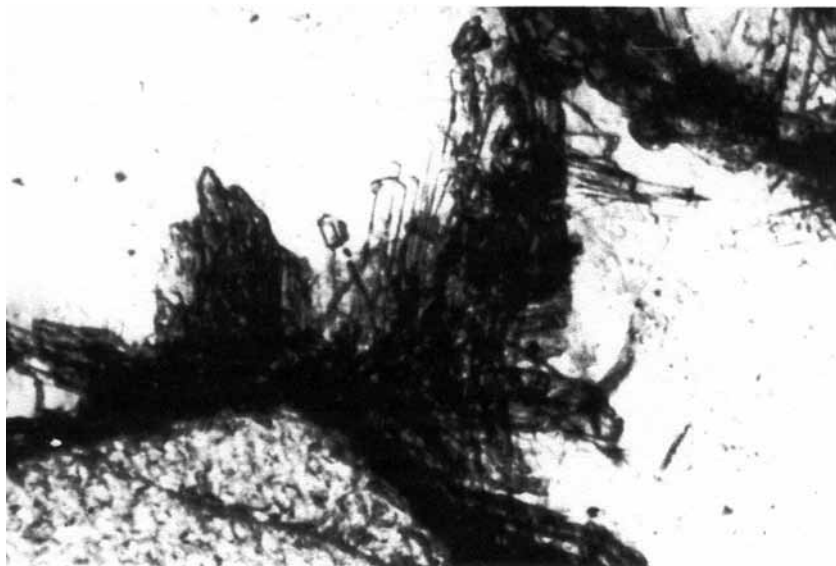


Рис. 2. Развитие метасоматической кварц-кианитовой ассоциации по раннему кианиту (б). Шумихинский купол, Сысертско-Ильменогорский комплекс. Шлиф Ш-102/1, без анализатора, увел. 40X.

На Урале широко развиты месторождения метасоматических кианитовых кварцитов, реже силлиманитовых кварцитов, залегающих в шовных зонах, секущих силлиманит(кианит)содержащих гнейсы Адамовского, Кочкарского, Мурзинско-Адуйского, Уфалейского, Сысертского метаморфических комплексов (Игумнов, Кожевников, 1935; Рапопорт, 1970; Кейльман, 1974; Огородников, 1975, 1993; Огородников и др., 2007).

Кианитовые кварциты представляют собой плотные породы, разбитые трещинами отдельности на крупные блоки. Кианит распределяется в кварцитах неравномерно: от единичных зерен до 40 – 50 %. В зонах высокой концентрации кианита, последний кристаллизуется в виде радиально-лучистых агрегатов светло-голубой окраски (рис.3). Кианит образует радиально-лучистые агрегаты в кварците, в котором по границам зерен наблюдаются скопления пылевидного магнетита, реже появляется зерна рутила, пирита, гематита.

Кроме того, на метаморфогенных и метаморфогенно-метасоматических месторождениях обычно наблюдаются кварцевые жилы выполнения, имеющие в альбандах андалузит, кианит или силлиманит, зачастую в парагенезисе с мусковитом (Бельков, 1963; Кориковский, 1967; Огородников, 1975, 1993). Концентрации высокоглиноземистых минералов в этих зонах представляют лишь минералогический интерес, промышленных концентраций не образуют.

Таким образом, образование месторождений высокоглиноземистых минералов связывается с метаморфическими комплексами архейско-протерозойского возраста. Метаморфогенно-метасоматический механизм образования кианитовых месторождений создает относительно стратифицированные залежи с крупными запасами, наибольшие из которых сконцентрированы на Кольском п-ове (свита Кейв), Сибири и на Урале.

Сравнение Уральских кианитов (пробы БР, БС, КУ, КТ, СВЛ) с кианитом свиты Кейв (пробы КЕИ) методами математической статистики и факторного анализа показал их сходство по минеральным включениям и примесям, по химсоставу, содержанию редких и редкоземельных элементов (рис. 4).

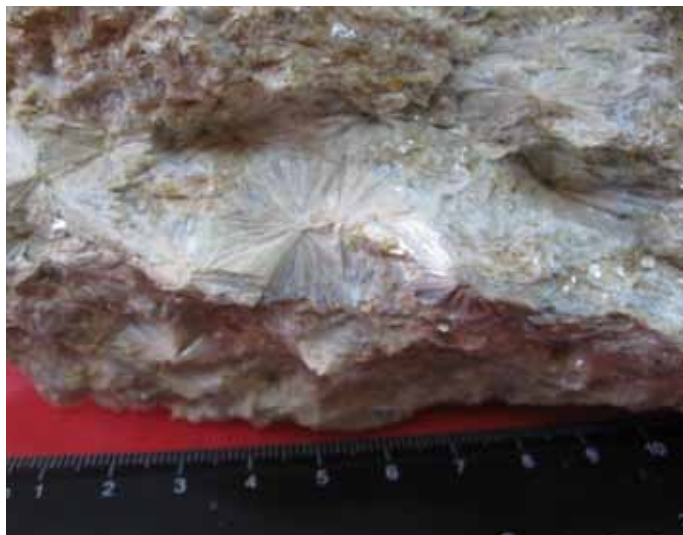


Рис. 3. Радиально-лучистый кианит в кианитовых кварцитах. Брусняновское месторождение кианита.

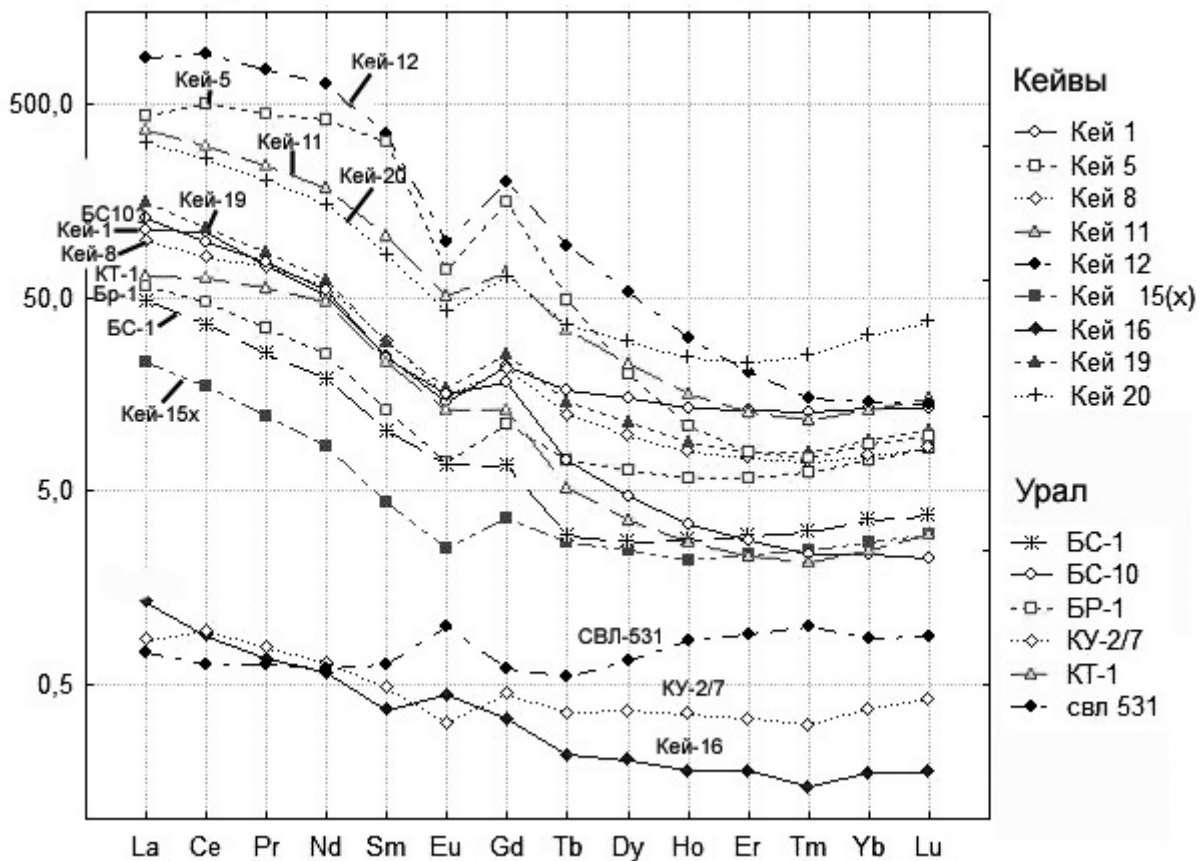


Рис. 3. Распределение редких земель, нормированных по хондриту в кианитах месторождений Кольского полуострова (кейвская свита) и Урала

Установлено, что наиболее загрязненными по минеральным примесям и химическому составу оказываются наиболее ранние метаморфогенные кианиты волокнисто-игольчатого и конкреционно-лучистого промышленного типа (КЕЙ-5, 11, 12, 20). Менее загрязненным оказывается параморфический тип кианита по хиастолитам (КЕЙ-15, 19) и порфиробластический кианит кианитовых кварцитов и зон перекристаллизации (КЕЙ-1, 8, БР-1, БС-1, 10, КТ-1). Наиболее чистыми оказываются поздние кианиты голубого цвета (КЕЙ-16, КУ-2/7) и андалузит розового цвета (СВЛ-531), образующие оторочки в зальбандах кварцевых жил, к сожалению, они имеют очень небольшие масштабы распространения и соответственно запасы. В техногенных отложениях Андреево-Юльевой россыпи преобладает порфиробластический кианит, достаточно чистый (БС-1), к тому же он в значительной мере уже обогащен.

Исследования последних лет показали, что организовать крупномасштабное производство концентратов кианита (силлиманита) в короткие сроки невозможно, но с использованием результатов наших работ вполне реально в течение 2-3 лет освоить месторождение с производительностью добычи кианитового концентрата 30-50 тыс. тонн в год. Наиболее благоприятными в этом отношении являются месторождения кианита Урала. Их преимущества: инфраструктура региона развита; месторождения (Абрамовское, Карабашское, Борисовское и др.) находятся недалеко от железных дорог; потребители местные (Магнитогорский, Челябинский, Нижнетагильский металлургические комбинаты, Первоуральский, Богдановичский и Сухоложский огнеупорные, Богословский и Уральский алюминиевые заводы); имеются обогатительные фабрики (Асбестовская, Кыштымская, Тайгинская и др.), мощности которых незагружены; потребности в кианитовых концентратах в десятки раз превышают ожидаемые производственные возможности; руды имеют предельно простой минералогический состав и на их базе можно создать безотходное производство концентратов с выделением в качестве товарных продуктов кианита, кварца, слюды, рутила и золота. Ресурсы сырья достаточны для крупномасштабного производства концентратов; на базе кианита и кварца в дальнейшем можно организовать обжиговое, огнеупорное, керамическое, силуминовое, алюминиевое, стекольное и другие предприятия.

В настоящее время разрабатывается пилотный проект по обработке техногенных песков Андреево-Юльевской россыпи (рис. 5), которая расположена в 3-х км от дер. Борисовки и в 18 км к югу от г. Пласт.



Рис. 5. Техногенные отвалы песков, содержащих концентрат кианита Андрее-Юльевской россыпи

В настоящее время проведены геофизические работы на Андрее-Юльевском участке с целью выделения и прослеживания погребенных техногенных образований, картирования рельефа коренных пород, определения мощности рыхлых отложений и их расчленения. По материалам геофизических работ проведено бурение и опробование песков, разрабатывается схема обогащения. Готовится отчет с подсчетом запасов, который позволит начать промышленную обработку кианитового концентрата.

В ВОСТИО под руководством крупнейшего специалиста д.г.м.н. В. А. Перепелицина были проведены лабораторные огнеупорные исследования кианитовых концентратов. Получены огнеупорные характеристики концентратов и приготовленных из них изделий, разработана технология производства высокоглиноземистых огнеупоров. На основании приведенных исследований сделано следующее заключение: **кианитовые концентраты Андрее-Юльевских россыпей являются перспективным минеральным сырьем для производства качественных мулито-кремнеземистых огнеупорных материалов и изделий.**

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований № 23 Президиума РАН и Интеграционного проекта «Развитие минерально-сырьевой базы России: освоение новых источников высокоглиноземистого сырья (минералы группы силлиманита и пирофиллита, каолины, золы и др.)», руководитель проекта академик РАН В. А. Коротеев.

Исследования проводились в рамках междисциплинарного проекта фундаментальных исследований выполняемых совместно с организациями СО РАН «Минералы группы силлиманита – новый вид сырья для производств высокоглиноземистых огнеупоров, глинозема, силумина и алюминия».

Частичное финансирование осуществлялось по госбюджетной теме Г-3 (УГГУ)

### Литература

1. Белевцев Я. Н. Металлогения щитов и метаморфогенное рудообразование // Основные проблемы рудообразования и металлогении. М.: Наука, 1990. С. 86-95.
2. Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 320 с.
3. Беляев О. А. Кислотное выщелачивание и сопряженный железо-магнезиальный метасоматоз в условиях гранулитовой фации // Метасоматоз и метасоматиты в метаморфических комплексах докембрия. Апатиты, ГИ КолФАН СССР, 1981. С. 10-18.
4. Головенко В. К. Высокоглиноземистые формации докембрия. Л.: Наука, 1977. 205 с.
5. Добрецов Н. Л. Специфика раннедокембрийского метаморфизма и ранняя история Земли // Метаморфизм раннего докембрия. Апатиты, 1980.
6. Евзикова Н. З. О структурных плотностях минералов // Минерал. Сб. Львов. ун-та. 1966. № 20, вып. 3. С. 352-358.
7. Жданов В. А. Рудогенерирующая роль региональных метаморфо-метасоматических процессов // Метаморфогенное рудообразование раннего докембрия. Апатиты, 1980. С. 62-70.
8. Игумнов А. Н., Кожевников К. Е. Уральские месторождения дистена (кианит). Тр. ВИМС, вып. 90, 1935.

9. Ициксон Г. В. Кристаллохимическое фракционирование калия и натрия в метаморфических процессах и его металлогеническое значение // Региональный метаморфизм и метаморфогенное рудообразование. Л.: Наука, 1970. С.172-194.
10. Кейльман Г. А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М.: Недра, 1974. 200 с.
11. Кейльман Г. А., Огородников В. Н. О взаимодействии флюида с минеральными системами при метаморфизме // Флюидный режим земной коры и верхней мантии. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1977. С. 79-80.
12. Кейльман Г. А., Пучков В. Н. Сиализация земной коры (тектонические аспекты). Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 50 с.
13. Кейльман Г. А., Глушкова Г. А., Золоев К. К. и др. Геологические типы метаморфизма в региональных структурах Урала. Екатеринбург: УКСЭ, 1991. 82 с.
14. Кориковский С. П. Метаморфизм, гранитизация и постмагматические процессы в докембрии Удокано-Становой зоны. М.: Недра. 1967. 298 с.
15. Коротеев В. А., Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А.,
16. Савичев А. Н., Коротеев Д. В. Минералы группы силлиманита - база промышленного производства высокоглиноземистых огнеупоров, силумина и алюминия // Ежегодник -2009. Екатеринбург, ИГТ УрО РАН, 2010. С. 157-162.
17. Небокситовое алюминиевое сырье Сибири. М.: Недра, 1988. 167 с.
18. Огородников В. Н. Алюмокремниевые метасоматиты Кочкарского и Адамовского метаморфических комплексов. Автореф. дис...канд. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1975. 31 с.
19. Огородников В.Н. Закономерности размещения и условия образования кварцевожильных хрусталеносных и золоторудных месторождений Урала. Автореферат дис.... д-ра геол.-минер. наук. Екатеринбург, 1993. 28 с.
20. Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. Минералогия шовных зон Урала. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс. Научное издание. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 216 с.
21. Основы металлогении метаморфических поясов докембрия. Л.: Наука, 1984. 340 с.
22. Рапопорт М. С. Кианитовые алюмокварциты восточного склона Среднего Урала и роль кислотного выщелачивания и их образовании // Метаморфизм горных пород Урала. Свердловск: Изд-во СГИ, 1970. С. 43-45.
23. Рундквист Д. В., Бушмин С. А., Глебовицкий В. А., Михайлов Д. А., Рудник В. А. Основы типизации метасоматитов докембрия // Метасоматиты докембрия и их рудоносность. М.: Наука, 1989. С. 5 - 16.
24. Щербакова Т.Ф. Кианитовые и кианитизированные горные породы Беломорья. // Геология метаморфических комплексов. Свердловск, изд. СГИ, 1982. С. 58-63.
25. Щербина В. В. О влиянии давления на изоморфные замещения // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. Л.: Наука, 1967. С. 61-67.
26. Shade J. W. Hydrolisis equilibria in the system  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . Ph.D. Thesis, Pensilvania state Univ., 1968.

## ЛИТЕЙНАЯ ОДИССЕЯ

Мотов Д.Л.

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, Апатиты

*Комплексные исследования кианитовых руд Б. Кейв на Кольском п-ове по программе № 23 фундаментальных исследований президиума РАН представляют собой второй подход к решению этой масштабной государственной задачи. В статье рассматриваются эпизоды первого этапа, непосредственным и активным участником которой был автор статьи Давид Лазаревич Мотов (1928-2010). Статья предоставлена редколлегии вдовой Д.Л.*

Никогда раньше не думал, что займусь литейным производством, и его проблемы станут мне близкими. А начиналось практически с пустяка. Директор Института химии О.С. Игнатьев в 1961 г. налаживал в Кандалакше связи с производством и встретился там с директором Механического завода (КМЗ) Б.Г. Сизовым. Тот поведал ему о трудностях, которые докучают литейщикам его завода – как бороться с пригаром? Пригар – это корочка на отливке, возникающая за счёт взаимодействия расплавленного металла с формовочной землёй.

Директор ИХТРЭМСа поразмыслил и решил – не худо бы поручить это дело мне. Ему было известно, что в качестве антипригарного материала в те годы стали применять циркон – силикат циркония, не боящийся высоких температур и не прилипающий к металлу. К этому времени я зарекомендовал себя как химик, специалист по элементам подгруппы титана, в которую входят также цирконий и сопутствующий ему гафний. Лет мне было тогда 33, я жаждал деятельности и О.С. Игнатьев попал в точку, поручив мне заниматься наряду с химией каким-то практическим делом, помогая региону, в котором живём.

Я отправился из Апатитов в Кандалакшу на Механический завод и первый раз в жизни попал в литейный цех, который производил разные отливки – чугунные, стальные, из цветных металлов... В цехе чугун выплавляли в вагранке, сталь – в электропечи, а цветные металлы – на небольшом участке в нагревательном тигле. Самыми трудоёмкими изделиями были стальные гребные винты для рыболовецких судов. Почему рыболовецких? Дело в том, что Мехзавод относился к предприятиям рыбной отрасли, которые входили в Мурманский Совнархоз. Обрубка пригара с отливки «Гребной винт» требовала затрат. Применяли наждачные круги и долго елозили ими по поверхности отливки, доводя её до чистого состояния. Труд этот действительно тяжёлый, в США им занимались только афроамериканцы, а белые не считали для себя достойным такой «Сизифов труд». Чугунное литьё доставляло меньше хлопот, но тоже требовало удаления пригара, а с цветным литьём вроде всё было в порядке.



Само литейное производство выглядело архаичным. В опоку, представляющую собой металлический корпус без дна и верха, ставилась деревянная модель, вокруг неё набивалась формовочная земля. Потом модель извлекалась, а в полость вставлялись при необходимости стержни из формовочной массы для создания пустот в отливке. Опоки состыковывались друг с другом и ставились в ряд под литьё. На кране подвозили ковш с расплавленным металлом, наклоняли его, и металл выливался в формы. Сверху оставлялась т.н. прибыль, чтобы, остывая, металл под давлением прибыли проникал во все углы и пустоты. После остывания отливка краном извлекалась из формы и поступала на обрубку прибыли, зачистку от заусениц и удаление пригара.

В цехе всегда было шумно, жарко, в нос попадали копоть и пыль (рис., автор в литейном цехе). В качестве противопригарного материала для стали применялся маршаллит – природный пылевидный кварц. Он разводился водой, к которой добавлялся сульфитный щёлок как крепитель, а с помощью т.н. «помочка» красились формы и стержни перед заливкой метал-



ла. Я подумал, что такой цех – удобная площадка для испытаний разных противопригарных материалов. А чтобы не зависеть от товарной продукции цеха, надо использовать специально предназначенные для этого стальные кубы размером 20 × 20 × 20 см. Весил такой куб около 70 кг, им можно было спокойно манипулировать. Каждая вертикальная сторона формы делилась на три дорожки, каждая дорожка покрывалась с помощью «помочка» экспериментальной противопригарной краской. Важно было так маркировать дорожки, чтобы не перепутать, какой состав был на каждой. На одном кубе можно было испытать 12 составов. В итоге было отлито 17 кубов, испытано 180 составов.

В помощники мне дали молодого специалиста А.П. Процюка, окончившего химфак Воронежского университета. С его помощью я попытался «механизировать» нанесение покрытий путём брызгального насоса, купленного у эстонцев, облицовывавших в Апатитах здание КФ АН СССР гранитной крошкой. Правда, из этой затеи ничего не вышло, выручил всё тот же «помочок», который после каждого состава надо было тщательно промывать, чтобы эксперимент был «чистым». К пребыванию в литейном цехе А.П. относился боязливо, он признался, что у него был туберкулёз лёгких и грязная литейка была для него не лучшим местом.

Мне же здоровья было не занимать, и находился я в литейке сколько было нужно. Думалось, раз появилась такая возможность, стоит испытать разные минералы, породы, смеси, не вдаваясь в теоретизирование, и посмотреть – что из этого получится. Образцы собирались по всему КФ АН СССР. Что-то имелось у геологов, обогатителей и, естественно, у химиков. Тут сказалось моё равнодушное отношение к географии. Я решил вовлечь в дело все месторождения Кольского п-ова. 180 дорожек вместили в себя практически всё минеральное разнообразие региона: редкометальное, алюмосиликатное, фосфатное сырьё, сырьё для цветной и чёрной металлургии. Я исходил из простого – а вдруг будет интересный эффект. В ход были пущены все концентраты, получаемые при обогащении руд: Хибинских, Ковдорских, **Кейвских**, Ловозерских тундр... Массив дорожек позволил поиграть со всем этим богатством. Эталоном на каждом кубе служил маршаллит – с ним производилось сравнение качества поверхностей стальной отливки. Кроме визуальной оценки, делалось измерение специальным индикатором с графической записью профиля поверхности. Продолжалось это около года. (Жили мы наездами в гостинице на ул. Первомайской. Напротив была столовая – в ней питались, а страна в эти Хрущёвские времена бурлила. На Центральной площади города перед кинотеатром «Нива» стояли два памятника – В.И. Ленину и И.В. Сталину. Как-то поздно вечером шли с завода – стояли оба памятника, а утром стоял только памятник В.И. Ленину. И.В. Сталин исчез, как будто его и не было.) Все испытанные материалы были распределены по пятибалльной шкале: очень хорошие, лучше маршаллита, на уровне маршаллита, хуже маршаллита и очень плохие. Большинство материалов имели оценки 1 и 2. Меньшая часть – 3 и 4, пятерку заслуживал только **кианит, полученный из руды месторождения Тяпш-Манюк**. Банка с кианитом случайно оказалась в моём шкафу как остаток проб, изучавшихся нами ещё тогда, когда в 1950-е гг. КФ АН СССР находился на 25-м километре (пос. Кукисвумчорр).

Мы по всей форме предъявили отливки Комиссии во главе с начальником цеха В.И. Бандурой – кстати сказать, отличным мужиком, который, скрепя сердце, терпел наши художества с кубами – металла на них ушло больше тонны, а к плану это ничего не прибавило. Составили по всей форме акт и рапортовали начальству – сначала директору завода Б.Г. Сизову, затем в Совнархоз о том, что родной кианит с Б. Кейв, расположенных в восточной части Кольского п-ова, обладает приличными противопригарными свойствами и его можно использовать для стального и чугунного литья. Чугунное литьё было испытано между прочим, прямо на рабочих отливках с помощью присыпок, так называемых припылов.

Эти результаты позволили оформить заявку на изобретение «Противопригарная краска» с приоритетом от 08.06.1962 г., авторы Д.Л. Мотов, А.П. Процюк и директор завода Б.Г. Сизов. Не худо было бы включить в число авторов директора нашего Института О.С. Игнатьева, но я тогда не имел опыта в таких делах, а зав. патентным отделом Института И.С. Игнатьева – по совместительству супруга директора – не подсказала нам этого. В переписке по заявке оппонентом выступил Московский институт НИИЛИТМАШ, который заявил, что у них есть заявка на применение в таком качестве дистена-силлиманита, родственного кианиту. Но в дело вмешался председатель Президиума КФ АН СССР Е.К. Козлов. Приоритет на кианит был явно наш, а заявка НИИЛИТМАШа была подана позднее, причём заявителем значилась некая Ткаченко, которая и была экспертом нашей заявки. Вместе с Е.К. Козловым мы написали авторитетное разоблачение, подвергли разгрому НИИЛИТМАШ, и в 1964 г. нам выдали по всей форме авторское свидетельство – третье в моём послужном списке.

Совнархозом тогда командовал Сухорученко, а в Обкоме КПСС промышленность курировал В.Н. Птицын, ставший впоследствии первым секретарем Мурманского обкома партии. Он проявил живой интерес к делу и попросил меня связаться с предприятиями Мурманской области, располагающими литейками. Таковыми были ремонтно-механические цеха (РМЦ) комбинатов «Апатит», «Североникель», «Печенганикель», Мурманской судовой верфи и Судоремонтного завода Северного флота. Везде проводились испытания с убедительными результатами. На этой восходящей волне я хорошо помню выступление у нас в КФ АН второго секретаря обкома КПСС А.М. Матвеева. Он сказал, что с помощью такого эффективного использования кианита можно будет направить усилия на разработку кейвских месторождений, построить в сторону Б. Кейв дорогу, создать там поселение и таким путём дать развитие дремлющей восточной части Кольского п-ова. Эта задача «суперважная», она сулит общий прогресс. Всемерно поддерживал это направление И.В. Бельков, ставший тогда директором Геологического института КФ АН. Его любимым геологическим объектом исследований была Кейвская гряда, главное богатство которой – кианит.

Материалы по применению кианита были представлены в Москву. Незамедлительно последовало Постановление Правительства о добыче опытной партии кианита и проведении промышленных испытаний на крупнейших заводах страны: в Ленинграде на Невском машиностроительном заводе им. В.И. Ленина, Арматурном заводе им. И.И. Лепсе и Обуховском; в Москве на заводе Станколит, Электростальском заводе тяжелого машиностроения; в Свердловске на Уралмаше. Повторю, что время было Хрущёвское, время решительных и масштабных действий. Контроль вёл Промышленный отдел ЦК КПСС, возглавлявшийся Чугунов. Я слетал на Б. Кейвы к месторождению Тяпш-Манюк, где группа рабочих вручную добыла партию руды около 60 т. Её на самолётах доставили в Кировск, где в ЦЛ комбината «Апатит» под руководством нач. лаборатории Торцева обогатили и получили кианитовый концентрат.

Этот концентрат был в контейнерах направлен на все заводы, названные в постановлении Правительства, и на предприятия Мурманской области, располагающие «литейками». Мне пришлось на каждом заводе вникать в технологию, выбирать отливки, достойные эксперимента. В помощниках был А.П. Процюк, но для него это дело оказалось тяжёлым. Испытания начались в Ленинграде на Невском заводе, но следом за ним включились другие, в итоге испытания шли одновременно на трёх ленинградских заводах. Более того, детали надо было согласовывать с Ленинградским Совнархозом и с находившимся в Ленинграде Институтом ЦНИИТМАШ, который вносил в испытания свою научную лепту. На Невском заводе были получены с применением кианита как противопригарного материала отливки для Асуанской гидроэлектростанции в Египте, на заводе им. И.И. Лепсе – лопасти для её турбин. В сентябре 1963 г. были начаты испытания в Москве, а там тоже свой Совнархоз и Институт НИИЛИТМАШ. А.П. Процюк вышел из строя, и мне пришлось разрываться между столицами. Бывали дни, когда с утра надо быть в Ленинграде, днём – в Москве, да ещё добираться до заводов и НИИ.

Два раза были текущие обсуждения проблемы в ЦК КПСС, располагавшемся в Москве на Старой площади. К декабрю 1963 г. испытания в Москве и Ленинграде были завершены, составлен предварительный отчёт. К Новому 1964 г. я вернулся в Апатиты, а 13 января должен был приехать в Ленинград для согласования актов испытаний с Институтом ЦНИИТМАШ и Совнархозом. В этот день я отвёз супругу в больницу пос. Белореченский – там было родильное отделение зарождающегося г. Апатиты – и последовал в аэропорт. Была нелётная погода, я не улетел в этот день и в компенсацию получил дочь Асю. Назавтра я успел заехать в роддом, увидеть её и супругу и отбыл в Ленинград. Мне удалось вернуться домой только в конце мая 1964 г., когда закончились испытания на «заводе заводов» УралМаш'е. Там отливали наиболее ответственные детали для строящегося в Индии Бхилайского металлургического комбината. Самым тяжёлым испытанием по весу и сложности был «Ковш шлаковоза», форма перед заливкой растрескалась, не выдержав нагрузки. Пришлось на ходу «залечивать раны», но всё обошлось и «Ковши шлаковоза» пошли в Индию.

После УралМаш'а состоялось обсуждение в ЦК КПСС результатов испытаний по Постановлению Правительства. Я доложил о положительных итогах работы, и председатель Чугунов выразил удовлетворение проделанным. Он стал спрашивать присутствующих представителей Министерств, какую они смогут внести лепту в освоение Кейв. Ни одно из Министерств – автомобилестроения, судостроения, машиностроения – не согласилось взять на себя ответственность по этому масштабному делу, так как не считало, что именно его литейному производству оно больше всех надо. На том обсуждение и завершилось – ждать лучших времён, когда найдутся средства.

Так для меня закончилась «Литейная одиссея», и восток Кольского п-ова до сих пор ждёт своего часа. Правда, отголосок эта работа имела. Потребовалось подвести теоретическую базу под проявление у кольского кианита, содержащего примесь графита, уникальных противопри-

гарных свойств. Это было сделано термодинамическим анализом реакций на границе металл-форма. На эту тему А.П. Процюк в 1969 г. представил под моим руководством кандидатскую диссертацию «Исследование причин образования пригара на стальном литье и методы его предотвращения». Он защитил её в Москве – в Химико-технологическом институте им. Д.И. Менделеева. Всё-таки химия проявила себя в литейном производстве.

К слову сказать, за всё время «Литейной одиссеи» не прекращалась работа моей «титановой» группы в ИХТРЭМС КФ АН СССР по разным видам сырья, каждое из которых потребовало своей «эпопеи», но это – сюжеты для будущих повествований.

## НАХОДКА ЦИНКСОДЕРЖАЩЕГО СТАВРОЛИТА В КЕЙВАХ

Ю.Н. Нерадовский, Ю.Л. Войтеховский, Е.Э. Савченко  
Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

*В кристаллических сланцах Кейв обнаружен ставролит с содержанием примеси ZnO 5.98 %. Минерал находится в богатых кианитом конкреционных рудах месторождения Н. Шуурурта. Минеральный состав руды (масс. %): кианит 42, кварц 44, мусковит 5, рутил 5, графит 3, ставролит < 1, пирротин, сфалерит, галенит, халькопирит, пентландит, ковеллин – ед. з. Химический состав руды (%): SiO<sub>2</sub> 65,31; TiO<sub>2</sub> 0,42; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30,84; FeO 0,50; MnO 0,01; MgO 0,07; Na<sub>2</sub>O 0,09; K<sub>2</sub>O 0,32; H<sub>2</sub>O 0,14; H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 1,94; S<sub>общ</sub> 0,02; Cu < 0,01; Ni < 0,01; Co < 0,01; Zn < 0,01; Pb < 0,001; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,02; сумма 99,68. Химический состав определен рентгеноспектральным методом на электронном микроанализаторе Сатеса MS-46 (масс. %): SiO<sub>2</sub> 27,84; TiO<sub>2</sub> 0,34; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 54,64; FeO 8,19; MgO 1,47; MnO 0,3; ZnO 5,98; сумма 98,75. Состав рассчитан на формулу (Fe,Mg,Zn)<sub>2</sub>Al<sub>9</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>: (Fe<sub>0,939</sub>Mg<sub>0,292</sub>Mn<sub>0,035</sub>Ti<sub>0,128</sub>Zn<sub>0,606</sub>)<sub>2,000</sub>(Al<sub>8,788</sub>Ti<sub>0,212</sub>)<sub>9,000</sub>(Si<sub>3,817</sub>Al<sub>0,044</sub>)<sub>3,861</sub>O<sub>22</sub>(OH<sub>1,134</sub>O<sub>0,866</sub>)<sub>2</sub>. Минерал приурочен к периферическим частям конкреций и параморфоз кианита. Кристаллизация цинксодержащего ставролита происходила позднее кианита, на завершающей стадии формирования основных морфогенетических агрегатов – параморфоз и конкреций. Предполагается, что в этот период произошла смена физико-химической обстановки, возросла концентрация в метаморфических растворах железа и цинка и вместо кианита начал кристаллизоваться ставролит. По-видимому, цинксодержащий ставролит имеет ограниченное распространение и связан с наиболее обогащёнными кианитом сланцами.*

Ставролит с примесью цинка встречается в основном в метаморфических породах, реже в пегматитах и гидротермалитах. Наиболее высокое содержание цинка 7,44 % установлено С.У. Шепардом (Shepard, 1856 – цит. по: Минералы..., 1972) в ставролите из кварц-биотит-ставролитовых сланцев шт. Джорджия, США. Позднее цинксодержащие ставролиты были найдены в кристаллических сланцах в Африке и других местах (Genth, 1862 – цит. по: Федькин, 1974; Hanisch, 1966 – цит. по: Минералы..., 1972). Повышенные содержания цинка в ставролите (до 3,05 %) обнаружены в андалузит-гранат-ставролитовых сланцах Карелии (Федькин, 1974), слюдоносных пегматитах Сибири и Кольского п-ова (Тарновский, 1973; Gibson, 1978; Кочеткова и др., 1979; Von Knorring, 1979; Nemes, 1980; Мец и др., 1983). Установлено, что от обычного ставролита цинксодержащий отличается меньшим параметром *b* (Juurinen, 1956; Hanisch, 1966). Повышение концентрации цинка сопровождается понижением содержания железа. Кейвские кристаллические сланцы являются типичными метаморфическими породами, возникшими в результате преобразования осадочного материала пелитового состава (Белолипецкий и др., 1979) в условиях кианитовой субфации амфиболитовой фации регионального метаморфизма. По данным И.В. Белькова (1963) ставролит в кианитовых сланцах кристаллизовался после кианита. В наиболее богатых кианитом сланцах содержание ставролита минимальное.

Авторами цинксодержащий ставролит обнаружен в богатых кианитом конкреционных рудах месторождения Н. Шуурурта. Минеральный состав руды (масс. %): кианит 42, кварц 44, мусковит 5, рутил 5, графит 3, ставролит < 1, пирротин, сфалерит, галенит, халькопирит, пентландит, ковеллин – единичные зёрна. Химический состав руды (масс. %): SiO<sub>2</sub> 65,31; TiO<sub>2</sub> 0,42; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30,84; FeO 0,50; MnO 0,01; MgO 0,07; Na<sub>2</sub>O 0,09; K<sub>2</sub>O 0,32; H<sub>2</sub>O 0,14; H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 1,94; S<sub>общ</sub> 0,02; Cu < 0,01; Ni < 0,01; Co < 0,01; Zn < 0,01; Pb < 0,001; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,02; сумма 99,68.

Внутреннее строение ставролита изучено на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450 с энергодисперсионной приставкой RÖENTEC, химический состав определен рентгеноспектральным методом на электронном микроанализаторе Сатеса MS-46. Химический состав ставролита (масс. %): SiO<sub>2</sub> 27,84; TiO<sub>2</sub> 0,34; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 54,64; FeO 8,19; MgO 1,47; MnO 0,3; ZnO 5,98; сумма 98,75. Состав ставролита рассчитан на кристаллохимическую формулу: (Fe,Mg,Zn)<sub>2</sub>Al<sub>9</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub> (Берри и др., 1987) по кислородному методу на 24 (O+OH) (Буллах, 1967): (Fe<sub>0,939</sub>Mg<sub>0,292</sub>Mn<sub>0,035</sub>Ti<sub>0,128</sub>)<sub>2,000</sub>(Al<sub>8,788</sub>Ti<sub>0,212</sub>)<sub>9,000</sub>(Si<sub>3,817</sub>Al<sub>0,044</sub>)<sub>3,861</sub>O<sub>22</sub>(OH<sub>1,134</sub>O<sub>0,866</sub>)<sub>2</sub>.

$Zn_{0,606}Al_{2,000}(Al_{8,832}Ti_{0,212})_{9,000}(Si_{3,817}Al_{0,044})_{3,861}O_{22}(OH_{1,134}O_{0,866})_2$ . По содержанию примеси ZnO 5,98 % кейвский ставролит относится к одному из наиболее обогащенных в мире. Ранее в ставролите из Кейв цинк в составе ставролита не отмечался (Бельков, 1963; Химические анализы..., 1970).

Цинк содержащий ставролит месторождения Н. Шуурурта образует в кианитовом сланце идиоморфные короткостолбчатые, призматические кристаллы с гексагональными сечениями (рис. 1). Размеры кристаллов до 2 мм, они часто насыщены включениями, имеют зональное строение. Кристаллы располагаются вблизи конкреций и параморфоз кианита, обычно в тесном срастании с кианитом, реже отдельно, в местах повышенной концентрации графита. Цинк содержащий ставролит кристаллизовался непосредственно на зёрнах кианита, эпитаксически срастаясь с ним (рис. 2), как бы продолжая рост игольчатых зерен кианита. Кристаллы ставролита представляют собой типичные метасоматические образования, насыщенные включениями кварца и графита (рис. 3). Их рост происходил, вероятно, путем замещения мусковит-графит-кварцевого субстрата за счёт поступления поровых растворов, при этом частично использовался минеральный состав субстрата.

**Обсуждение результатов.** Исследования химического состава ставролита в кианитовых сланцах Кейв, на примере конкреционных руд месторождения Н. Шуурурта показали, что он отличается высоким содержанием примеси ZnO. Вместе с тем, содержание ставролита в руде составляет < 1 %, содержание ZnO < 0,01 %. Цинк содержащий ставролит не оказывает заметного влияния на химический состав руды и имеет лишь минералогическое значение.

Кристаллизация цинк содержащего ставролита происходила позднее кианита, на завершающей стадии формирования основных морфогенетических типов кианита (Бельков, 1963) – параморфоз и конкреций. В этот период произошла смена физико-химической обстановки, в результате чего вместо кианита начал кристаллизоваться ставролит. По-видимому, именно в этот период возросла концентрация железа и цинка в метаморфических растворах.

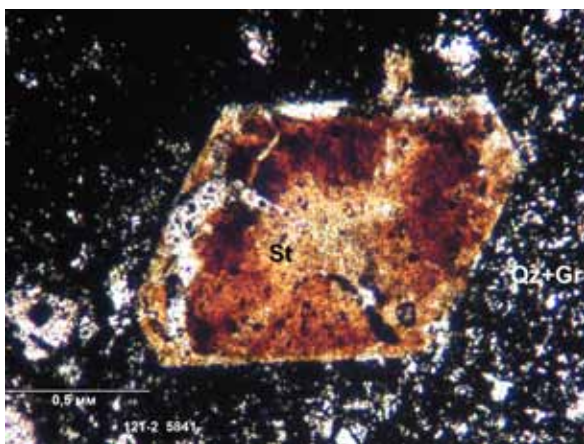


Рис. 1 (слева). Кристалл ставролита гексагонального сечения в мусковит-графит-кварцевом субстрате. Тёмные участки – включения графита. Фото в проходящем свете. Николи параллельны.

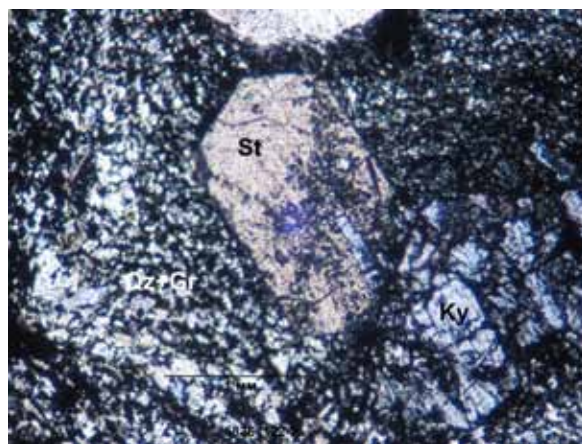


Рис. 2 (справа). Эпитаксический сросток ставролита с кианитом на краю конкреции. Фото в проходящем свете. Николи параллельны.

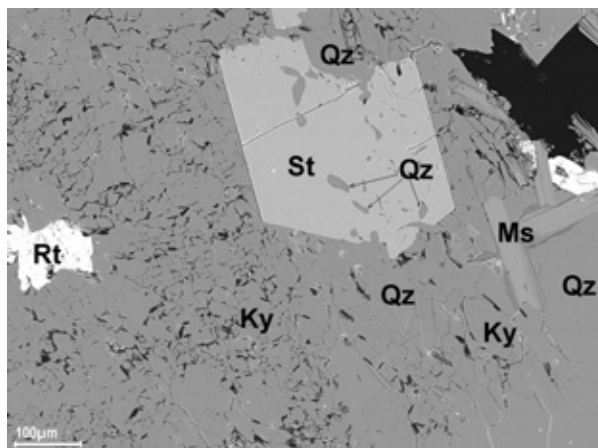


Рис. 3. Метакристалл ставролита в мусковит-графит-кианит-кварцевом агрегате. Видны включения кварца. Изображение в отраженных электронах.

По результатам исследования химического состава ставролита из других месторождений Кейв (Бельков, 1963, Химические анализы..., 1970), в нём не наблюдается заметных концентраций цинка. По-видимому, примесь цинка характерна только для ставролита, образовавшегося в определённых условиях, возможно, в кианитовых сланцах с высокой концентрацией глинозема и низкой концентрацией железа, или в зонах, проницаемых для цинк содержащих растворов.

Кейвские кианитовые месторождения формировались в условиях регионального метаморфизма и контактово-метасоматического воздействия основных и щелочных интрузий (Бельков, 1963; Петров, Глазунков, 1986). С внедрением основных интрузий, в частности, связывается железисто-магнезиальный метасоматоз ставролита, его замещение хлоритом в узких контактных зонах. Но влияние интрузий, вероятно, началось раньше и проявлено шире, в том числе и в поступлении растворов, обогащённых Fe и Zn, обусловивших образование цинксодержащего ставролита.

Интересен вопрос об отнесении кейвского цинксодержащего ставролита к цинкоставролиту – самостоятельному минеральному виду, цинковому аналогу ставролита (Кривовичев, 2008, с. 403). По данным (Кудряшова, Смольянинова, 2004, с. 40-41), этот найденный в Швейцарии новый минерал содержит около 11.82 % ZnO (среднее по трём анализам) и структурный литий (0.45 % Li<sub>2</sub>O). Определение последнего в кейвском ставролите – задача дальнейших исследований.

**Выводы.** В кианитовых сланцах Кейв установлено присутствие цинксодержащего ставролита с содержанием ZnO до 5.98 %. Минерал образовался на заключительной стадии формирования кианитовых конкреций и параморфоз.

Образование цинксодержащего ставролита связано с воздействием на кианитовые сланцы растворов, обогащённых Fe и Zn. Источником растворов могли быть основные и щелочные интрузии, внедрившиеся в кейвскую толщу и оказавшие активное контактово-метасоматическое воздействие на кианитовые сланцы.

### Список литературы

1. Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.,-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 321 с.
2. Белолипецкий А.П., Ильин Ю.И., Предовский А.А. Первичная природа и эволюция состава метапелитов кейвского сланцевого комплекса // Первичная природа и геохимия пород докембрия Кольского п-ова. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1979. С. 3-16.
3. Берри Л., Мейсон Б., Дитрих Р. Минералогия. М.: Мир, 1987. 592 с.
4. Булах А.Г. Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М.: Недра, 1967. 144 с.
5. Кочеткова К.В., Ковалёв К.Р., Ковалёва Л.Т. О цинксодержащем ставролите Холодинского месторождения, Сев. Прибайкалье // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 2.
6. Кривовичев В.Г. Минералогический словарь. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2008. 556 с.
7. Кудряшова В.И., Смольянинова В.Н. Новые минералы. LVIII // Зап. РМО. 2004. № 6. С. 30-48.
8. Мец О.Ф., Полежаева Л.И., Богданова А.Н. Цинксодержащий ставролит из слюдоносных пегматитов Кольского п-ова // Зап. ВМО. 1983. № 2. С. 208-212.
9. Минералы. Справочник. Т. 3, вып. I. М.: Наука, 1972. 882 с.
10. Петров В.П., Глазунков А.Н. Этапность и термодинамический режим метаморфизма Кейвского блока // Строение и метаморфическая эволюция главных структурных зон Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1986. С. 50-59.
11. Тарновский Г.Н. Цинксодержащий ставролит из пегматитов и гидротермалитов Вост. Сибири // Вопр. минералогии и геохимии месторождений Вост. Сибири. Иркутск: Изд-во Ин-та геохимии СО АН СССР, 1973.
12. Федькин В.В. Особенности химического состава и изоморфных замещений атомов в ставролите // Очерки физико-химической петрологии. Вып. IV. М.: Наука, 1974.
13. Федькин В.В. Ставролит. М.: Наука, 1975. 272 с.
14. Химические анализы минералов Кольского п-ова. Апатиты: Ротапринт КФ АН СССР, 1970. 508 с.
15. Gibson G.M. Staurolite in amphibolite and Hornblendite sheets from the Upper Seaforth River, central Fjorland, New Zealand // Miner Mag. 1978. V 42. N 321.
16. Juurinen A. Composition and properties of staurolite // Ann. Acad. Sci. Fennicae. Ser. A. 1956. N 47. P 50.
17. Knorring O., Sahama Th.G., Shovola Y. Zincian staurolite from Uganda // Miner. Mag. 1979. V 43. N 327.
18. Nemeč D. Zinkhaltiger Staurolith aus der Böhmischo-Mährischen Höhe, ČSSR // Chem. Erde. 1980. V 39. N 4.

## МОРФОЛОГИЯ И ЗОНАЛЬНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ СТАВРОЛИТА ИЗ СТАВРОЛИТОВЫХ СЛАНЦЕВ КЕЙВ

Нерадовский Ю.Н., Войтеховский Ю.Л., Карпов С.М.  
Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты.

Ставролит – типичный минерал метаморфических пород, его появление связано с региональным метаморфизмом за счёт преобразования высокоглиноземистых осадков при средних температурах и давлениях. Нижним пределом устойчивости ставролита считаются:  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5\text{ кбар}$ , наиболее устойчив при температурах  $600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении от 2 до 5,5 кбар (Минералы, 1972). Эти оценки условий согласуются с данными парагенетического анализа формирования Кейв (Термо- и барометрия..., 1977). Ставролит широко распространен в разрезе Б. Кейв, особенно в плагиоклаз-ставролитовых сланцах пачки «Г» (Бельков, 1963). Размеры кристаллов варьируют от нескольких мм до 6 см по удлинению, до 2 см по толщине. Ставролит из Кейв слабо изучен ввиду отсутствия к нему промышленного интереса, хотя он широко известен как коллекционный минерал (<http://geo.web.ru/druza/1-Keivoy.htm>). Особенность ставролита – нахождение в хорошо образованных кристаллах и двойниках среди кианит-мусковит-полевошпатово-кварцевых сланцев (рис. 1, 2). В процессе выветривания вмещающих пород ставролит устойчив, его кристаллы нередко образуют россыпи. В настоящее время интерес к ставролиту повышается в связи с возможным использованием его в металлургии железа (Кривонос и др., 1987; Попова и др., 1992; Панов, Панов, 2007) и алюминия (Валиев и др., 2008).



Рис. 1 (слева). Порфиробластический плагиоклаз-ставролитовый сланец (выветрелая поверхность). Видны кристаллы ставролита (коричневое) и плагиоклаза (белое).

Рис. 2 (справа). Порфиробластический ставролитовый сланец (разрез). Кристаллы ставролита (St), кианита (Ky) и плагиоклаза (Pl) в тонкозернистом мусковит-кварцевом субстрате (Qz+Ms). Сканирование.

Главными кристаллографическими формами ставролита в сланцах Кейв являются призмы  $m$  (110) и  $r$  (201), пинакоиды  $c$  (001) и  $b$  (010), двойники по (231) и (031), тройники по (231) (рис. 3). Последние упоминаются И.В. Бельковым (1963) и в частных коллекциях (Интернет), но не описаны в известных справочниках (Минералы, 1972; Федькин, 1975).

В литературе известно 15 простых форм, встречающихся на кристаллах ставролита (Минералы, 1972, Федькин, 1975), но главными являются  $c$ (001),  $b$ (010),  $m$ (110) и  $r$ (201). Они хорошо развиты на кристаллах из различных кристаллических сланцев (Свяжин, 1956; Соколов, 1956; Бельков, 1963). Степень развития простых форм различна в разных породах. В породах из разреза Кейв, в ставролитовых сланцах пачки «Г» преобладают призматические кристаллы с хорошо развитыми гранями призмы и пинакоида  $m$ ,  $b$  и постоянно присутствующими гранями  $c$  и  $r$ . В кианитовых сланцах пачки «В» грань  $r$  не встречается, но присутствует редкая грань  $f$  (101) (Бельков, 1963). В углисто-кремнистых и слюдяно-кварцевых сланцах Урала преобладают призматические кристаллы с хорошо развитыми гранями призм  $m$  и  $r$  и неравномерно развитыми пинакоидами  $b$  или  $c$  (Свяжин, 1956; Соколов, 1956).

Кристаллы ставролита из кейвских пород обладают исключительно четкой зональностью. Различаются три главных типа зональных кристаллов. Первый – длиннопризматические кристаллы, располагающиеся вдоль сланцеватости вмещающей породы; второй – короткопризматические кристаллы, располагающиеся косо или поперек сланцеватости; третий – кристаллы в составе друзовых агрегатов вдоль трещин, секущих сланцы. Кроме того, присутствуют мелкие кристаллики, хаотически расположенные в сланцах, обладающие особым типом зональности.

Первый тип слагают наиболее крупные и длинные кристаллы. В них развито три основных зоны (рис. 4), внутри которых развита тонкая зональность второго порядка (рис. 5). Характерной особенностью строения зональности является наличие темного ядра, «расташенного» в разные концы кристалла.

Рост кристаллов первого типа происходил, вероятно, в процессе продольного растяжения. Во всех кристаллах имеется зародыш темного цвета, который в разной степени «растает» по удлинению кристаллов по сланцеватости (рис. 6-8). Все кристаллы огранены с обеих сторон.

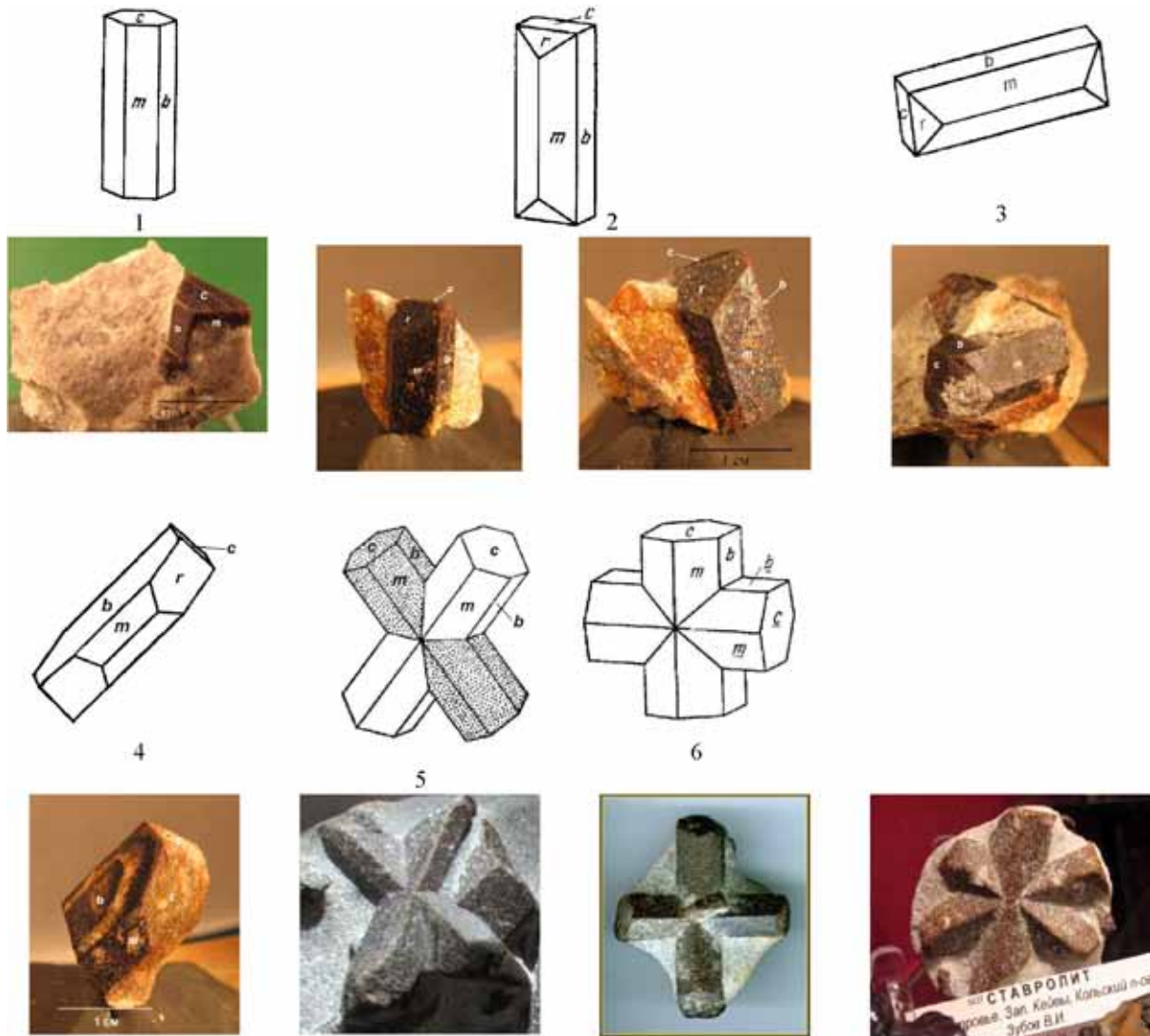


Рис. 3. Формы кристаллов ставролита из ставролитовых сланцев: 1) тип I, простые формы ( $c, m, b$ ) – призматический с активным развитием грани  $c$  (001); 2) тип II, простые формы ( $m, b, r, c$ ) – призматический с активным развитием грани  $m$  (110); 3) тип III, простые формы ( $b, m, r, c$ ) – пинакоидальный с активным развитием грани  $b$  (010); 4) тип IV, простые формы ( $b, r, m, c$ ) – пинакоидальный с активным развитием граней  $b$  (010) и  $r$  (201); 5) тип V – косоугольный двойник по (231); 6) тип VI – крестообразный двойник по (031); 7) тип VII – тройник по (231) (в литературе не описан). Фото обр. 5-7 (<http://geo.web.ru/druza/l-Keivy.htm>).



Рис. 4. Длиннопризматический кристалл первого типа (продольный разрез) и зародыш кристалла четвертого типа. Видны фрагменты ядра в разных концах кристалла и две зоны вокруг него. Фото в проходящем свете.

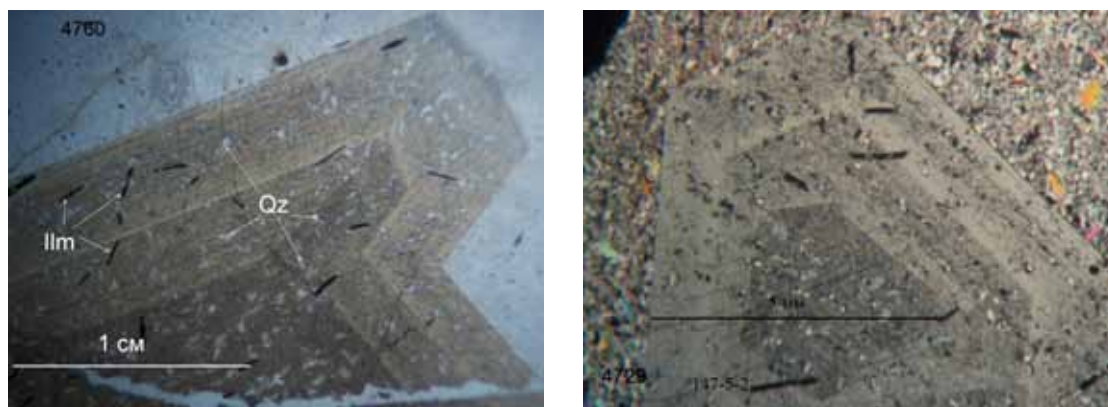


Рис. 5. Зональность в поперечных сечениях кристаллов первого типа. Видно темное ядро и две зоны вокруг него. В ядре присутствуют криптокристаллические включения кварца. Во внешних зонах кристаллы содержат более крупные включения кварца. Весь кристалл и насыщен включениями ильменита (черное). Фото шлифов в поляризованном свете (слева) и с фильтром (справа).

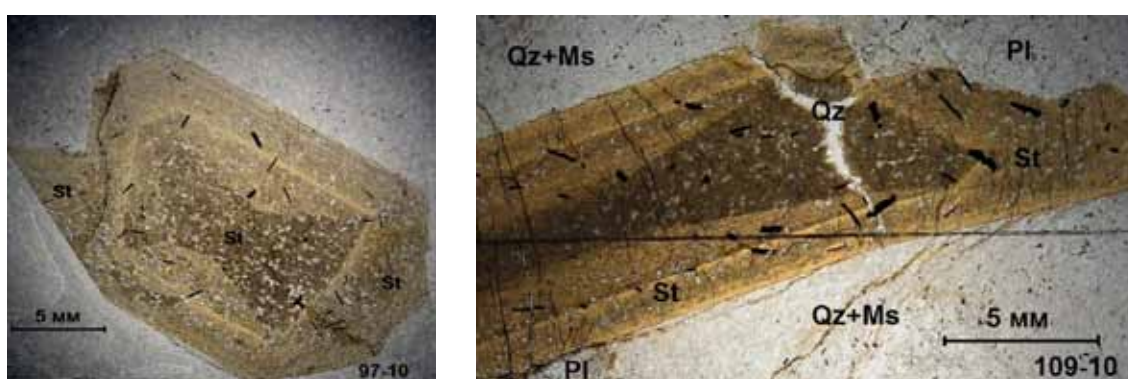


Рис. 6 (слева). Зональность в кристалле, ориентированном косо к сланцеватости. Видна начальная стадия растаскивания ядра. Фото прозрачного крупного шлифа.

Рис. 7 (справа). Зональность в кристалле, ориентированном близко к сланцеватости. Видно интенсивное растаскивание ядра вдоль удлинения кристалла с признаками шлейфа от не полностью разорванного ядра, а также позднее дробление кристалла с залеченной кварцем трещиной. Фото прозрачного крупного шлифа.

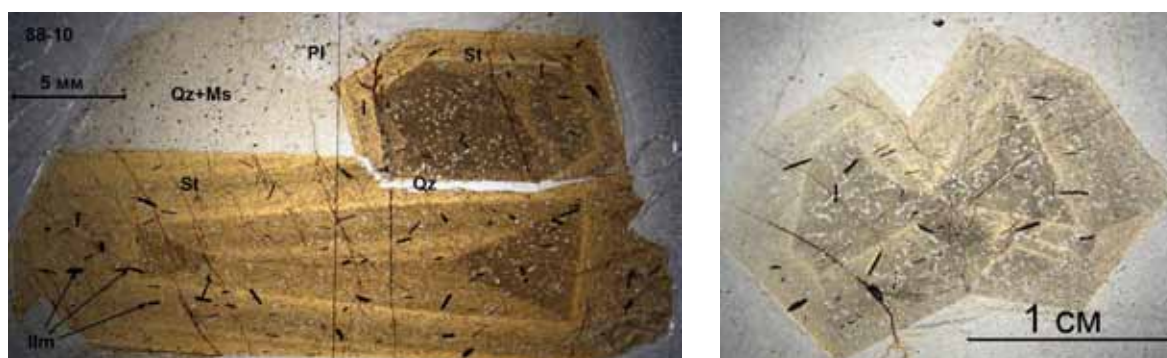


Рис. 8 (слева). Зональность в кристалле, ориентированном по направлению сланцеватости вмещающей породы. Видно полное разделение ядра на две части в разных концах кристалла, аналогично рис. 3. Фото прозрачного крупного шлифа.

Рис. 9 (справа). Сложная форма зародыша, обросшего новыми гранями. Фото прозрачного крупного шлифа.

Форма зародыша представляла, вероятно, комбинацию граней пинакоидов  $c$  и  $b$  и призмы  $r$ , сросшихся подобно песочным часам (рис. 9). В поперечном сечении зародыша часто наблюдается гексагональная форма (рис. 5, слева), а в продольном треугольная (рис. 9). В процессе роста зародыш обростал по удлинению кристалла гранями призмы  $t$  и пинакоида  $b$ , а со стороны головки кристалла – гранями призмы  $r$  и пинакоида  $c$ . В процессе роста кристаллов первого типа, вследствие интенсивного вытягивания по удлинению (растяжения) и других деформаций (излома), возникали дефекты, способствовавшие зарождению двойников. Особенно благоприятны для двойникового были кристаллы, ориентированные под незначительным углом относительно максимального «течения» сланцев. Все



кристаллы, расположенные таким образом, имеют двойники или зародыши двойников (рис. 10-12).

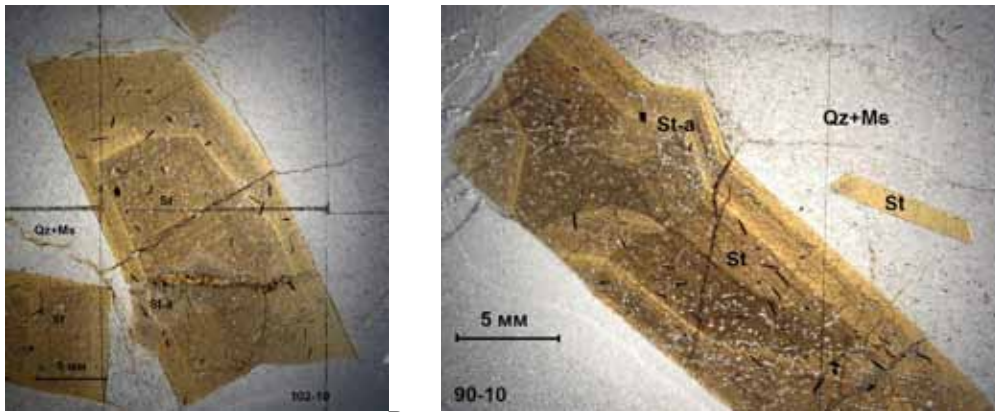


Рис.

10 (слева). Слаборазвитый двойник: в кристалле ставролита, ориентированном поперек сланцеватости, виден зародыш двойника (St-a). Он пересекается трещиной с жилкой хлорита. В крупном кристалле ставролита присутствуют многочисленные включения ильменита (черное). Фото прозрачного крупного шлифа.

Рис. 11 (справа). Хорошо развитый двойниковый шов в кристалле, ориентированном косо к сланцеватости. Виден сформированный двойниковый шов с кристаллом St-a. Рядом с большим кристаллом расположен кристаллик ставролита четвертого типа. Фото прозрачного крупного шлифа.

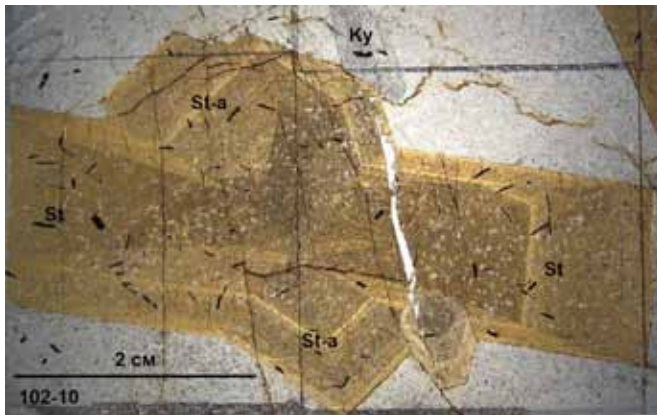


Рис. 12. Двойник ставролита, основной кристалл (St) ориентирован параллельно сланцеватости, в нем развит кристалл (St-a). Хорошо видно совпадение зональности в основном кристалле и в двойнике, а также еще один зародыш неразвитого кристалла ставролита, кианит (Ky) и черные пластинки ильменита. Фото прозрачного крупного шлифа.

Кристаллы ставролита второго типа представлены короткопризматическими образованиями, располагающиеся косо или поперек сланцеватости. Характерно асимметричное строение, обусловленное развитием разных граней на головках, обычно в одну сторону головка представлена пинакоидом  $c$ , а в другую призмой  $r$  (рис. 13). В центре кристаллов, как и в первом типе, располагается ядро, слабо растянутое по удлинению кристалла, оно обрастает широкими зонами как по грани пинакоида (рис. 13 в), так и по грани призмы (рис. 14).

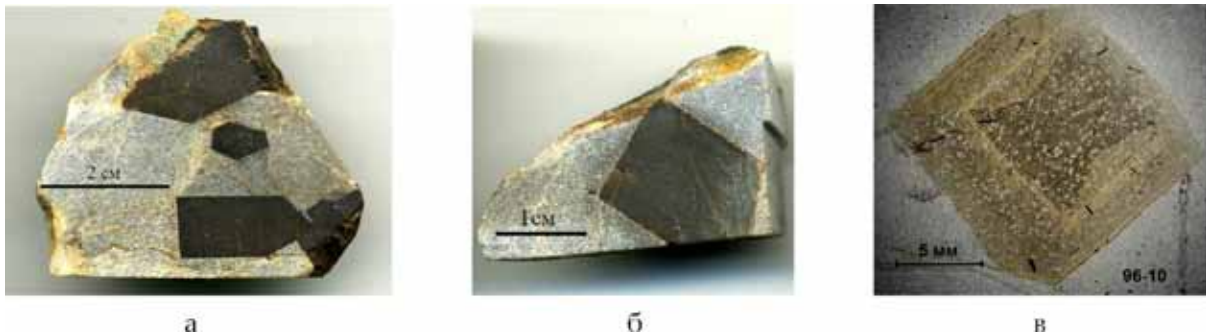


Рис. 13. Кристаллы второго типа (а, б) и их зональность (в). Видны грани пинакоида с одной стороны кристаллов, широкие зоны вокруг ядра. Сканирование (а, б) и фото крупного шлифа (в).

Кристаллы первого и второго типов «плавают» в мусковит-кварцевом субстрате. В отличие от них имеются кристаллы, приуроченные к трещинам, секущим сланцы. Эти трещины согласны с общим направлением рассланцевания, обрамляют отдельные блоки сланцев. Вдоль таких трещин

наблюдалось зональное развитие метакристаллов кианита и ставролита (Бельков, 1963). Нами образование ставролита в таких условиях выделено в особый третий тип кристаллов, поскольку здесь наблюдается совершенно необычная кристаллизация и процесс роста подобен друзовому росту кристаллов в открытых полостях. Нами исследовано строение многочисленных кристаллов, выросших вдоль трещины в ставролитовом сланце (рис. 15). Цепочки кристаллов обнаружили признаки, характерные для друз и щеток (Григорьев, 1961) с естественным отбором преимущественного роста кристаллов, наиболее благоприятно ориентированных к поверхности трещины (рис. 16, 17).

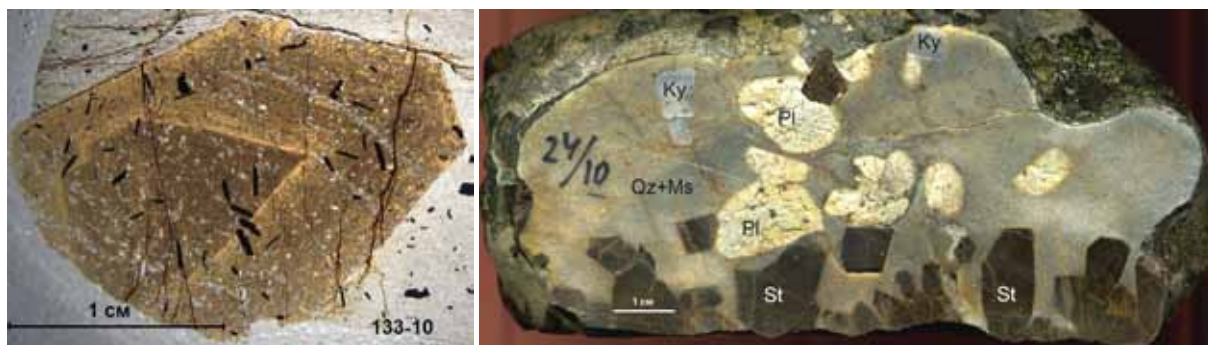


Рис. 14 (слева). Кристалл второго типа: широкие зоны граней призмы вокруг ядра, зарождение грани пинакоида на ребре граней *m*. Черное – ильменит. Фото прозрачного крупного шлифа.

Рис. 15 (справа). Друзы кристаллов ставролита вдоль тектонической трещины в кианит-ставролитовом сланце. Ставролит (St), плагиоклаз (Pl) и кианит (Ky) в микрозернистой мусковит-кварцевой массе (Qz+Ms). Сканирование.

В кристаллах третьего типа обнаружены три зоны, аналогично первому и второму типам. В отличие от них, первая зона более развита, зародыш составляет в некоторых кристаллах значительный объем. Зональность кристаллов асимметричная, рост кристаллов происходил от трещины в сторону сланца. Морфология зародыша отличается также асимметричностью, отсутствуют признаки разделения на две части вдоль удлинения кристалла, но некоторые кристаллы морфологически соответствуют второму типу. В целом структура зональности указывает на рост кристаллов подобно свободной кристаллизации в мусковит-кварцевом субстрате за счет питания из сланца, а не из трещины.

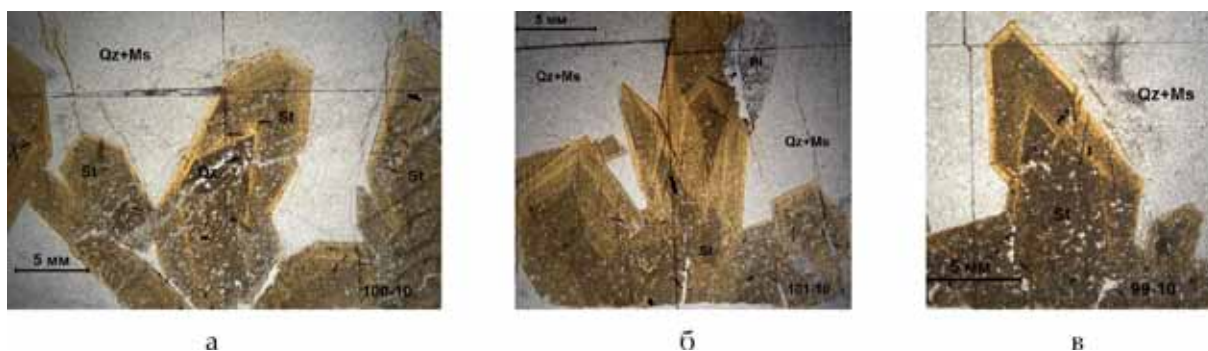


Рис. 16. Зональность в кристаллах ставролита (St) из друзового агрегата. Видны признаки естественного отбора, развитие граней призмы и пинакоида на завершающей стадии роста кристаллов. Рост кристаллов происходил в мусковит-кварцевом субстрате (Qz+Ms). В контакте с плагиоклазом (Pl) (б) ставролит корродирован. Фото прозрачных крупных шлифов.

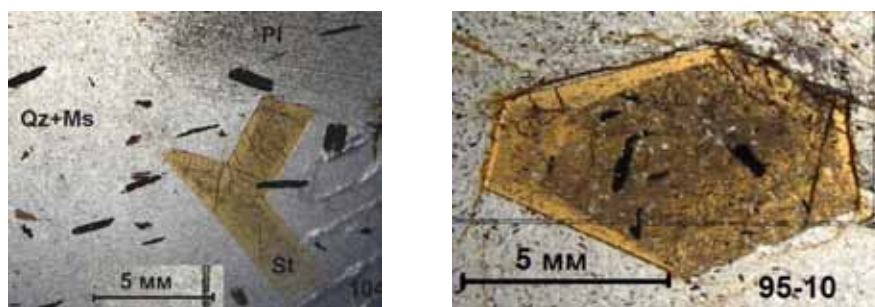


Рис. 17. Кристаллы ставролита четвертого типа, продольный (слева) и поперечный (справа) разрезы. Везде видны черные кристаллы ильменита и рутила. Фото прозрачных крупных шлифов.

Кристаллы четвертого типа развиты незначительно, обычно представлены мелкими одиночными зернами и сростками (рис. 4, 11, 17). В них отсутствует плотное ядро, а иногда и вторая зона, характерные для трех первых типов кристаллов. Внутренняя зона мутная, насыщена включениями кварца, внешняя зона более чистая, аналогичная крупным кристаллам первых трех типов. Облик кристаллов призматический, вероятно, развиты призма *m* и пинакоиды *p* и *c*. Ориентировка кристаллов четвертого типа обычно согласуется с ближайшим крупным кристаллом первого типа. Отмеченные особенности кристаллов четвертого типа показывают, что это поздние зародыши. Их образование произошло, вероятно, в период формирования второй и третьей зон на кристаллах основной генерации.

**Заключение.** Результаты исследования морфологии кристаллов ставролита позволяют выделить четыре главные простые формы. Призматический габитус является основным для кристаллов ставролита, господствующей формой является призма с гранью *m* (110), она присутствует на всех кристаллах. Второй наиболее распространенной формой является пинакоид *b* (010), который присутствует на большинстве кристаллов в комбинации с призмой *m*. На некоторых кристаллах пинакоид *b* развит аномально сильно, формируя уплощенные кристаллы. Эта грань наиболее плотная, обычно блестящая, параллельно ей проходит плоскость спайности. Для грани *b* характерно образование ступенчатых наростов (рис. 3, 4). Третьей распространенной формой является пинакоид *c* (001). Эта грань также присутствует на всех удлиненных призматических кристаллах, а на некоторых короткостолбчатых кристаллах грань *c* развивается аномально сильно. Наименее развита грань призмы *r* (201), она часто развивается асимметрично, особенно на удлиненных кристаллах. Активное развитие грани *r* наблюдается в уплощенных кристаллах с развитой гранью *b*.

Кристаллы ставролита располагаются в мусковит-кварцевом субстрате совместно с плагиоклазом, кианитом и ильменитом. Большая часть кристаллов «плавают» в кварцевом субстрате, ориентировка их в основном хаотическая, рост во все стороны, особенно по удлинению. Вместе с тем, присутствуют группы кристаллов вдоль тектонических трещин, ориентированные поперек сланцеватости в виде щеток, рост которых происходил от трещин в кварцевый субстрат, подобно друзам.

Для кристаллов ставролита характерно двойникование. Двойники составляют около 20 % от общего количества кристаллов. Преобладают двойники по плоскости (231), реже по (031) и тройники по (231), которые ранее в справочниках не отмечались. Двойникование характерно для призматических кристаллов с наиболее развитыми гранями *m* (110) и *b* (010).

Кристаллы ставролита обладают четко выраженной зональностью. Большая часть крупных кристаллов всех форм имеет трехзонную структуру зональности. Первая зона представляет однородный зародыш с густой криптокристаллической вкрапленностью кварца, по форме часто сходный со структурой песочных часов. Вторая и третья зоны обрастают зародыш и обладают тонкой внутренней неоднородностью, вызванной неравномерным распределением включений и, вероятно, колебаниями химического состава. Наряду с крупными трехзонными кристаллами в сланцах присутствуют мелкие кристаллы с одной или двумя зонами роста, в которых отсутствует зародыш.

Морфология кристаллов и двойникование в значительной мере определяется ориентировкой кристаллов относительно сланцеватости вмещающих пород. Наиболее благоприятна для роста призматических кристаллов и их двойникования ориентировка, согласующаяся со сланцеватостью.

### Список литературы

1. Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. Геологическое строение, кристаллические сланцы и кианитовые руды. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 321 с.
2. Валиев Ю.Я., Иброхим А., Мирзоев Б.М. Минералы Зап. Памира – новый вид сырья для производства алюминия // Горный журнал. 2008. № 11. С. 28-31.
3. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львов. гос. ун-та, 1961. 284 с.
4. Кривонос В.П., Панов Б.С., Полуновский Р.М. и др. Новая сырьевая база ставролита на Украине // Разведка и охрана недр. 1987. № 12. С. 28-32.
5. Минералы. Справочник. Том 3, вып. 1. М.: Наука, 1972.
6. Панов Б.С., Панов Ю.Б. Современное состояние и некоторые перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Донецкой области на период до 2020 г. <http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/ggeo/fenyushina/ind/panov2.htm>
7. Попова Б.С., Полуновский Р.М., Кривонос В.П. Ставролит – новый прогрессивный вид горно-металлургического сырья. Тез. докл. к VIII съезду ВМО. С.-Петербург, 1992.
8. Свяжин Н.В. Ставролит из россыпей прииска Светлого на Ю. Урале // Матер. по геологии и полезным ископаемым Урала. Вып. 26. М.: Гостеолтехиздат, 1956. С. 115-119.

9. Соколов Ю.А. Ставролит с ЮВ берега оз. Увильды // Матер. по геологии и полезным ископаемым Урала. Вып. 26. М.: Госгеолтехиздат, 1956. С. 122-124.
10. Термо- и барометрия метаморфических пород. Л.: Наука, 1977. 207 с.
11. <http://geo.web.ru/druza/l-Keivy.htm>

## ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ОБОГАЩЕНИЯ КИАНИТОВЫХ РУД КАРЕЛИИ

Л.С. Скамницкая, Т.П. Бубнова  
Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

Изучение вещественного состава и обогатимости кианитовых руд Карелии начинались в 1930-е гг. параллельно с геологоразведочными работами кианитсодержащих гнейсов Беломорского района – Беломорская группа (разъезда Уда, Слюдяного Бора, 17-го шлюза ББК, Кузострова) и Шуерецкий (Тербеостров, Кислячиха, Еловый наволок) куст [22, 24, 28]. Вещественный состав гнейсов Беломорского и Шуерецкого кустов представлен смесью минеральных компонентов, содержание которых колеблется в широких пределах. Породообразующими являются кварц, биотит, амфибол, кианит, гранат, полевой шпат, поэтому уже на начальном этапе изучения они рассматривались как комплексные. По современной оценке кианитсодержащие гнейсы являются бедной кианитовой рудой, но в 1930 г. содержание кианита в 6-7 % считалось промышленным (табл. 1). Кианит в рудах представлен сравнительно крупными удлиненными кристаллами серого цвета, нередко с зеленоватым оттенком, неравномерно вкрапленными в основную биотито-кварцевую массу. Длина кристаллов часто достигает нескольких см при ширине 8-10 мм и толщине в несколько мм. Под микроскопом в кристаллах кианита наблюдается различной густоты вкрапленность овальных зерен кварца размером 0,01-0,5 мм. В одних случаях вкрапленность кварца в кианите равномерна, в других – скапливается в отдельных участках. Содержание кварца в кианите колеблется от 4 до 40 %. Кроме кварца в кианите отмечаются чешуйки биотита размером 0,1-0,4 мм, располагающиеся вдоль продольных трещин спайности кристаллов кианита. Из других минералов в кианите обнаружен рутил в виде мелких столбиков (0,1-0,3 мм) и агрегатами мелких кристаллов, а также кристаллы граната, крупностью 0,3-0,4 мм.

Таблица 1. Сводная таблица запасов кианита по месторождениям Шуерецкого куста [11].

Месторождение	Категория запасов, тонн		Кианита в рудах, тонн	Итого, тонн
	В	С		
Тербеостров	18490	18490	1530	38510
Кислячиха	25770	(85920) - ниже уровня моря	-	25770
Еловый наволок	970	-	220	1190 (111690)
Итого	45203	18490 (104410)	1750	65470 (177160)

Обогатимость кианит-гранатовых гнейсов месторождений Шуерецкой группы предварительно изучалась Гинццветметом и более полно Институтом «Механобр». Наиболее детально технологически оценено Тербестровское месторождение [22]. Испытания обогатимости породы, выполненные по схеме, включающей концентрацию на столе, электромагнитную сепарацию и флотацию, показали возможность получить кианитовый концентрат с содержанием кианита 90-91 % при выходе около 6 % и извлечении около 80-81%. В качестве флотационных реагентов использовалась олеиновая кислота в растворе с керосином, NaOH или растворимого стекла. Дополнительная обработка на концентрационном столе магнитных продуктов электромагнитной сепарации позволила получить гранатовый концентрат с содержанием граната около 85 % при выходе 6-6,5 % и извлечения граната 80-81 %. Химический состав кианитовых концентратов показали содержание в них (%): SiO<sub>2</sub> 36,06-36,71; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 54,94-57,31; TiO<sub>2</sub> 2,09-2,46.

С 1946 г началось геолого-технологическое изучение кианитовых руд, расположенных в северной части Республики Карелия в пределах Хизоваарской свиты, а позднее внимание привлекли высокоглиноземистые гнейсы Чупинской свиты. [4, 5, 15, 17]. Минеральный состав высокоглиноземистых гнейсов, развитых в районе оз. Слюдозеро, Варацкое, Лоухское (Лоухский-н), довольно выдержанный, содержание кианита в них колеблется от 5 до 10 %, и редко достигает 13 % (табл. 2). Структура основной массы крупнозернистая. Кианит крупный (2×4мм) призматический синего, голубого, белого цвета, иногда с включениями игольчатого рутила [6].

Таблица 2. Минеральный состав гнейсов Чупинской свиты.

Минералы	Объект				
	Запарная губа	Малиновая Варакка, 11 горизонт	оз.Варацкое	Тедино	Западная Плотина
Гранат	11,7 - 14,2	19,5	18,3	16,3	6,1
Кианит	10,8 - 12,8	8,6	12,8	9,0	10,8
Кварц	23,9	37,7	29,1	29,2	52,2
Плагиоклаз	30,30- 33,3	10,0	17,3	16,8	5,2
Биотит	11,9 - 22,2	23,9	21,2	28,0	25,4
Рутил	0,5	0,3	0,8	0,1	ед
Прочие	Менее 0,5	0,8	0,5	0,6	1,0

При обогащении по магнито-гравитационной схеме материала крупностью 1,25-0 мм получен кондиционный кианитовый концентрат при высоких технологических показателях (табл. 3, 4).

Таблица 3. Технологические показатели обогащения.

Наименование продуктов	Запарная губа	Слюдозеро, скв. 2	Малиновая Варакка, гор. 11	оз. Варацкое	Тедино
Кианитовый концентрат	12,6	13,7	10,3	13,2	9,9
Кварц-полевошпатовый продукт	50,6	30,0	42,7	45,4	42,9
Биотит	16,0	3,1	18,0	15,0	20,3
Гранат	12,9	25,7	20,1	18,6	17,0
Хвосты обогащения	7,9	8,8	8,9	8,8	9,9
Исходная руда	100	100	100	100	100

Таблица 4. Химический состав кианитового концентрата.

Объект	Содержание, %												
	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	п.п.п.	Сумма
Запарная губа	37,0	0,04	60,86	0,93	0,24	0,002	0,50	0,42	0,03	0,09	0,12	0,39	99,78
Слюдозеро, скв. 2	37,63	0,025	61,84	0,132	-	0,002	-	0,11	0,03	0,06	0,03	0,23	100,09
Малиновая Варакка, гор. 11	37,05	0,35	60,78	0,65	0,14	0,01	0,14	0,40	0,24	0,11	0,16	0,24	100,27
оз. Варацкое	37,97	0,98	59,52	0,27	0,36	0,01	0,16	0,06	0,09	0,13	0,26	0,16	99,97
Тедино	37,97	0,11	60,48	0,20	0,12	0,01	0,07	0,02	0,07	0,10	0,32	0,03	99,50

Наиболее полно в Карелии изучены кианитовые руды в пределах Хизоваарского рудного поля. Продуктивные породы представлены метаморфическими, метасоматическими и метаморфогенно-метасоматическими типами (табл. 5) и отличаются составом и текстурно-структурными особенностями [14].

Таблица 5. Типизация продуктивных пород Хизоваарского рудного поля.

Генетический тип	Участок	Тип руды	Минеральный состав					
			кианит	кварц	слюды	пирит	рутил	графит
Метаморфогенный	Сев. линза	Кианит-биотитовые, графитизированные гранат-кианит-биотитовые сланцы	18-24	63-78	0.5-2	0-1	< 0.3	0.03-0.5
Метасоматический	Фукситовый участок Вост. участок	Гранат-кианит-ставролит-биотитовые сланцы	17-25	50-80	1-21	-	< 0.1	1-3
Метаморфогенно-метасоматический	Ю. линза	Кианитовые кварциты и сланцы	23-49	32-60	0.5-2	1-14	0.2-0.3	ед. зн

Изучение обогатимости кианитовых руд Хизоваарского месторождения проводились в разные годы рядом научно-исследовательских институтов: «Механобр», «Гипроникель», ИГ КарНЦ РАН, ГИ КНЦ РАН, ОМЭ СЗТУ и другими организациями. Исследования выполнялись в лабораторном и опытно-промышленном масштабе [7]. По составу изученные на разных стадиях руды представлены балансовыми и забалансовыми, отдельными генетическими типами, их смесями в разных соотношениях, неизменными и подвергнутыми вторичным процессам (графитизация), пиритизированные разновидности, а также разубоженные вмещающими породами. Пределы колебаний содержания  $Al_2O_3$  в изученных рудах от 9 до 38 %. В процессе анализировались возможные варианты технологических схем обогащения, различные методы обогащения и типы флотационных реагентов. В отдельных случаях нарабатывались опытные лабораторные и полупромышленные партии кианитовых концентратов для оценки их пригодности в производстве огнеупоров.

Наиболее изученными в технологическом отношении являются метаморфогенно-метасоматические кианитовые руды Ю. линзы, относящиеся к перспективному промышленному типу. На этом участке выделены три разновидности: светлые кварц-кианитовые, лучистые кварц-кианитовые сланцы (рис. 1-в); крупнозернистые биотит-кианитовые и амфибол-кианитовые гнейсы. Содержание кианита имеет значительные колебания – от 10 до 46 %. Игольчатый кианит (рис. 1 а, б) составляет 91 % всего объема кианита, в отличие от руд метаморфических и метасоматических, где кианит имеет таблитчатый и призматический габитус (рис. 1г). Среднее содержание кианита в этих рудах составляет 20 % (содержание кианита ниже 13 % считается непромышленным).

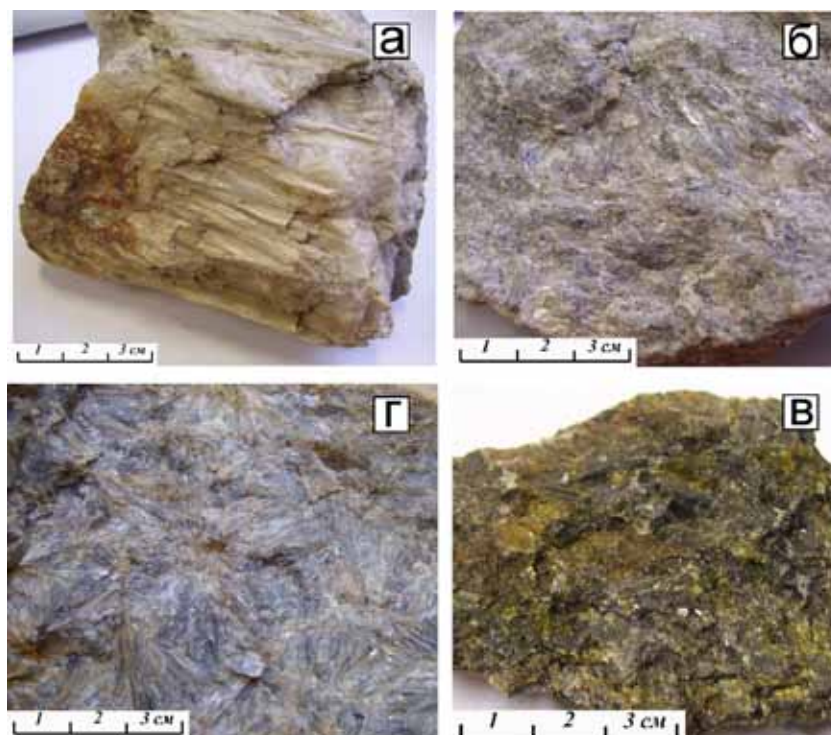


Рис. 1. Морфология кианита в кианитовой руде: а, б – крупно- и мелкозернистый игольчатый; в - радиально-лучистый; г – таблитчатый.

Первые опыты по обогащению кианитовых руд выполнены институтом «Механобр» в 1940-41 гг. [7, 18]. Исследована обогатимость двух проб светлых кварц-кианитовых сланцев с содержанием 19,86 и 20,76 %  $Al_2O_3$  и двух проб лучистых кварц-кианитовых сланцев, содержащих 33,24 и 38,0 %  $Al_2O_3$ . Разработанная схема обогащения (рис. 2а) включала измельчение до 50 % класса – 0,074 мм, обесшламливание по классу 30 мкм, удаление сульфидов в голове процесса с использованием бутилового ксантогената и флотацию кианита в содовой среде олеиновой кислотой. Кианитовый концентрат из светлых кварц-кианитовых сланцев, содержал 55,5-56 %  $Al_2O_3$  при извлечении  $Al_2O_3$  ~ 70 %, из лучистых – 58 %  $Al_2O_3$  при более низком извлечении 55-70 %  $Al_2O_3$ .

Для уточнения разработанной схемы и режимов обогащения, полученных при лабораторных исследованиях в 1941 г. на Ловчорритовой обогатительной фабрике в г. Кировске, в течение трех месяцев проводились испытания обогатимости кианитовой руды [18]. Промышленные ис-

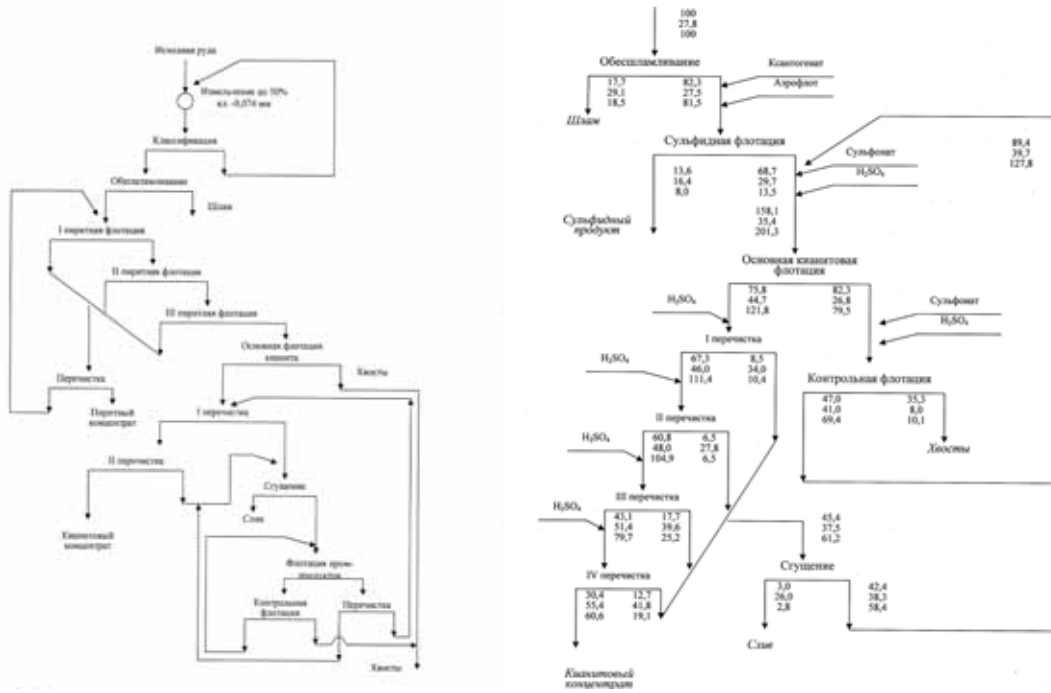


Рис. 2. Схемы обогащения кyanита: слева – разработанная институтом «Механобр» в 1940-1941 гг., справа – на опытно-промышленной установке Горного института КНЦ РАН.

пытания подтвердили возможность успешного обогащения светлой и лучистой разновидностей кyanитовых руд. Были получены концентраты, содержащие 55,5 %  $Al_2O_3$  из светлых и 57 %  $Al_2O_3$  из лучистых разновидностей. Извлечение  $Al_2O_3$  составило 79 и 82 % от питания флотации. Кроме того, при работе на Ловчорритовой фабрике была значительно упрощена технологическая схема за счет отказа от операций обезшламливания и доводки промпродуктов в отдельном цикле. В 1949-1950 гг. институтом «Гипроникель» проведена пробная добыча кyanитовой руды Ю. линзы (2840 т кварц-кyanитовых сланцев), из которой на Полевской ОФ на Урале по флотационной схеме института «Механобр» наработано 576,65 т кyanитового концентрата со средним содержанием  $Al_2O_3$  57-58 % [7]. Институтом огнеупоров в 1950 г. из этой же пробы получен концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  57,17 % и испытан в заводских условиях в качестве высокоглиноземистых огнеупоров.

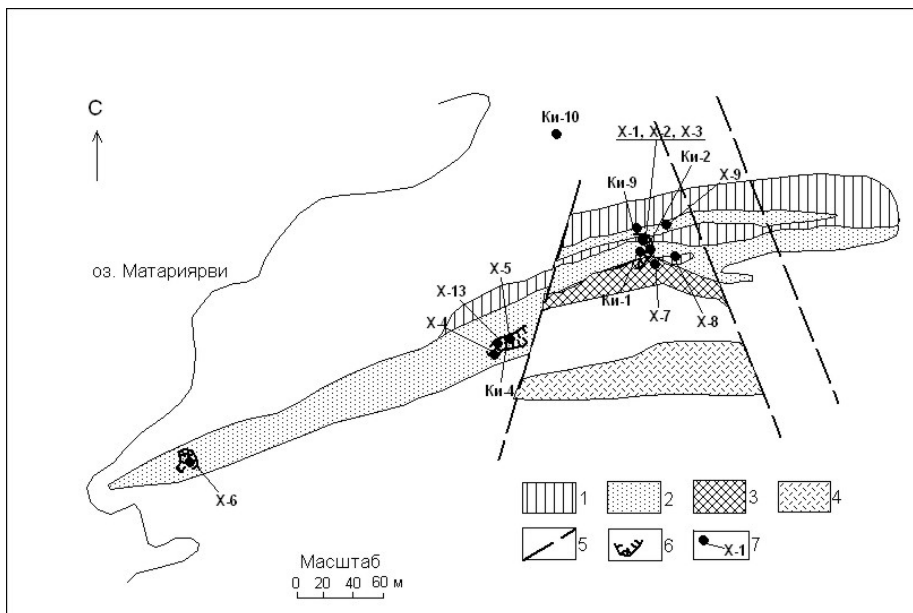


Рис. 3. Схема опробования Ю. линзы. 1 – биотит-кyanитовый гнейс; 2 – мелкозернистый кварц- кyanитовый сланец; 3 – мелкозернистый двуслюдяно-кyanитовый гнейс; 4 – гранатовый амфиболит; 5 – тектонические нарушения; 5 – карьер; 6 - точки отбора проб.

В результате разведки в 1952-1953 гг. [16] установлено, что в промышленных рудах Ю. линзы количественные соотношения между породообразующими минералами весьма непостоянны. Распределение кианита в породе крайне неравномерное – содержание колеблется от 8 до 46 %. Максимальное скопление тяготеет к лучистым разновидностям. Пирит в породе развит в виде мелких кристалликов и распределен также неравномерно. Содержание его в различных частях рудного тела колеблется от 0,12 до 14 %. Максимальное обогащение пиритом наблюдается в западной части Ю. Линзы, где в отдельных мелких пропластках количество его достигает 35 %. Следует отметить, что во всех испытаниях значительно пиритизированные кианитовые руды оставались вне зоны технологических исследований.

Институтом геологии КарНЦ РАН с 1975г. на стадиях ревизионо-опробовательских работ были оценены все разновидности кианитовых руд (в т.ч. сильно пиритизированные, относимые к забалансовым) по трем карьерам и опробовательским канавам [14] (рис 3).

Важным этапом стали испытания обогатимости смешанной руды на пробе в 40 т на опытно-промышленной установке Горного института производительностью 500 кг/час (по договору о содружестве между Карельским и Кольским НЦ РАН). По составу технологическая проба характеризовалась следующими содержаниями минералов, вес. %: кианит 41 (26,8 %  $Al_2O_3$ ); кварц + полевой шпат 52,4; сульфиды 6,1; рутил 0,5. За основу была принята технологическая схема, разработанная институтом «Механобр», но с использованием новых реагентов [25]. Флотация кианита осуществлялась высокомолекулярным сульфонатом в кислой среде при pH 3,5-6,0, создаваемой серной кислотой. Высокая селективность действия сульфоната по отношению к кианиту исключает применение депрессора сопутствующих минералов, что значительно упрощает реагентный режим флотации. Партия кианитового концентрата (табл. 6) весом 10 т наработана по технологической схеме, приведенной на рис. 2, справа.

Таблица 6. Химический состав руды и концентрата.

Продукт	Содержание, % по массе								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	ппп	S
Руда	62,00	0,84	26,80	5,65	0,39	0,35	0,60	1,48	3,95
Концентрат кианитовый	39,22	1,29	56,67	0,62	0,45	0,63	0,19	0,89	0,18

Использование современных реагентов (аэрофлот, сульфонат) позволило упростить технологическую схему института «Механобр» на стадии разведки месторождения при сохранении качественно-количественных показателей обогащения. На основе полученного концентрата в ИХТРЭМС КНЦ РАН разработаны и испытаны огнеупорные муллитциркониевые и муллитокремнеземистые порошки [27]. Выяснение возможности получения кондиционных кианитовых концентратов из других разновидностей руд, в том числе и графитизированных, проведено на малых лабораторных пробах в Институте геологии КарНЦ РАН в 1987 г. [8, 14]. Для исследований были отобраны лабораторные технологические пробы, различающиеся вещественным составом и характером кристаллизации кианита. Пробы представляли все генетические типы кианитовых руд Хизоваарского рудного поля [5, 9, 14]. Обогащаемость кианитовой руды по генетическим типам иллюстрируется рис. 4. Технологическая классификация кианитовых руд месторождения Хизоваара дана в табл. 7.

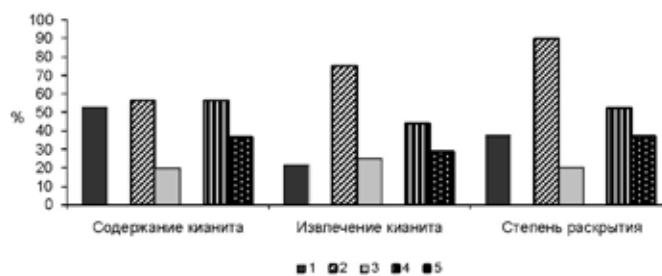


Рис. 4. Характеристика технологических свойств генетических типов кианитовых руд: 1 – метаморфогенные; 2 – метаморфогенно-метасоматические; 3 – метаморфогенно-метасоматический графитизированные; 4 – метасоматические неизмененные; 5 – метасоматические графитизированные.



Таблица 7. Классификация кианитовых руд месторождения Хизоваара.

Генетический тип	Участок	Характеристика кианита				Результаты обогащения, %	
		Габитус кристаллов кианита	Преобладающий размер вкрапленности кианита	Класс раскрытия кианита	Свободные зерна кианита, %	Содержание кианита в концентрате	Извлечение кианита
Метаморфогенный	Сев. линза	Таблитчатые и призматические	20×50	0,1-0,071	30-45	52-53	20-23
Метаморфогенно-метасоматический	Ю. линза	Игольчатый, лучистый, призматический	0,5×7	0,16-0,1	85-95	56-57	74-77
			0,5×7	0,1-0,071	15-25	12-27	46-34
Метасоматический	Фукситовый	Призматический	0,5×0,6	0,16-0,1	45-60	56-57	38-60
	Восточный	Призматический	0,5×0,6	0,1-0,071	30-45	26-48	18-40

В совместных работах Института геологии КарНЦ РАН с ВИАМ (Москва) в 1988-1990 гг. выполнено определение необходимой глубины обогащения кианита с наработкой опытной партии кианитового концентрата на базе ОМЭ СЗТГУ (Красное Село) на пробе в 400 кг. Оптимальная крупность измельчения, обеспечивающая наиболее полное раскрытие сростков, составила 45-47 % класса < 0,074 мм. По схеме, включающей флотацию сульфидов, кианитовую флотацию с перечистками, наработана опытная партия кианитового концентрата для отраслевых испытаний в авиационной промышленности (табл. 8). Установлен предел обогатимости кианита по кварцу 1,5 %. По результатам испытаний концентрата различного качества разработана технология изготовления литейных керамических форм по выплавляемым моделям [13].

Таблица 8. Характеристика концентратов различной степени обогащения.

Оксиды,	Содержание, % по массе.					
	Руда	Количество перечисток концентрата				
		1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	59,22	48,44	46,28	43,12	40,28	37,20
TiO <sub>2</sub>	0,77	1,08	1,08	1,04	1,06	0,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,42	48,45	51,59	54,66	57,57	60,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,79	0,37	0,22	0,35	0,12	0,23
FeO	0,79	0	0,10	0	0	0
MnO	0,006	0,03	0,04	0,06	0,01	0,01
MgO	0,1	0,2	0,1	0,40	0,1	0
CaO	0,70	0,41	0,35	0,56	0,35	0,63
Na <sub>2</sub> O	0,30	0,06	0,03	0,05	0,03	0,06
K <sub>2</sub> O	0,19	0,07	0,06	0,11	0,06	0,10
H <sub>2</sub> O	0,19	0,10	0,05	0,12	0,05	0,20
ппп	2,72	0,2	0,1	0,39	0,10	0,60
Сумма	100,12	100,41	99,87	99,87	99,73	98,75
S	2,45	0,2	0,16	0,18	0,03	0,1
SiO <sub>2</sub> , св	48,54	20,00	15,00	10,00	7,50	1,5
Вес концентрата, кг		1	1	1	10	1

В 1997 г. норвежская компания Minpro Strassa по договору с ООО «ИМК» провела испытания кианита Хизоваарского месторождения с целью определения рыночного уровня продукта. По технологии, включающей поцикловую трехстадийную флотацию сульфидов, слюды и кианита, был получен концентрат с содержанием 60 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 37,1 % SiO<sub>2</sub>, 0,27 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO, 1,4 % TiO<sub>2</sub>, 0,05 % S. Испытания на огнеупоры, давшие положительный результат, проведены в испытательной лаборатории материалов норвежской компании Elkem. Данные по выходу и извлечению кианита опубликованы не были [29]. В 1998 г. ООО «ИМК» на опытной установке ОАО «Апатит» проведена наработка кианитового концентрата из руды, отобранной на центральном карьере

Ю. линзы для укрупненных технологических исследований по получению противопригарных покрытий. Было наработано 23 т кианитового концентрата, упакованного в контейнеры. Характеристика кианитового концентрата по каждому контейнеру дана на рис 6. Гранулометрический и минеральный состав кианитового концентрата по фракциям приведен в табл. 9.

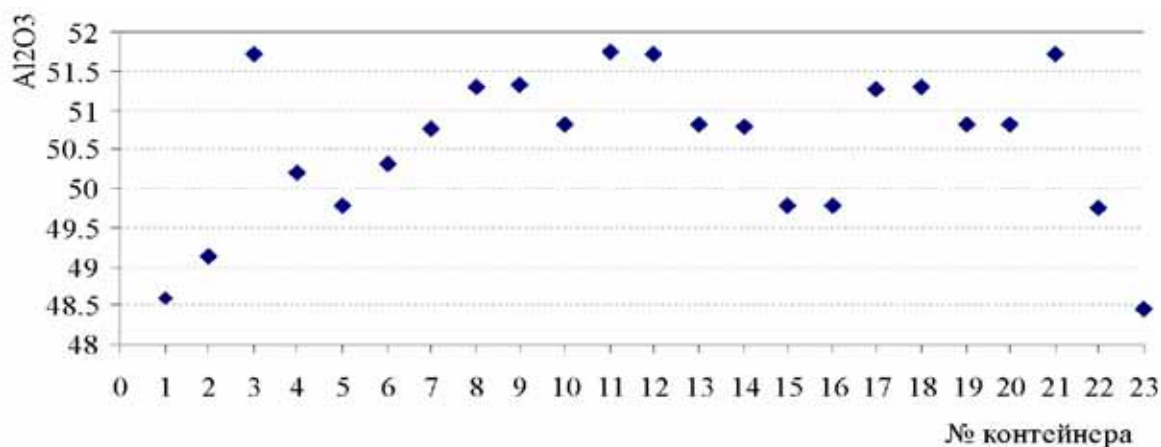


Рис. 5. Содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в кианитовом концентрате по контейнерам.

Таблица 9. Гранулометрический и средний минеральный состав партии кианитового концентрата.

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание минералов, % по массе.								
		кианит	кварц	рутил	апатит	пирит	роговая обманка	слюда	гранат	эгирин
+0,2	0,31	77,5	11,41	1,2	0,44	2,87	ед	1,29	2,65	1,92
0,2-0,16	3,4	91,20	4,20	0,63	0,42	1,14	0,30	0,61	0,84	0,25
0,16-0,1	17,08	91,50	4,0	1,60	1,4	0,3	0,40	0,30	0,4	Ед
0,1-0,071	24,9	87,16	4,35	4,35	1,50	0,15	0,77	0,91	-	0,4
0,071-0,05	27,04	78,90	12,60	4,50	2,40	0,2	0,8	0,3	ед	ед
-0,05	27,23	80,00	10,00	7,0	1,00	1,00	1	0,3	ед	ед
Итого	100	82,97	9,07	4,50	1,55	1,06	0,33	0,465	0,1	0,11

Приведенные данные показывают наличие технологического загрязнения кианитового концентрата минералами, не принадлежащими данному комплексу пород (апатитом, ромбическим амфиболом, эгирином). При этом конечный концентрат был микронизирован до крупности, исключающей его доочистку механическими методами обогащения (флотация, гравитация, сепарация и др.). Учитывая экономическую целесообразность применения при промышленном выпуске кианитового концентрата реагентов местного производства, в соответствии с Республиканской целевой программой «Освоение недр и развитие горнопромышленного комплекса Республики Карелия на 2000-2010 гг.» [12, 26] в 2001 г. ИГ КарНЦ РАН проведены экспериментальные исследования по совершенствованию реагентного режима флотации кианита. Был выполнен комплекс технологических исследований по изучению возможности флотации кианита талловыми маслами, выпускаемыми на Сегежском ЦБК. По данным экспериментов [3, 19] при расходе омыленного талового масла 750-900 г/т и крупности питания 40-55 % класса -0,071 мм получены кианитовые концентраты, содержащие 53,7-60,2 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при сквозном извлечении Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 61,9 %.

Вредной примесью в кианитовом концентрате является титан, связанный в основном с тонкими включениями рутила (рис. 6). Селективное разделение рутила и кианита – наиболее сложная задача в технологии обогащения кианитсодержащих руд в связи с близостью их адсорбционных и флотационных свойств по отношению к ряду оксигидрильных собирателей. Флотация кианита сульфонатом в кислой среде также не обеспечивает высокой степени очистки концентрата от рутила. При флотации кианита мылом дистиллированного талового масла рутил практически полностью извлекается в пенный продукт вместе с кианитом, как в свободном виде, так и в сростках [1, 2].

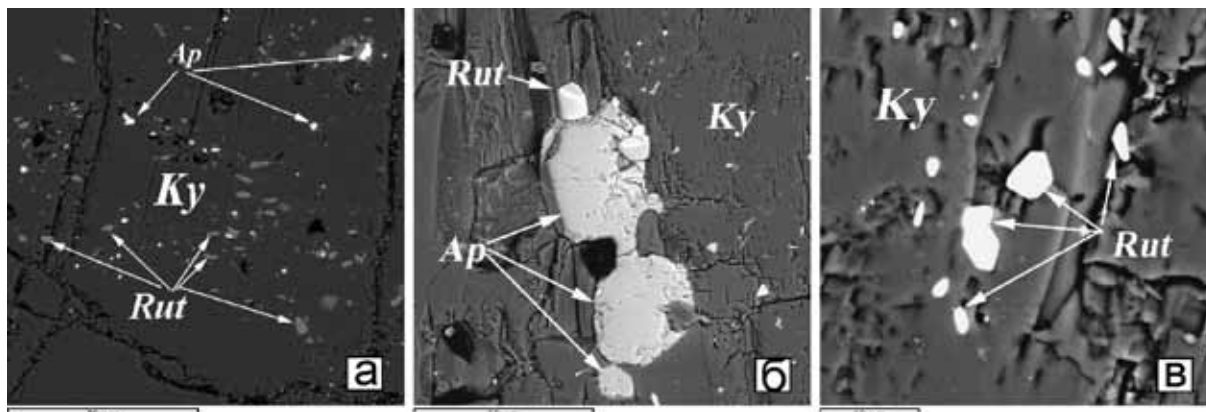


Рис. 6. Включения в кианите, где Ky – кианит; Rut – рутил; Ap - апатит.  
Изображение выполнено на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU.

Исследованиями ИГ КарНЦ РАН [20] показано, что достаточно эффективным способом очистки кианита от рутила является ультразвуковая обработка с последующим обесшламливанием. Условия ультразвуковой обработки определены экспериментально. Установлено, что температура пульпы и pH среды не оказывают существенного влияния. При воздействии ультразвуком происходит частичное раскрытие зерен кианита и наиболее крупные микровключения рутила, расположенные вдоль трещин спайности, высвобождаются. Кианит очищается от пленок и становится более прозрачным. Ультразвуковую обработку пульпы целесообразно проводить перед обесшламливанием, что позволяет удалять высвободившиеся зерна рутила со сливом крупностью 40 мкм, за счет чего содержание рутила в концентратах снижается до 0,7-1,1 %.

В 1995 г. группой специалистов Института геологии КарНЦ РАН в сотрудничестве с исследовательским персоналом фирмы «Partek Industrial Minerals» (Финляндия) проведены испытания по обогащению кианитовой руды Хизоваарского месторождения (проба X-13) в лабораторных условиях на оборудовании и с реагентной рецептурой, используемой на предприятиях фирмы. В качестве реагента-собирателя селективного по отношению к рутилу испытаны три реагентные рецептуры, представляющие смесь следующих реагентов. Рецепт 1: Hotinor SM-15-200 г/т, Flotinator SM-35-400 г/т, Flotinator FS-2-150 г/т. Рецепт 2: Hostaphat MDAH-400 г/т, Hostapur SAS-30-20 г/т. Рецепт 3: Ное F2875-130 г/т, Hostaphat MDAH-40 г/т. Наиболее эффективен режим № 3, обеспечивающий практически полное удаление свободного рутила.

В 2007 г. по договору с ОАО «Гранит» выполнены исследования по разработке комплексной технологии получения кианитового, сульфидного и кварцевого концентратов [19]. При этом ранее разработанный реагентный режим с использованием местных реагентов уточнен при укрупненных испытаниях в замкнутом цикле. Проба отобрана в центральном карьере (аналог X-13). Минералогическая характеристика пробы, показатели обогащения и качество концентратов даны в табл. 10-13.

Позднее в сферу научных исследований Института геологии КарНЦ РАН попали гранатосодержащие гнейсы с высоким содержанием кианита (Уни-Ярви, Зап. Плотна, Высота 181 и др.) и мусковитсодержащие кварциты месторождения Вост. Хизоваара (Межозерное) [6, 11]. В качестве одного из возможных источников кианита на территории Карелии в 2000-2009 гг. изучены кварц-мусковитовые метасоматиты (мусковитовые кварциты и сланцы) месторождения Вост. Хизоваара (Межозерное). Здесь подсчитаны запасы сопутствующего кианита, который может быть извлечен попутно с мусковитом. Запасы кианита составляют 297 тыс. т. [11]. Это мелко-, среднезернистые рассланцованные породы с содержанием кианита до 13,6 % (табл. 14). Для кианита характерны удлиненные до 1,5-2 мм иголки и пластинки (0,3-0,45 мм), с микровключениями кварца, турмалина, слюды, сульфидов. Значительная часть зерен кианита представлена более мелкими (0,03-0,1 мм) бесцветными зернами, иногда образующими скопления среди зерен кварца (рис. 7).

Таблица 10. Минеральный состав исходной пробы, % по массе.

Кианит	Кварц	Пирит	Пирротин	Слюда	Рутил	Андалузит	Прочие
38,63	47,83	4,31	0,03	5,8	1,17	0,03	2,2

Таблица 11. Технологические показатели обогащения.

Продукт	Кианитовый концентрат	
	Выход, %	Содержание $Al_2O_3$ , %
Черновой кианитовый концентрат	47,44	40,72
Товарный кианитовый концентрат	28,53	57,34
Кварц предварительной стадии обогащения	43,95	5,27
Сульфидный продукт	6,66	2,71
Шлам	19,79	31,38
Исходная руда	100	25,05

Таблица 12. Химический состав кианитового концентрата.

Оксиды	Содержание, % по мас-се
$SiO_2$	38,26
$TiO_2$	1,84
$Al_2O_3$	57,34
$Fe_2O_3$	0,90
MnO	0,014
MgO	0,22
CaO	0,60
$Na_2O$	0,11
$K_2O$	0,05
$H_2O$	0,19
ппп	0,92
сумма	100,44

Таблица 13. Качественная характеристика кварцевого продукта.

Оксиды	Кварцевый продукт до операций очистки	Кварц предварительной стадии обогащения
$SiO_2$	97,10	98,5
$TiO_2$	<0,01	0,01
$Al_2O_3$	1,98	0,65
$Fe_2O_3$	0,19	0,16
MnO	0,003	-
MgO	0,35	-
CaO	0,35	сл
$Na_2O$	0,08	0,10
$K_2O$	0,16	0,22
$H_2O$	0,14	0,05
ппп	не обн.	0,08
S	100,36	99,69
S	0,02	-

Таблица 14. Средний минеральный состав мусковитсодержащих кварцитов и сланцев.

Участок	Разновидности руд	Среднее содержание минералов, % по массе.								
		мусковит	кварц	плагиоклаз	кианит	биотит	сульфиды	турмалин	рутил	пр
Юго-восточный	Кварц - мусковитовый кварцит	20,1	52,6	13,4	7,2	1,7	4,0	0,2	0,4	0,4
Северо-западный	Кварц-мусковитовый сланец	22,20	58,60	8,1	5,3	0,15	2,5	2,65	0,2	0,3

Разработана технология обогащения (на 102 частных и 2 укрупненных пробах) гравитацией на концентрационном столе. Результаты обогащения кварц-мусковитовых сланцев крупностью 1-0,1 мм показали легкую обогатимость руды (табл. 15).

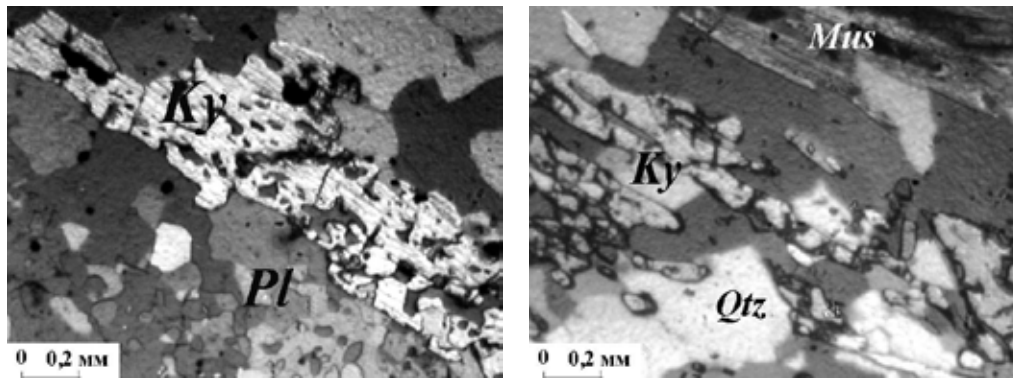


Рис. 7. Фото шлифов кианитовых сланцев, николи +.

Таблица 15. Средние результаты обогащения мусковитсодержащих кварцитов и сланцев.

Продукты обогащения	Технологические показатели, % по массе.		
	Выход	Содержание мусковита	Извлечение мусковита
Мусковитовый концентрат	18,17	98,2	84,96
Кианитовый продукт	4,14	ед	-
Кварцевый продукт	64,62	0,62	1,91
Хвосты обогащения	13,07	21,09	13,13
Исходная руда	100	21,00	100

Результаты обобщения данных по исследованию обогатимости кианитовых руд Карелии позволяют сделать следующие выводы. Кианитсодержащие руды Карелии представлены породами различного генезиса. В геологическом и технологическом плане наиболее полно изучены кианитсодержащие руды Хизоваарского рудного поля, представленные тремя генетическими типами: метаморфическим, метаморфогенно-метасоматическим и метасоматическим. К промышленному относится метаморфогенно-метасоматический тип руды, развитый на Ю. линзе месторождения, где содержание кианита колеблется в пределах 10-49 %. Разработанная технология обогащения обеспечивает получение концентратов, содержащих 55-57 % глинозема. Предел обогатимости кианита по  $Al_2O_3$  (рис. 8) соответствует 60,02 %. Сумма примесей в кианитовом концентрате за исключением гигроскопической влаги и потери при прокаливании составляет 1,72-2,47 %, из которых основная часть приходится на  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ . Значительное количество этих оксидов объясняется присутствием микроскопических включений рутила, кварца и мелких зерен пирита, имеющих микронные размеры.

#### Список литературы

1. Алексеев В.С. Теория и практика обогащения кианитовых руд. Л.: Наука, 1976. 200 с.
2. Алексеев В.С. Обогащение и переработка кианитовых руд // Обогащение руд и проблема безотходной технологии. Л.: Наука, 1980. С.133-146.
3. Вещественный состав и технологические свойства кианитовых руд Хизоваарского месторождения. Каменева Е.Е., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В. и др. // Обогащение руд. 2003. № 6. С. 17-21.
4. Волотовская Н.А., Жиров К.К. Хромсодержащие минералы свиты Хизовара // Изв. Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР. 1948. № 1. С. 41-53.
5. Геологическое и технологическое исследование кианитовых руд Хизоваарского месторождения (Сев. Карелия) и их практическое значение. Демонис И.М., Карпович Ю.Ф., Щипцов В.В. и др. // Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и СЗ СССР (Европейская часть). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1990. С. 132-135.
6. Гранатовые руды Карелии. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Скамницкая Л.С. и др. Петроза-

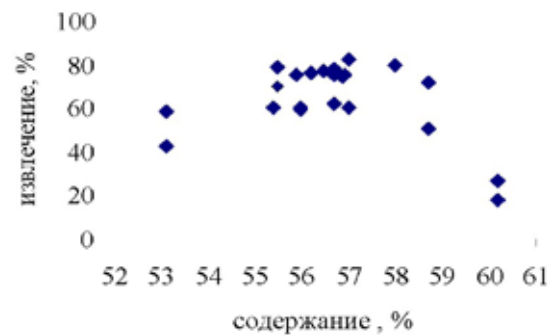


Рис. 8. Характеристика кианитового концентрата по данным многолетних исследований.

водск: Изд-во КарНЦ РАН, 2009. 208 с.

7. Данилов В.Г. Обогащение кианитовых руд // Тр. Ин-та «Механообр». Вып. 2. Л., 1957. С. 196-209.
8. Демонис И.М., Карпович Ю.Ф., Щипцов В.В. и др. Геологическое и технологическое исследование кианитовых руд Хизоваарского месторождения (Сев. Карелия) и их практическое значение // Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и СЗ СССР (Европейская часть). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1990. С. 132-135.
9. Кианитовые руды месторождения Хизоваара – перспективный вид огнеупорного сырья. Озерова Г.П., Щипцов В.В., Скамницкая Л.С. и др. // Достижение науки – народному хозяйству. М.: Наука, 1990.
10. Минеральное сырье Лоухского района. Ред. В.В. Щипцов. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1991. 192 с.
11. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2006. С. 69-71.
12. Республиканская целевая программа «Освоение недр и развитие горнопромышленного комплекса Республики Карелия на 2000-2002-2010 гг.» Петрозаводск, 2000. 38 с.
13. Суспензия для форм по выплавляемым моделям. Карпович Ю.Ф., Демонис И.А., Панина М.Е. и др. Патент № 1656761. 1993 г.
14. Хизоварское кианитовое поле (Сев. Карелия). Щипцов В.В., Скамницкая Л.С. и др. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1988. 105 с.

#### **Фондовая литература**

15. Буданов Н.Н., Жуков А.Е. Объяснительная записка к подсчету запасов кианитов в Хизоваарском месторождении. СЗГУ. 1941.
16. Быстрова Л.Г., Болотина А.И., Волотовская Н.А. и др. Отчет о геолого-разведочных работах и подсчет запасов руд кианита Хизоваарского месторождения КАССР. В 10 томах + протокол ВКЗ. 1953.
17. Волотовская Н.А. Предварительный отчет Чупинской кианитовой партии № 146. Фонды КГЭ. 1934.
18. Данилов В.Г. Испытание обогатимости кианитовых руд месторождения Хизоваара. Отчет о НИР. С-Пб, «Механообр». 1941.
19. Щипцов В.В. Исследование технологических свойств и областей использования кианита Хизоваарского месторождения. Отчет о НИР. Ин-т геологии КарНЦ РАН. 2007.
20. Отчет информационный по Чупинской кианитовой партии № 146. Чупинский и Ковдозерский районы. Фонды НГА КАССР. 35-А-УШ. 1934.
21. Отчет о работе Чупинской кианитовой партии № 146. Чупинский район, Ковдозеро. Фонды НГА КАССР. 37-А-УШ. 1934.
22. Отчет о разведке гранат-дистена за период 1930-1932. Альмандин Шуерецкого р-на. Фонды НГА КАССР. 32-А-УШ.
23. Отчет предварительный Ковдозерской геолого-съёмочной партии № 143. Кианит, Ковдозеро. Фонды НГА КАССР. 33-А-І. 1934-1935.
24. Отчет предварительный Чупинской кианитовой партии № 146. Чупа-Ковдозеро. Фонды НГА КАССР. 36-А-УШ. 1934.
25. Маслов А.Д., Гершенкоп А.Ш. Разработка и научное обоснование эффективных ресурсосберегающих технологий получения высококачественных алюминийсодержащих концентратов. Отчет о НИР. Горный институт КНЦ РАН. Апатиты, 1998.
26. Совершенствование технологии получения высококачественного кианитового концентрата и оценка инвестиционной привлекательности Хизоваарского месторождения кианита. Отчет о НИР. Институт геологии КарНЦ РАН. Петрозаводск. 2001.
27. Кононов М.Е. Технологические и физико-химические исследования процесса получения муллитциркониевой керамики. Отчет о НИР. ИХТРЭМС КНЦ РАН. 1983.
28. Токарев В.Н. Предварительный отчет о работе Удинской партии. Фонды КарНЦ. 1934.
29. Investigating kyanite from the Karelian ore in Russia. Отчет компании Elkem Materials A/S. Кристиансанд, 1998.

## КИАНИТЫ КАРЕЛИИ: ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РУДНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Щипцов В.В., Гаранжа А.В.  
Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

**Введение.** Минералы группы силлиманита могут использоваться как эффективное огнеупорное и керамическое сырье. Среди этой группы важное свойство кианита регламентируется коэффициентом расширения. Кианит превращается при 1350 °С в муллит с увеличением объема на 18 %. В то же время объем андалузита увеличивается на 5 % при 1380 °С, а силлиманита на 7 % при 1550 °С. Во многих случаях кианит перед использованием в огнеупорах плавится или кальцинируется. Сырой кианит применяют преимущественно в огнеупорах как компенсатор сжатия других ингредиентов. Его важным свойством является переход в муллит. Он состоит из соединенных кристаллов, устойчивых до 1850 °С. Его свойства определяются высокой огнеупорностью, устойчивостью к большим нагрузкам и превосходной инерционностью на высокие температуры. Дополнительные преимущества заключены в устойчивости к термальному шоку благодаря низкому коэффициенту термального расширения, удовлетворительной теплопроводности, устойчивости к химическому воздействию и абразии. История изучения кианитовых руд Республики Карелия поучительна, так как отражает эволюционный переход от оценки их использования для получения алюминия, затем – силумина и, наконец, кианит становится практически ценным индустриальным минералом, химические и физические свойства которого стали предметом внимания, в первую очередь, огнеупорной и керамической промышленности [7].

**История исследований.** Первые шаги по геологическому заключению о наличии кианитовых проявлений в Карелии были сделаны в 1929 г. Исследования проводились по заданию Совнаркома СССР в связи с поисками руд алюминия и созданием алюминиевой промышленности для развития отечественного самолетостроения. В Карелии несколько кианитовых проявлений выявлены В.С. Артамоновым, П.А. Борисовым, В.А. Токаревым, Л.Я. Харитоновым за 1929-1934 гг. (рис. 1).



Рис. 1. Кристаллы бледно-зеленоватого кианита в сланцах Тербеостровского месторождения.

Наиболее перспективными оказались проявления Хизоваарского рудного поля. Ранняя характеристика геологического строения территории дана П.А. Борисовым и Н.А. Волоотовской [1]. К настоящему времени в Республике Карелия Государственным балансом запасов учтены 9 месторождений и проявлений кианитосодержащих руд [5]: 1. Хизоваарское рудное поле (Южная, Северная и Восточная линзы), 2. Проявление Межозерное, 3. Проявление Магнетитовая Варака, 4. Месторождение Тербеостров, 5. Месторождение Еловый Наволок, 6. Месторождение Солохина Луда. 7. Проявление Кислячиха, 8. Удинское проявление, 9. Кузостровское проявление. На балансе не стоят, но могут быть выделены крупные блоки с богатыми скоплениями кианитовых пород Чупинского высокоглиноземистого парагенетического комплекса. В границах Беломорского подвижного пояса в условиях кианитового типа метаморфизма высоких давлений и средних температур кианит типичен как породообразующий минерал (рис. 2).

Этап технологических исследований середины 1980-х гг. примечателен конструктивным сотрудничеством ИГ КарНЦ РАН и ВИАМа. Главным результатом стало то, что на основе кианитового концентрата разработаны составы суспензий с использованием в качестве связующего гидролизованного этилсиликата, изготовлены образцы керамики и изучены их свойства (прочность в сыром и обожженном виде, деформации под нагрузкой, коэффициент термического расширения) [4]. Более высокие прочностные показатели кианитовой керамики в сыром и обо-

жженном виде, отсутствие температурного разупрочнения обусловлены особенностями структуры кианита и составом кианитового концентрата. Кианит из всех алюмосиликатов обладает наиболее плотной упаковкой атомов в структуре, что обуславливает большую плотность и прочность керамики. «Первичный», химически не связанный тонкодисперсный кварц, находящийся в тесном срастании с кианитом, заполняет поры, образующиеся при тепловом расширении, в особенности при муллитообразовании. Имея высокое сродство к кремнийорганическому связующему, способствует понижению температуры и интенсивности спекания, повышает плотность и, соответственно, прочность керамики на начальных стадиях обжига. Технологичность и уровень достигнутых свойств кианитового концентрата показали, что он может быть использован в качестве эффективного наполнителя суспензий для равноосного литья ответственных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на никелевой основе [6].

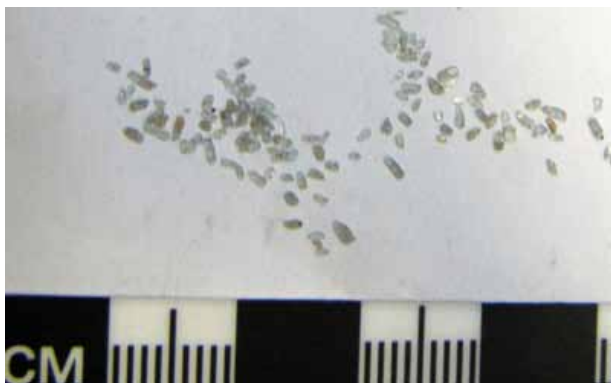


Рис. 2. Мелкие прозрачно-голубоватые зерна кианитов малинововаракского горизонта Чупинского парагенетического комплекса Беломорского подвижного пояса.

Следующий этап (начало 1990-х гг.) связан с деятельностью ООО «ИМК», получившей лицензию на освоение Хизоваарского месторождения (Ю. линза) с целью производства кианитового концентрата. Усилиями этой компании в содружестве с ИГ КарНЦ РАН продолжена технологическая оценка кианитового концентрата Хизоваарского месторождения, в результате которой ВНИИЛИТМАШ разработал ТУ на противопожарные покрытия из кианита и технологию их изготовления; ВИАМ – ТУ на кианитовый концентрат для турбинных лопаток, которые были испытаны на заводе «Рыбинские моторы». Значительный вклад был сделан по анализу спроса на рынке благодаря сотрудничеству с норвежской компанией Elkem AS. В рамках лицензионного соглашения ООО «ИМК» в 1998 г. на опытно-промышленной установке ОАО «Апатит» наработала опытную партию кианитового концентрата объемом 23 т для последующих технологических испытаний. Но в 1999 г. работы были прекращены ввиду отсутствия финансирования.

Несколько лет назад компанией «Гранит» получена лицензия на добычу кианита на Хизоваарском месторождении (Лоухский район РК). Спустя некоторое время компания ОАО «Гранит», инициатор проекта, передала свои права вновь созданной дочерней компании ООО «Кианит». Последняя разрабатывает проект промышленного освоения Хизоваарского месторождения и строительства горно-обогачительного предприятия для создания **производства кианитового концентрата и силумина**. По экспертным оценкам, перспективная потребность российских потребителей в огнеупорных материалах, которые целесообразно заменить кианитом, составляет 32,5-47 тыс. т. в год, в том числе: моторостроение (авиа-, судо-, авто-) 9-12 тыс. т; производство стекловолокна 20-30 тыс. т; производство антипригарных красок 2-3 тыс. т; производство огнеупорных изделий 1,5-2 тыс. т.

**Хизоваарское месторождение кианитовых руд.** Промышленная разведка месторождения проводилась в 1940-1941 гг. (Буданов Н.Н.) и 1952-1953 гг. (Быстрова Л.Г., Болотина А.И. и др. Отчет о геолого-разведочных работах и подсчет запасов руды и кианита Хизоваарского месторождения, Карело-Финская ССР, на 1 января 1953 г.). Утверждены в ВКЗ СССР (протокол № 8578 от 4 декабря 1953 г.) балансовые запасы кианитовых руд в контурах залежей кондиционных по содержанию кианита и вредных примесей, а также забалансовые запасы, подсчитанные как в контурах залежей кондиционных по содержанию кианита и некондиционных по содержанию вредных примесей, так и в целиках.

Хизоваарская структура является реликтовой частью Северо-Карельского зеленокаменного пояса, расположенного в зоне интенсивного проявления неархейских коллизионных процессов.



Хизоваарская свита рассматривается в составе тикшеозерской серии [7]. В ее северной части сформировались кианитовые руды, составляющие несколько проявлений, слагающих Хизоваарское кианитовое поле. В границах оцененной площади детальные работы по комплексному геологическому исследованию осуществлялись в 1980-е гг., что положено в основу геологической карты кианитового поля в масштабе 1:10000 (рис. 3). В геологическом строении площади значительную роль играют туффиты андезитов и дацитов, граувакки, метапесчаники, кремнистые туффиты, хемогенные кварциты и другие разновидности осадочно-вулканогенных и осадочных пород, связанных в той или иной степени с вулканизмом. К ним относятся (снизу вверх по разрезу): нижняя коматиит-базальтовая, дацит-андезитовая, дацит-риолитовая и верхняя коматиит-базальтовая формации. Метабазальты соответствуют толеитовым сериям, метаандезиты – образованиям промежуточных серий между толеитовой и типично известково-щелочной, метадациты и метариолиты тяготеют к известково-щелочной ветви. Подобные вещественные соотношения иллюстрируют гетерогенность пород. Преобладание в одном вулканическом цикле толеитовых серий в нижних частях разреза со сменой в верхних частях на известково-щелочные К. Конди [9] связывал со специфической закономерностью архейских зеленокаменных поясов. В конкретном случае особое значение имеют высокоглиноземистые породы. Выделены два горизонта гнейсов. Первый (нижний) высокоглиноземистый горизонт пространственно связан с андезитами и туффитами андезитового состава. Неполно проявленный процесс гидролиза по андезитам привел к некоторому уменьшению содержания полевого шпата в породе и образованию метаморфическим путем кианита. Наличие химической коры выветривания подчеркивается внешними признаками, установленными при полевых наблюдениях. К ним относятся невыдержанность мощностей и отсутствие четких литологических границ. Существование коры выветривания в андезитовой части разреза позволяет говорить о некотором перерыве между периодами андезитового и дацитового вулканизма.

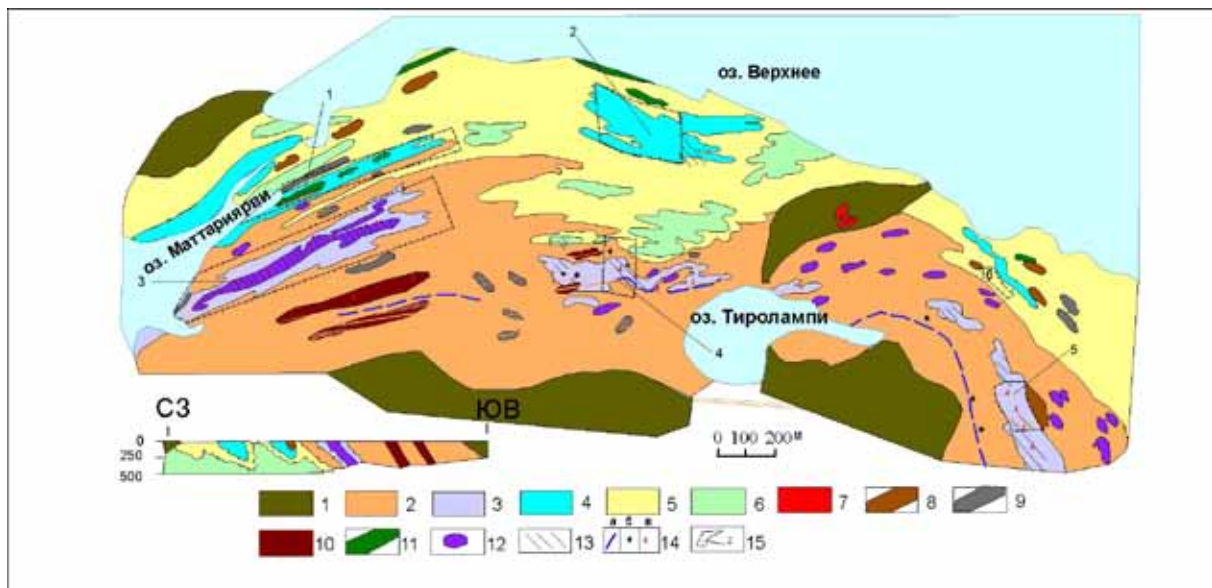


Рис. 3. Геологическая карта Хизоваарского кианитового поля. Сост. В.В. Щипцов, А.Г. Гаранжа, Т.К. Кулмала, Н.И. Щипцова [7].

1 – метабазальты; 2 – осадочно-вулканогенные и осадочные породы дацитового и риодацитового составов; 3 – верхний высокоглиноземистый горизонт; 4 – нижний высокоглиноземистый горизонт; 5 – осадочные и осадочно-вулканогенные породы андезитового и дацит-андезитового составов; 6 – метаандезиты. Дайковые комплексы: граниты (7); риодациты и дациты (8); габбро-диабазы (9); высокомагнезиальные габбро (10); габбро-амфиболиты (11). Метасоматиты: силициты (12); участки интенсивного кислотного выщелачивания (13); 14 – графит (а), магнетит (б), пирит (в); 15 – номера участков: Сев. линза (1), Вост. линза (2); Ю. линза (3), Фукситовый (4), Восточный - 2 (5).

Второй верхний высокоглиноземистый продуктивный кианитовый горизонт выделен в составе грауваккового ряда. Источником высокоглиноземистых минералов являются алюмокремнистые осадки, значительная часть которых может представлять плохо отсортированный обломочный материал нижележащих пород дацит-андезитовой формации. Андезиты, под-

вергаясь первоначальному экзогенному воздействию, претерпели последовательную эндогенную переработку и явились источником накопления глинозема. На современной поверхности амфибол-биотитовый сланец с первого взгляда имеет мало общих черт с андезитами. На генезис кианитовых руд месторождения важную роль оказали процессы регионального метаморфизма и метасоматоза. Метасоматическое рудообразование геохимически характеризуется как область фации кислотного выщелачивания и связано с регрессивными и диафорическими процессами в параметрах кианит-силлиманитовой фациальной серии повышенных давлений [2]. Выделено три активных фактора контроля: литостратиграфический, метаморфический (метаморфогенно-метасоматический) и структурный.

**Литостратиграфический фактор** отражает приуроченность интенсивного кианитообразования к метаморфитам преимущественно нижней части Хизоваарского стратиграфического разреза, где установлены два «горизонта» высокоглиноземистых сланцев. Нижний «горизонт» на основании целого ряда прямых и косвенных признаков предположительно характеризуется как продукт метаморфизма химической коры выветривания с содержанием глинозема до 24 % и выше, образованной по вулканитам андезитового состава. Подобные сланцы с содержанием в них свыше 10 % метаморфического кианита могут представлять практический интерес. Верхний «горизонт» глиноземистых сланцев входит в граувакковую часть разреза и формировался в той или иной мере за счет вулканогенных пород андезитового состава. По содержанию глинозема породы верхнего «горизонта» более бедны (18,5-21,0 %).

**Метаморфогенно-метасоматический фактор.** К настоящему времени все имеющиеся материалы позволяют говорить о многоэтапном проявлении регионального метаморфизма. В характере проявления и типе парагенезисов регрессивной стадии отражена специфика условий метаморфизма повышенных давлений. Кислотные метасоматиты Хизоваары формировались в условиях кварц-кианитовой фации метасоматоза, на что указывали В.А. Глебовицкий и С.А. Бушмин [3]. На примере участка «Ю. линза» предполагаем, что высокая активность летучих приводит к устойчивости пирита и турмалина во внутренних зонах рудного тела. Возможно пространственное совмещение разновременных метасоматических процессов. В частности, образование радиально-лучистой разновидности кианита в руде могло быть связано с наложенным метасоматизмом той же фации щелочности-кислотности.

**Структурный фактор** рассматривается на основе данных о многоэтапности развития района, а структурная локализация рудных метасоматитов отражает связь определенных фаций со структурами. Главная особенность Хизоваарского рудного поля выражена в сочетании ранней Верхнеозерской синформы с осевой поверхностью субширотного простириания при относительно пологих углах погружения и наложенной Хизоваарской синформой с крутопадающими осевыми плоскостями субмеридионального простириания. Рудные кислотные метасоматиты участка «Ю. линза» обнаруживают пространственную связь со структурами субширотного простириания и залегают согласно плоскостям сланцеватости. Образование метаморфогенных кианитовых тел происходило до стадии кислотного выщелачивания и оторвано значительным промежутком времени. В этих зонах широко развит наложенный кливаж параллельно осевым плоскостям молодых складчатых структур. Например, на участке «Фукситовый» образуется наложенная сланцеватость S3 простириания. Кварц-кианитовые ассоциации прерывисто-прожилкового типа распространены в узкой зоне наложенной складчатости и используют как новые плоскости, так и деформируемые плоскости главной структуры. Формирование субмеридиональных структур на Хизоваарской площади относится к свекофеннскому этапу. Основная обобщенная характеристика промышленных объектов Хизоваарского рудного поля дана в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика кианитовых объектов Хизоваарского рудного поля.

Месторождение	Хизоваарское		
	Южное	Восточное	Северное
Количество залежей (рудных тел)	6	1	1
Параметры залежей, м	От – до	До 150 в раздуве	
	Средняя мощность	55	15
Протяженность	950	700	500
Условия залегания: глубина, м	Более 150	-	-
Мощность наносов, м	1,0-6,0	0-15	0-5

Горно-геологические условия	Руда по крепости (шкала буримости) – VIII категория. Отработка целесообразна многоуступным карьером с оставлением целиком на неблагонадежных местах. Гидрогеологические условия относительно усложненные	Открытый способ разработки, гидрогеологические условия усложнены близостью к берегу оз. Верхнее	Открытый способ разработки, гидрогеологические условия усложнены
Состав руд	2 типа руд: первый тип – кварц 70-85 %, кианит 10-25 % (главные); мусковит, плагиоклаз, биотит, графит, тальк (второстепенные); пирит 0-10 %, пирротин, магнетит (рудные); рутил, апатит, сфен, гранат (аксессуарные); второй тип – кварц 50-60 %, кианит 10-40 % (главные); мусковит, графит (второстепенные); пирит 0-10 %, пирротин, арсенопирит (рудные); рутил (аксессуарные)	Кианит 3-23 %, кварц, полевой шпат, биотит, мусковит, графит до 5-10 %	Кианит 3-25 %, кварц, полевой шпат, биотит
Запасы, ресурсы, ед.	В+С <sub>1</sub> 2881 тыс. т (руда) P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 16378 тыс. т (руда)	P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 16000 тыс. т (руда)	C <sub>2</sub> 1556 тыс. т. (руда) P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 9153 тыс. т. (руда)
Содержание полезных компонентов	20,38-21,64 % (кианит)		20,6 % (кианит)

По состоянию на текущий период «Ю. линза» наиболее оценена на кианит с учетом проведения буровых работ по нескольким профилям в 1950-е гг. Здесь были заложены в разное время четыре опытных карьера, один из которых вскрывает залежь № 4 (рис. 4, 5). На рис. 6 показана разновидность кианитовой руды из залежи № 4, а в табл. 2 приведен химический состав кианитовой руды. В табл. 3 и 4 приводятся усредненные количественные данные химического и минерального составов кианитовых руд различных участков.

Таблица 2. Средний химический состав кианитовых руд залежи № 4 (Ю. линза), вес. %.

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	ППП	S
54.26	0.74	32.30	7.33	0.14	0.01	0.10	0.42	0.15	0.16	4.34	5.66



Рис. 4 (слева). Опытный карьер кианитовых руд (Ю. линза, залежь № 4, карьер 3).

Рис. 5 (справа). Стенка забоя карьера 3 (Ю. линза, залежь № 4)



На площади Хизоваарского кианитового поля выявлены тематическими исследованиями ИГ КарНЦ РАН в дополнение к ранее известным участки «Фукситовый» и «Восточный-2». В значительной мере кианитсодержащие образования перекрыты четвертичными образованиями. За счет проведения поисково-оценочных работ в ЮВ части Хизоваарской структуры (участки «Фукситовый» и «Восточный-2») на площади около 1 кв. км могут быть наращены запасы кианитовой руды. Большой интерес представляют кианитовые про-

Рис. 6. Длинноигольчатые сноповидные агрегаты кианита. Ю. линза Хизоваарского рудного поля.

явления на участке «Высота-181». Участок расположен к ЮЗ от месторождения «Ю. линза». На этой площади залегают комплексные руды на гранат, кианит, ставролит и мусковит (рис. 7).

Таблица 3. Средний химический состав кианитсодержащих руд Хизоваарского кианитового поля, вес. %.

Оксиды	Хизоваарское рудное поле		
	Сев. линза	Вост.-2 и Фукситовый участки	Ю. линза
SiO <sub>2</sub>	58.62	69.32	69,90
TiO <sub>2</sub>	0.92	0.97	0.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.02	18.20	20.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.69	1.88	4.16
FeO	3.41	1.38	0.43
MnO	0.08	0.07	0.01
MgO	2.61	1.67	0.31
CaO	1.92	2.83	0.63
Na <sub>2</sub> O	2.33	1.19	0.47
K <sub>2</sub> O	1.76	0.52	0.14
H <sub>2</sub> O	0.33	0.23	0.25
Ппп	2.04	1.43	2.53
Сумма	99.73	99.99	99.98
S	0.38	0.11	2.62

Таблица 4. Минеральный состав кианитсодержащих руд Хизоваарского кианитового поля, вес. %.

Минералы	Хизоваарское рудное поле		
	Сев. линза	Вост.-2 и Фукситовый участки	Ю. линза
Кианит	18-24	17-25	15-49
Кварц	63-78	50-80	32-60
Микроклин	ед. зн.	ед. зн.	ед. зн.
Слюды	0.5-2	1-21	0.5-2
Пирит	0-1	-	1-14
Рутил	< 0.3	< 0.1	0.2-0.3
Гранат	ед. зн.	ед. зн.	ед. зн.
Графит	0.03-0.5	1-3.	ед. зн
Прочие (андалузит, эпидот, ставролит, амфибол, карбонат, сфалерит, апатит)	< 1.5	< 0.1	0.5

**Кианит и мировой рынок.** На мировом рынке к кианиту предъявляются различные тре-



Рис. 7. Гранат-кианитовая порода, Высота-181.

бования, но, как правило, содержания  $Al_2O_3$  должно быть на уровне 59-60 % при минимально низких – железа и щелочей. Содержание железа не должно превышать 1 %, при этом железо должно распределяться достаточно равномерно. Железные пятна проявляют себя как катализаторы для окиси углерода, что нарушает структуру жаропрочного материала. К тому же, потребители предпочитают иметь в кианитовом продукте мало кварца, магнезия, титана и кальция. Те компании, которые обладают сертификатом ISO 9000, пройдя длинный и дорогостоящий путь, особо чутко реагируют на качественные характеристики кианита [8, 10].

Спрос на кианит разделяется по четырем областям применения: огнеупорные материалы, точное литье, цемент и сырье для синтетического муллита. Для огнеупорных материалов кианит добавляется для снижения усадки при обжиге, но кианит в огнеупорных материалах, не имеющих форм при изготовлении, может заменяться окисью алюминия или магнезита. Производство неформованных огнеупоров увеличивается как в Европе, так и в японской сталелитейной промышленности и составляет в среднем 2-3 % в год. Весь европейский рынок по применению штучных огнеупоров, включая Великобританию, Германию, Италию и Испанию, не превысит 8 тыс. т кианита в год. Кианит может быть использован в точном литье для обсыпки форм, но используют кианит в точном литье две компании: одна в Великобритании, другая в США. Обе заняты производством стального литья в авиационной промышленности, причем английская компания использует 50-60 т кианита в год. Кианит в небольших количествах находит применение при производстве жаростойкого цемента.

Покупатели кианита обращают особое внимание на присутствие в концентрате вредных примесей. К ним в первую очередь относятся оксиды щелочных металлов и железа. Оксиды железа могут вызывать коррозию и образование вздутия, что может служить одной из причин появления брака при производстве штучных огнеупоров, но в неформованных огнеупорах они не могут оказывать такое вредное воздействие на качество футеровки печей. Поставщики должны также гарантировать, что при помоле материала у потребителей до более мелкого зернового состава кианит не будет загрязняться примесями железа и других вредных компонентов. Качество поставляемого материала зависит также от зернового состава кианита. По данным фирмы Magna Industrials, содержание кварца в кианите должно быть не более 43,7 %, оксида титана от 0,52 до 1,65 %, оксидов щелочных металлов не более 0,03 %, а содержание оксида магнезия не превышать 0,01 %. Фирма Lafarge (Великобритания) рекомендует поставлять кианит с величиной зерна в пределах 3,0-5,0 мм. Требования по поставке кианитового материала должны соответствовать установленным международным стандартам. Поставки производятся разными вариантами, наиболее характерные из которых: бумажные пакеты биг-бэг 1.5 т; контейнер 1 т; бумажные мешки 50 кг и бумажные мешки 25 кг на стянутых грузовых поддонах; резервуары на 1 т; корабельные контейнеры на 20 т. Специалисты компании Elkem AS опробовали карельский кианит в составе сверхнизких цементных смесей, приготовленных на основе чистого глинозема. Не подвергнутый термообработке кианит во время обжига расширяется примерно на 18 %.

По заказу компании Elkem AS компания Roskill опросила европейских потребителей кианита. Можно сделать следующие выводы, что существуют два пути для поставок карельского кианита в Европу. Первый состоит в замене кианита там, где он используется, а второй – в замене других материалов группы силлиманита в производстве огнеупоров. Признается, что возможности продажи карельского кианита на Европейском рынке может быть реальной. При этом свойства кианита, поставляемого в Европу, должны соответствовать требованиям потребителей, а цена за тонну продукции должна быть хотя бы чуть ниже существующей.

Таблица 5. Размеры кианита, используемого в Европе.

Размер ячеек сита, меш	Остаток на сите, %
48	10,0
100	29,9
150	13,5
200	9,3
325	10,7
Менее 325	26,6

Значительный вклад был сделан по анализу спроса на рынке благодаря сотрудничеству с норвежской компанией Elkem AS. Компания Elkem AS в 1990 г. подготовила отчет по областям применения кианита Хизоваарского месторождения: для формованных и неформованных ог-

неупоров в черной металлургии, при производстве цветных металлов, в стекольной промышленности, в термообработке, в литейном производстве, при получении огнеупорного фарфора, при производстве керамических изделий, которые не подвергаются нагреву. Возможно увеличение применения кианита в санитарном фарфоре, керамической плитке при облицовке стен зданий, помещений, при подготовке форм для точного литья, для производства электрического фарфора и фильтров.

**Заключение.** Хизоваарское месторождение кианитовых руд относится к промышленной сырьевой базе высокоглиноземистых пород России. Объект наиболее подготовлен к освоению. ООО «ИМК» (бывший владелец лицензии) производило опытную добычу кианитовой руды в карьере Ю. линзы Хизоваарского месторождения. При сравнительных испытаниях в ВИАМе (Москва) установлено, что керамические формы из карельского кианита для литья турбинных лопаток самолетных и ракетных двигателей после обжига при температуре 1060 °С обладают достаточной прочностью, превосходя в три раза прочность подобных материалов, где использовался украинский кианит-силлиманит. В настоящее время российские потребители применяют дорогостоящие огнеупоры отечественного производства с использованием электрокорунда, карбида кремния и циркона. В то же время, карельский кианит может обеспечить огнеупорную промышленность России.

#### Список литературы

1. Борисов П.А., Волотовская Н.А. Хизоваарское месторождение кианита, КФ ССР // Сов. геол. 1941. № 6. С. 82-86.
2. Глебовицкий В.А. Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. Л., 1973. 127 с.
3. Глебовицкий В.А., Бушмин С.А. Послемигматитовый метасоматоз. Л., 1983. 127 с.
4. Демонис И.М. и др. Кианитовые руды месторождения Хизоваара – перспективный вид огнеупорного сырья // Фундаментальные науки – народному хозяйству. М.: Наука, 1990. С. 692-694.
5. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные газы. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.
6. Демонис И.М., Карпович Ю.Ф., Озерова Г.П. и др. Суспензия для форм по выполняемым моделям. Патент № 1656781. М., 1993.
7. Щипцов В.В., Скамницкая Л.С. и др. Хизоваарское кианитовое поле, Сев. Карелия. Петрозаводск, 1988. 104 с.
8. Щипцов В.В. Кианит – эффективное сырье для производства огнеупоров: сферы потребления, производители и мировая торговля // Новые огнеупоры. 2005. № 8. С. 78.
9. Condie K. Archaean andesites // Orogenic andesites and related rocks. 1982. P 575-590.
10. The Economics of Kyanite. Roskill Information Services Ltd. London. 1990. 146 p.



**ПРЕЗЕНТАЦІИ**

## Кианитовые сланцы Больших Кейв – стратегический ресурс России

Ю.Л. Войтеховский

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты



Всероссийское совещание «Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала», посвящённое 80-летию Кольского НЦ РАН.  
г. Апатиты, 15 ноября 2010 г.



### Фундаментальный аспект

**Программа № 23:** Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов

**Раздел 1.2.2:** Научные основы эффективного освоения гигантских кианитовых месторождений Кольского полуострова...

Акад. РАН Д.В. Рундквист

### Региональный аспект

Новая стратегия развития горно-геологической отрасли МО

Губернатор МО Д.В. Дмитриенко





## Проблемы

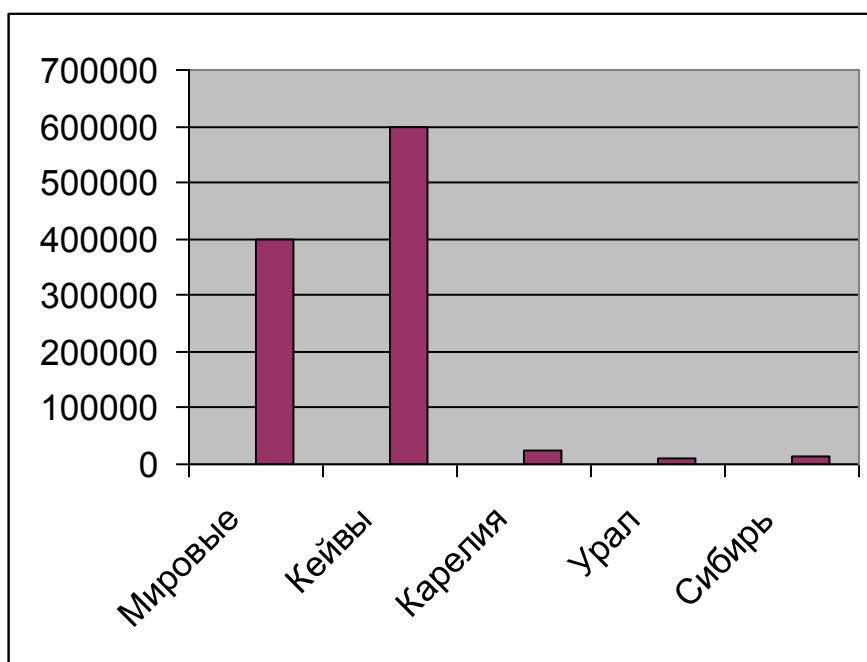
### 1. Первичный электролитический Al

- Россия занимает второе место в мире по производству Al – 3.5-4.0 млн.т/год, т.е. 12.5 % мирового производства
- исходная руда – тихвинские бокситы (50 %  $Al_2O_3$ ), собственного сырья – 40 %, поставки из Гвинеи, Югославии, Греции
- за импорт сырья Россия отдает 90 % производимого Al
- альтернативное сырьё: кианит, силлиманит, андалузит (62 %  $Al_2O_3$ ), ставролит (53), нефелин (32), анортозит (32), алуниты (22)

### 2. Кианит как сырьё для огнеупорной промышленности

- основные производители (более 90 %) – США, Индия
- в России освоенных месторождений кианита нет
- мировые запасы (без РФ) – 400 млн. т.
- запасы по РФ – 650 млн. т.
- Б. Кейвы – 90 % разведанных запасов кианита РФ

**Имея качественное глиноземистое сырьё (кианит), РФ покупает его за границей.**



Разведанные запасы минералов группы силлиманита,  
тыс. т.

Разведанные запасы и прогнозные ресурсы руд, минералов группы силлиманита,  
глинозема и алюминия в России, тыс. т.

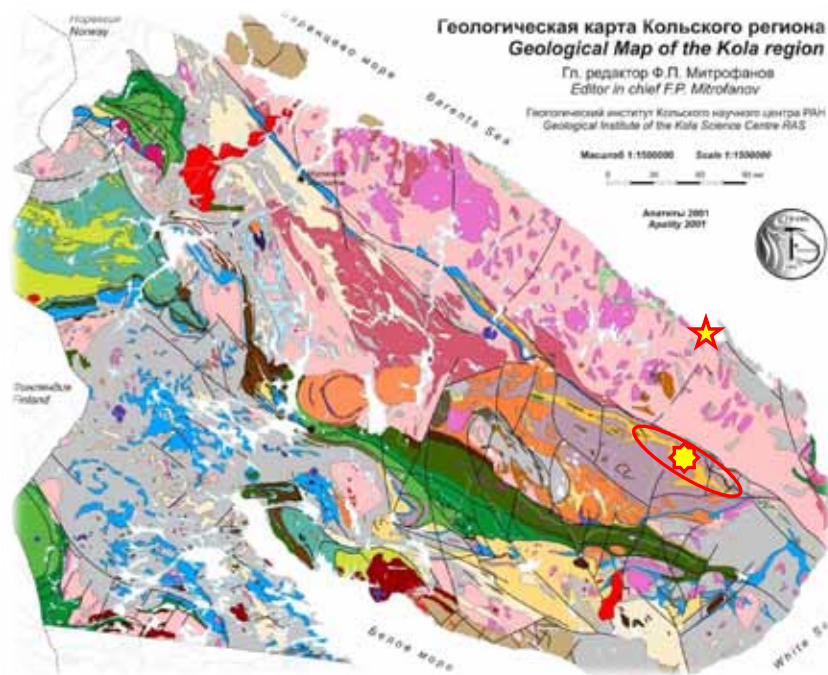
Район	Руда	$Al_2SiO_5$	$Al_2O_3$	Al
Разведанные запасы ( $C_2$ , $C_1$ , B, A)				
Кольский полуостров	3400000	1186879	676518	358556
Карелия	116820	25000	14250	7553
Урал	66684	11710	6675	3537
Сибирь	511750	13109	74732	39608
Итого	4095254	1236698	772175	409254
Прогнозные ресурсы ( $P_2$ , $P_3$ )				
Кольский полуостров	11000000	3840000	2188230	1159762
Урал	109890	30000	17100	9063
Сибирь	8138400	2588517	1475455	781991
Итого	19248290	6458517	3680785	1950816

## Кейвские руды – комплексное сырьё

- **Попутное сырьё:** селенистый пирротин, рутил и ильменит, кварц, ставролит.
- **Сульфидный концентрат:** среднее содержание в руде 2 %, запасы – 20 млн. т, прогнозные > 40 млн. т. В составе: Co 0.09-0.17 %; Ni 0.11-0.23 %, Se 5-21 г/т; Au 0.18-0.52 г/т и др. В кейвских месторождениях: Au >7000 т, Ni 34000 т, Co 26000 т., Se 260 т.
- **Ставролитовый концентрат:** среднее содержание в руде 5 %, запасы – 50 млн. т. Прогнозные > 100 млн. т, может использоваться для производства глинозема и как флюс-разжижитель (вместо флюорита). Новая технология выплавки стали успешно внедрена на Макеевском металлургическом комбинате (Панов и др., 1992). Ресурсы ставролита в Кейвах равны кианитовым. При успешном решении вопроса об его использовании потенциал Б. Кейв по  $Al_2O_3$  может быть увеличен в 2 раза.

## Задачи

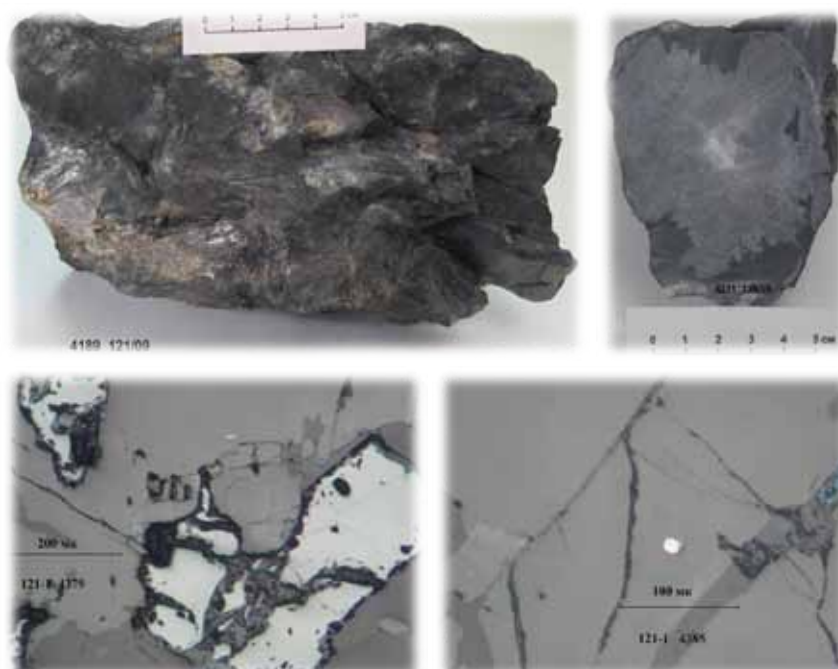
1. Более детальное минералогическое исследование кианитовых сланцев Б. Кейв по сравнению с 1950-60-ми гг.
2. Эффективная технология получения Al из кианитовых руд Б. Кейв.



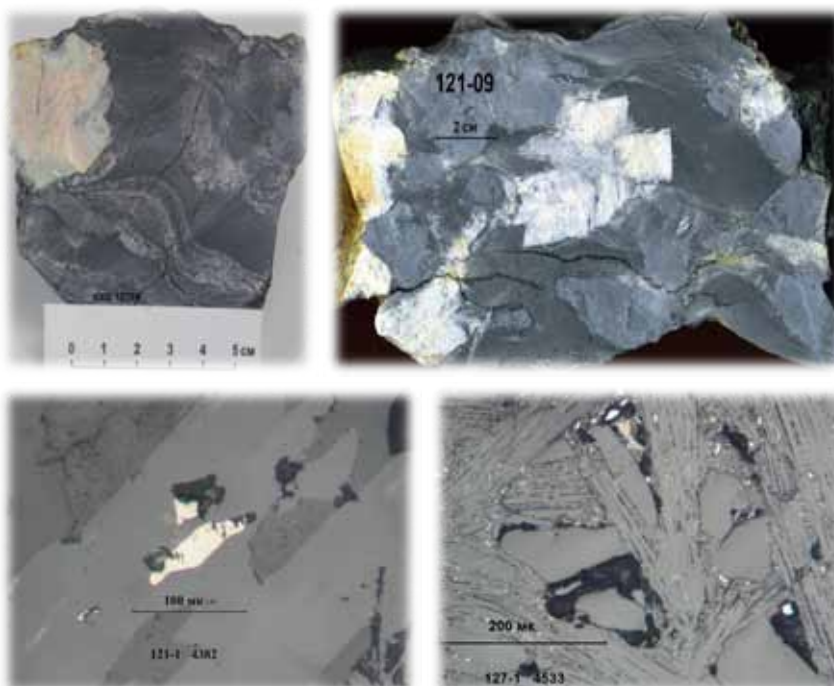
☀ Н. Шууррта      ★ пос. Гремиха      ○ рудная провинция, 23 м-ния

**Опытный карьер  
 Н. Шууррта**

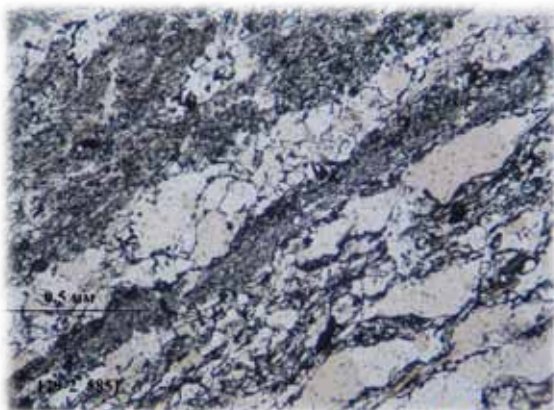




**Конкреционные руды**

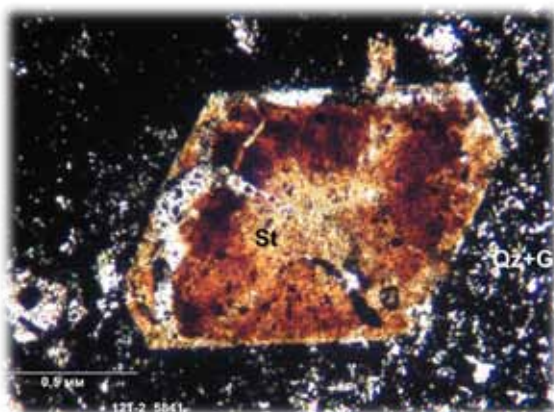
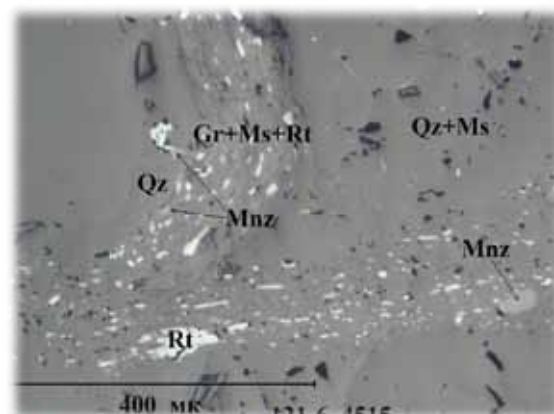
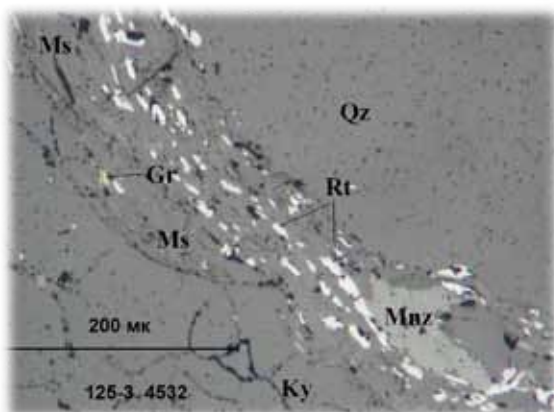


**Параморфические руды**



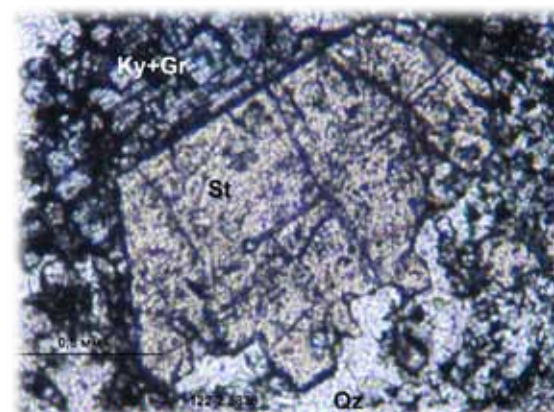
Слева: полосчатая текстура рассланцованного субстрата, укрупнение зёрен кварца и мусковита. В проходящем свете, николи параллельны.

Внизу: распределение минералов в кварцевых прожилках: кварц (Qz), рутил (Rt), монацит (Mnz), графит (Gr).



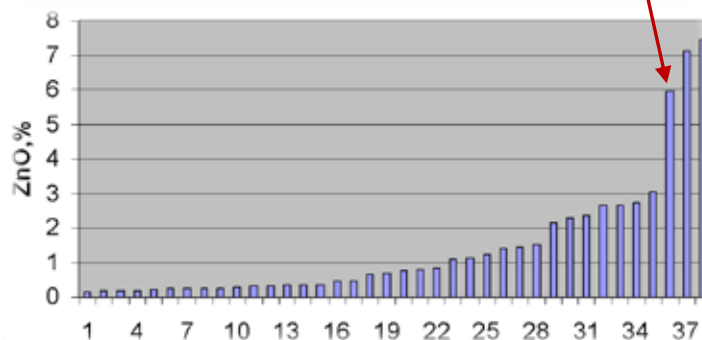
Зональный метакристалл ставролита (St) в кварцево-графитистой (Qz + Gr) массе. Бурый цвет обусловлен включениями графита. В проходящем свете, николи параллельны.

Метакристалл ставролита, ограниченный со стороны кианита (Ky) и зазубренный со стороны кварца. В проходящем свете, николи параллельны.



Химический состав кейвского ставролита (масс. %):  $\text{SiO}_2$  27.84;  $\text{TiO}_2$  0.34;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  54.64;  $\text{FeO}$  8.19;  $\text{MgO}$  1.47;  $\text{MnO}$  0.3;  **$\text{ZnO}$  5.98**;  $\Sigma$  98.75

Внутреннее строение изучено на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450 с энергодисперсионной приставкой RÖENTEC, химический состав – рентгеноспектральным методом на электронном анализаторе Cameca MS-46.



Zn в ставролитах (Минералы, 1972; Федькин, 1975; Мец и др., 1983)

Продукты восстановления кианитового концентрата (исх. 51 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

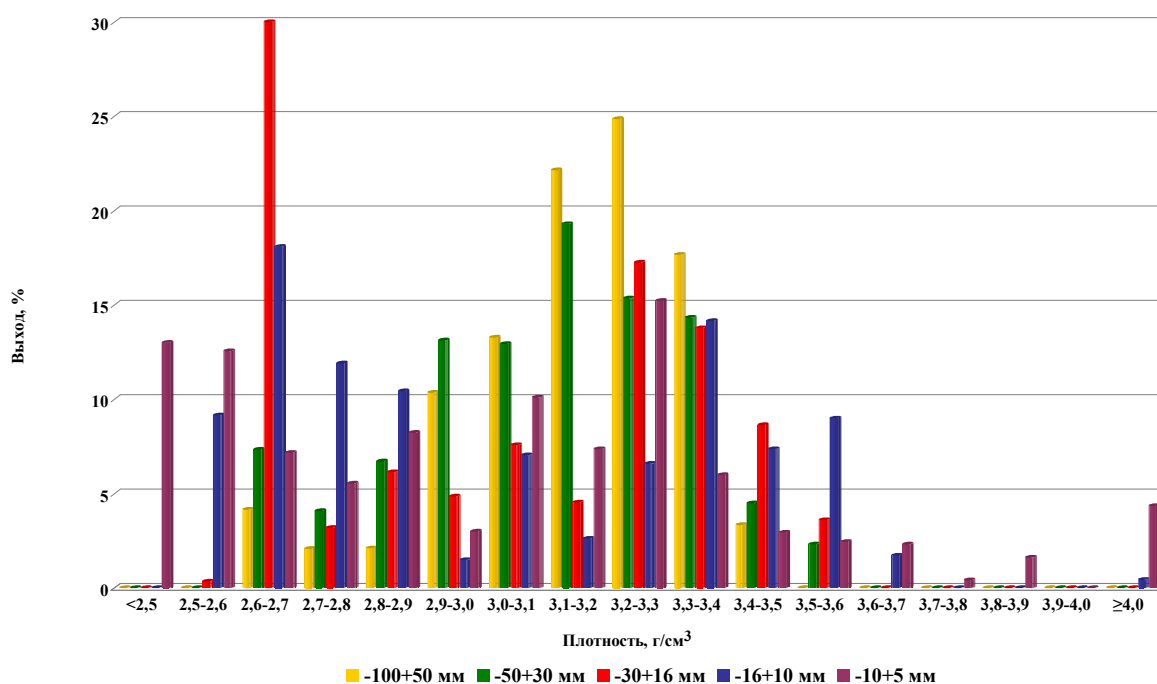
Компонент	Кианитовый концентрат	К-т 1	К-т 1 обработан	К-т 2	К-т 2 обработан
MgO	0.85	–	–	–	–
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b>51.97</b>	<b>82,95</b>	<b>84.12</b>	<b>81.02</b>	<b>85.17</b>
<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	<b>40.94</b>	<b>5,73</b>	<b>7.98</b>	<b>8.08</b>	<b>9.35</b>
P	0.26	0.25	0.10	0.29	0.05
S	0.57		0.12	0.04	0.14
$\text{K}_2\text{O}$	0.08				0.06
CaO	1.03	1,63	0.29	1.28	0.15
$\text{TiO}_2$	1.53	2,30	2.27	2.35	1.99
$\text{CrO}_3$	0.071	0,47	0.39	0.35	0.27
MnO	0.04		0.04	0.06	0.01
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.58	6,65	4.70	6.47	2.74
$\text{ZrO}_2$	0.04			0.08	0.06
$\text{WO}_3$	0.04				
Au	0.01	Отношение $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ (модуль)			
		14.5	10.5	10	9

## **Выводы**

1. Кианитовые руды Б. Кейв – стратегический резерв и гарантия экономической безопасности РФ по Al
2. Ставролитовые сланцы – новый вид металлургического сырья, удваивающий ресурсы Б. Кейв
3. Комплексный характер проблемы освоения Б. Кейв требует объединения усилий институтов: ГИ + ГоИ + ИХТРЭМС + ИЭП КНЦ РАН + ...







**Рисунок - Распределение кианитовых сланцев технологической пробы КИ-2009 различной крупности по плотности**

**Таблица 2 - Фракционный состав кианитовой руды крупностью -100+50 мм по результатам измерения плотности кусков**

Гранич. знач. плотности, г/см <sup>3</sup>	Выход фрак.,%	Содержание во фракции, %									
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> киан	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe общ	TiO <sub>2</sub>	ппп
<2,7	4,16	3,97	3,49	88,95	0,96	0,31	0,09	0,25	0,33	0,84	1,34
2,7-2,79	2,08	12,93	11,77	82,00	0,71	0,18	0,11	0,24	0,36	0,85	1,7
2,8-2,89	2,11	21,63	20,26	74,13	0,50	0,13	0,10	0,15	0,25	1,02	1,78
2,9-2,99	10,35	29,85	28,41	66,10	0,38	0,10	0,06	0,18	0,19	0,74	2,1
3,0-3,09	13,27	35,19	33,72	60,14	0,33	0,09	0,06	0,07	0,18	0,70	2,27
3,1-3,19	22,14	41,22	39,81	54,51	0,27	0,08	0,03	0,04	0,87	0,76	2,3
3,2-3,29	24,86	45,71	44,49	49,36	0,21	0,06	0,04	0,06	0,78	0,80	2,47
3,3-3,39	17,67	51,23	50,06	44,58	0,18	0,07	0,15	0,10	0,25	0,58	2,42
≥3,4	3,35	53,81	53,28	41,38	0,08	0,04	0,12	0,054	0,16	0,54	1,99
<b>Итого</b>	<b>100,00</b>	<b>40,00</b>	<b>38,74</b>	<b>55,40</b>	<b>0,29</b>	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	<b>0,51</b>	<b>0,73</b>	<b>2,26</b>

**Таблица 3 - Фракционный состав кианитовой руды крупностью -50+30 мм по результатам измерения плотности кусков**

Гранич. знач. плотности, г/см <sup>3</sup>	Выход фрак.,%	Содержание во фракции, %									
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> киан	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe общ	TiO <sub>2</sub>	ппп
<2,7	7,34	5,62	4,99	89,72	0,89	0,24	0,09	0,21	0,26	0,74	1,27
2,7-2,79	4,09	9,68	9,04	86,89	0,52	0,12	0,08	0,19	0,18	0,89	1,83
2,8-2,89	6,71	17,86	16,73	77,16	0,50	0,11	0,11	0,28	0,20	0,94	1,84
2,9-2,99	13,13	29,41	27,73	66,05	0,45	0,10	0,13	0,16	0,21	0,85	2,16
3,0-3,09	12,94	35,52	34,13	59,70	0,31	0,08	0,12	0,10	0,21	0,83	2,26
3,1-3,19	19,30	40,72	39,28	54,37	0,28	0,08	0,08	0,06	0,13	0,76	2,20
3,2-3,29	15,36	44,43	43,47	50,34	0,17	0,04	0,03	0,04	0,10	0,57	2,11
3,3-3,39	14,33	50,80	49,77	45,08	0,16	0,04	0,06	0,06	0,13	0,63	2,18
3,4-3,49	4,49	54,69	53,93	41,23	0,11	0,04	0,10	0,07	0,14	0,46	1,95
≥3,5	2,32	56,56	55,85	38,88	0,10	0,04	0,046	0,12	0,18	0,45	2,13
<b>Итого</b>	<b>100,00</b>	<b>36,19</b>	<b>35,02</b>	<b>59,15</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,16</b>	<b>0,73</b>	<b>2,07</b>

**Таблица 4 - Фракционный состав кианитовой руды крупностью -30+16 мм по результатам измерения плотности кусков**

Гранич. знач. плотности, г/см <sup>3</sup>	Выход фрак.,%	Содержание во фракции, %									
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> киан	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe общ	TiO <sub>2</sub>	ппп
<2,7	30,43	3,00	2,74	90,02	0,68	0,20	0,31	0,20	0,27	1,33	1,95
2,7-2,79	3,19	12,92	11,69	82,27	0,75	0,21	0,12	0,15	0,33	0,70	1,78
2,8-2,89	6,15	21,86	20,37	71,54	0,54	0,14	0,12	0,16	0,24	1,12	3,13
2,9-2,99	4,86	29,41	28,52	66,30	0,24	0,07	0,11	0,08	0,21	0,94	1,91
3,0-3,09	7,57	34,09	32,92	61,17	0,27	0,09	0,13	0,08	0,17	0,91	2,54
3,1-3,19	4,53	42,31	40,70	52,42	0,30	0,10	0,02	0,04	0,17	0,76	2,78
3,2-3,29	17,25	46,12	45,19	49,41	0,16	0,09	0,02	0,03	0,13	0,59	2,23
3,3-3,39	13,78	50,77	50,13	44,36	0,10	0,06	0,14	0,07	0,12	0,48	2,32
3,4-3,49	8,63	57,78	57,23	39,58	0,08	0,04	0,13	0,05	0,12	0,37	2,24
≥3,5	3,60	58,43	57,92	37,40	0,07	0,04	0,13	0,059	0,16	0,34	2,24
<b>Итого</b>	<b>100,00</b>	<b>30,64</b>	<b>29,91</b>	<b>64,05</b>	<b>0,36</b>	<b>0,12</b>	<b>0,16</b>	<b>0,11</b>	<b>0,19</b>	<b>0,86</b>	<b>2,23</b>

**Таблица 5 - Фракционный состав кианитовой руды крупностью -16+10 мм по результатам измерения плотности кусков**

Гранич. знач. плотности, г/см <sup>3</sup>	Выход фрак.,%	Содержание во фракции, %									
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> киан	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe общ	TiO <sub>2</sub>	ппп
<2,6	9,15	4,84	4,47	85,32	0,61	0,20	0,15	0,41	0,99	1,59	1,95
2,6-2,69	18,08	4,13	3,82	88,95	0,60	0,18	0,11	0,37	0,77	1,39	1,75
2,7-2,79	11,90	7,15	6,36	84,80	0,87	0,23	0,06	0,19	0,30	1,41	2,29
2,8-2,89	10,43	11,11	9,87	82,36	0,88	0,23	0,09	0,16	0,36	1,36	2,24
2,9-2,99	1,49	21,23	19,97	70,17	0,47	0,13	0,16	0,18	0,33	0,80	2,98
3,0-3,09	7,05	31,85	29,83	63,04	0,50	0,14	0,05	0,09	0,48	0,67	1,89
3,1-3,19	2,63	38,18	36,25	56,13	0,40	0,13	0,08	0,15	0,26	0,77	3,15
3,2-3,29	6,60	43,16	42,29	51,28	0,16	0,06	0,02	0,04	0,31	0,65	2,63
3,3-3,39	14,15	51,46	50,82	43,67	0,10	0,04	0,02	0,02	0,15	0,50	2,62
3,4-3,49	7,37	54,52	53,89	41,16	0,09	0,04	0,02	0,03	0,15	0,36	2,21
3,5-3,59	9,00	56,05	55,45	39,31	0,08	0,07	0,12	0,05	0,17	0,37	2,58
≥3,6	2,17	57,22	56,82	38,49	0,06	0,04	0,05	0,033	0,29	0,47	2,77
<b>Итого</b>	<b>100,00</b>	<b>27,19</b>	<b>26,41</b>	<b>66,50</b>	<b>0,45</b>	<b>0,14</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,42</b>	<b>0,97</b>	<b>2,26</b>

**Таблица 6 - Фракционный состав кианитовой руды крупностью -10+5 мм по результатам измерения плотности кусков**

Гранич. знач. плотности, г/см <sup>3</sup>	Выход фрак.,%	Содержание во фракции, %									
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> киан	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe общ	TiO <sub>2</sub>	ппп
<2,5	13,00	4,03	3,73	91,80	0,58	0,18	0,09	0,07	0,59	1,06	1,61
2,5-2,59	12,56	7,72	7,07	86,81	0,67	0,16	0,03	0,07	0,33	1,38	2,23
2,6-2,69	7,18	11,83	10,53	81,48	0,87	0,24	0,04	0,09	0,32	1,61	2,56
2,7-2,79	5,54	6,75	5,64	85,41	1,30	0,35	0,03	0,13	0,30	0,97	2,73
2,8-2,89	8,23	18,6	15,63	75,63	1,26	0,33	0,03	0,14	0,27	0,91	2,47
2,9-2,99	2,99	12,6	11,04	80,77	0,98	0,28	0,03	0,09	0,32	1,46	2,23
3,0-3,09	10,10	15,08	13,78	78,06	0,68	0,19	0,02	0,06	0,18	1,45	2,34
3,1-3,19	7,36	45,02	42,34	48,33	0,47	0,23	0,04	0,06	0,15	1,04	3,01
3,2-3,29	15,22	38,16	36,13	57,54	0,42	0,16	0,02	0,04	0,16	0,65	2,60
3,3-3,39	5,99	49,93	49,11	46,17	0,13	0,06	0,02	0,02	0,15	0,63	2,85
3,4-3,59	5,40	39,61	36,40	53,69	0,64	0,23	0,02	0,06	0,24	1,19	3,44
3,6-3,69	2,31	47,78	46,57	48,17	0,20	0,09	0,02	0,03	0,31	0,64	2,09
≥3,7	4,12	53,67	53,15	42,37	0,08	0,07	0,03	0,018	0,18	0,41	2,01
<b>Итого</b>	<b>100,00</b>	<b>23,71</b>	<b>22,24</b>	<b>70,78</b>	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	<b>0,04</b>	<b>0,07</b>	<b>0,28</b>	<b>1,05</b>	<b>2,44</b>







## Карботермическое обогащение кианитовой руды Кейвского месторождения

Гришин Н.Н., Белогурова О.А. ,  
Нерадовский Ю.Н., Войтеховский Ю.Л., Калинин В.Т.  
ИХТРЭМС КНЦ РАН, ГИ КНЦ РАН, Апатиты

**Разведанные запасы и прогнозные ресурсы руд, минералов группы  
силлиманита, глинозема и алюминия в России, тыс. т.**

Район	Руда	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al
<b>Разведанные запасы (категории C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, B, A)</b>				
Кольский полуостров	3400000	1186879	676518	358556
Карелия	116820	25000	14250	7553
Урал	66684	11710	6675	3537
Сибирь	511750	13109	74732	39608
Итого разведанных запасов	4095254	1236698	772175	409254
<b>Прогнозные ресурсы (категории P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>)</b>				
Кольский полуостров	11000000	3840000	2188230	1159762
Урал	109890	30000	17100	9063
Сибирь	8138400	2588517	1475455	781991
Итого прогнозных ресурсов	19248290	6458517	3680785	1950816

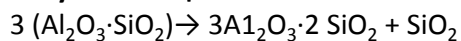


**Химический состав кианитовой руды  
Кейвского месторождения**

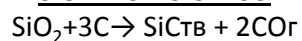
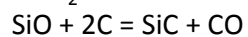
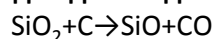
Компоненты	Содержание, мас.%
MgO	0,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.1
SiO <sub>2</sub>	55.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17
SO <sub>3</sub>	0,10
K <sub>2</sub> O	2.86
CaO	0.06
TiO <sub>2</sub>	1.12
Cl	0.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,37
ZrO <sub>2</sub>	0,35
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12

**Химические реакции при карботермическом  
обогащении**

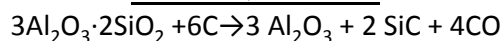
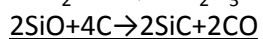
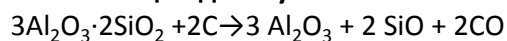
**Реакция муллитизации алюмосиликатной части шихты**



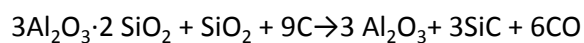
**Реакции для диоксида кремния:**



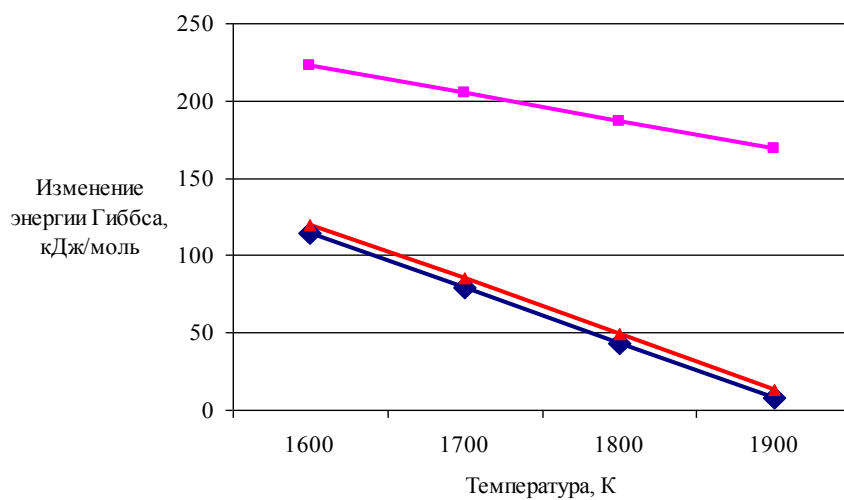
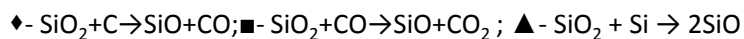
**Реакции для муллита:**



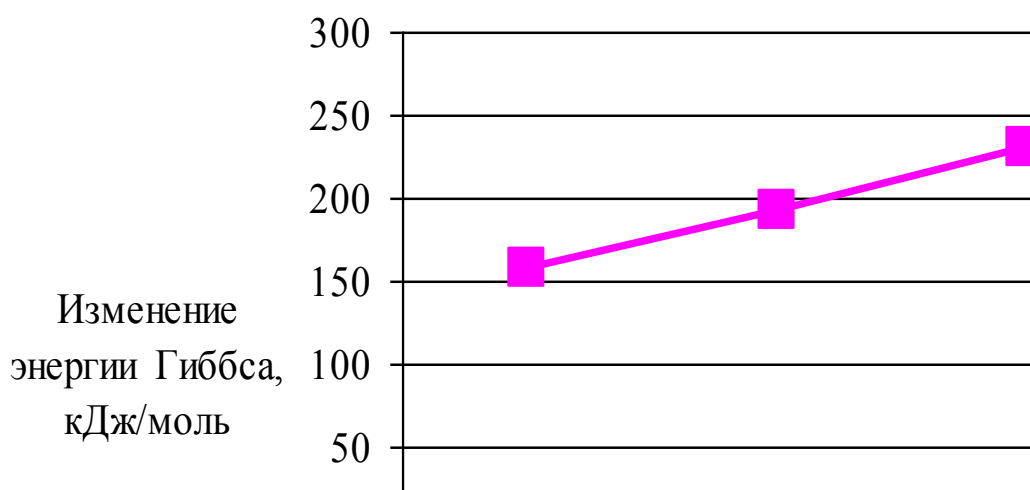
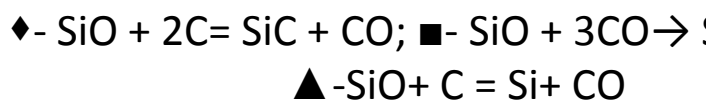
**Суммарная реакция восстановления продуктов муллитизации:**



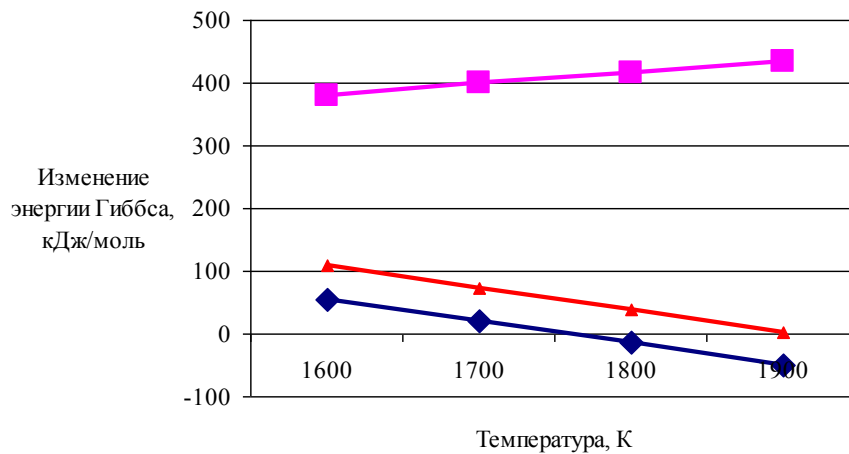
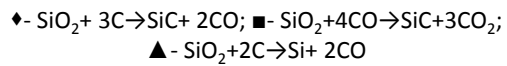
## Образование SiO



## Восстановление SiO



### Восстановление $\text{SiO}_2$



### огнеупорные материалы

Из брикета на основе богатой кианитовой руды после восстановительного обжига получены огнеупорные материалы с термостойкостью (1300°C - вода):

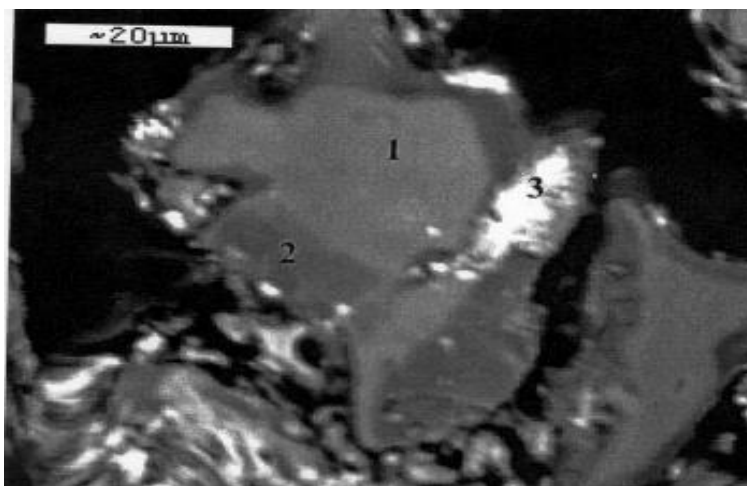
- муллитографитовые - 54 теплосмены
- муллитокордиеритовые - 51 теплосмена

### Содержание основных компонентов после восстановительного обжига кианитовой руды

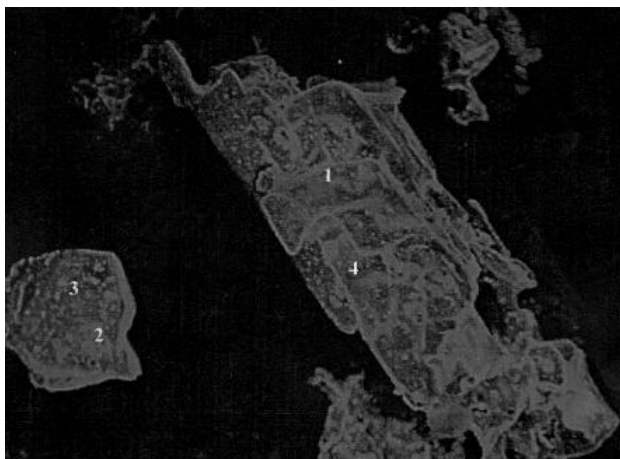
Содержание восстановителя	Обжиг 1700°C 4 часа выдержки		Обжиг 1700°C 6 часов выдержки		Обжиг 1700°C 6 часов выдержки с разрыхляющими добавками	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
7,5%	86,43	9,6	87,54	6,17	92,04	2,87
10%	84,14	8,4	84,65	7,7	86,32	6,66

### Микроструктура образца, обогащенного по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1); области составов SiO<sub>2</sub> (70%) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16%) (2); сплавы, содержащие Fe, Si, Al (3)



## Состав фаз $\text{Al}_2\text{O}_3$ продукта



Спектры	O	Al	Si	Ti
1	40,33	56,99	1,56	1,12
2	40,76	52,28	2,80	4,16
3	30,72	65,91	1,24	2,13
4	52,89	35,19	1,54	10,37

В результате восстановительного обжига  
получен высокоглиноземистый продукт:

- для производства огнеупоров
- для производства глинозема по методу Байера.  
Содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  8,4-9,6% вместо 2-8%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  84-86% вместо 50-60%)
- по содержанию  $\text{SiO}_2$  и железа, соответствует высококремнистым маложелезистым бокситам, требующим последовательно комбинированного метода переработки для получения глинозема металлургического

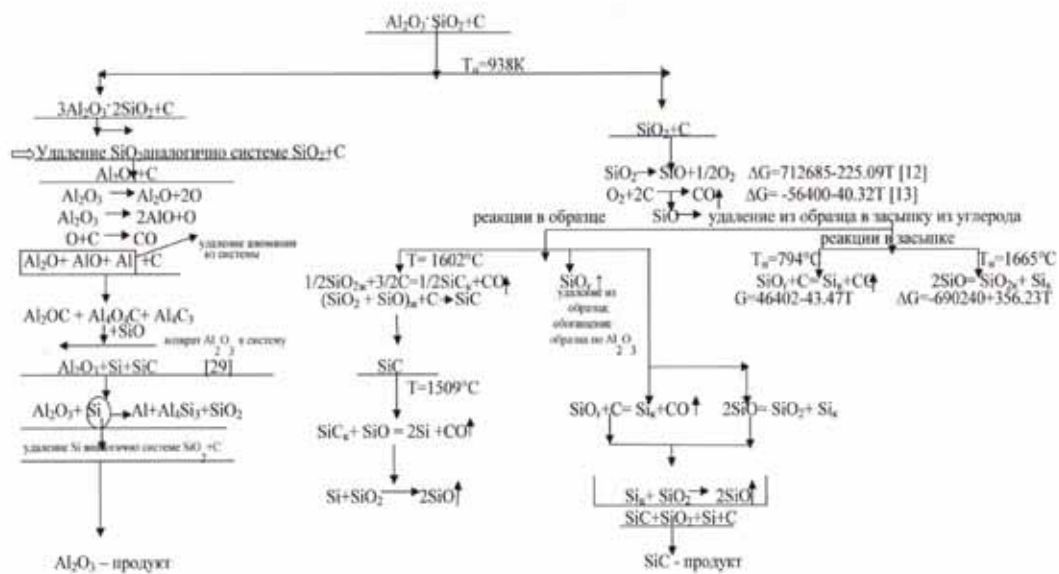


Рисунок 4 - Схема карботермического восстановления квантита в псевдооткрытой системе

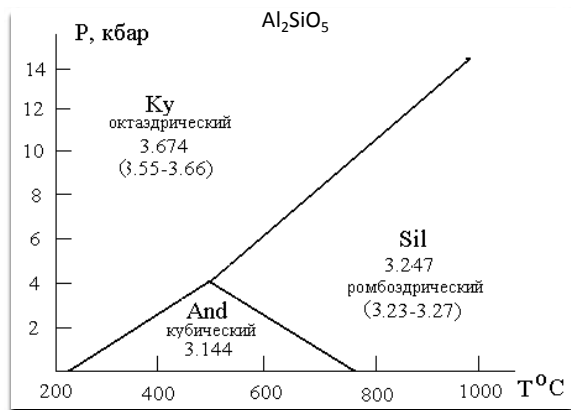
# Физико-химическое исследование процесса высокотемпературного разложения кианита

Каржавин В.К.

[karzhavin@geoksc.apatity.ru](mailto:karzhavin@geoksc.apatity.ru)

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

- Крупнейшее месторождение кианита Кейвы является наиболее перспективным и высокоэффективным источником высокоглиноземистого сырья Кольского полуострова. Кианит – минерал, содержащий (теоретический состав) 62.9214 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 37.0786 %  $\text{SiO}_2$ . В перспективе кианит предполагают эффективно использовать для производства кремниво-алюминиевых сплавов (силуминов), высокоглиноземистых огнеупоров, противопопригарных материалов, технического глинозема [1]. Главными минералами Кейвского месторождения



являются кианит и кварц. В качестве примесей установлены следующие минералы: магнетит, плагиоклаз, ставролит, мусковит, клиноцоизит, хлорит, биотит, рутил, ильменит, апатит, графитоид, диккит, пирротин, циркон, пирит. Химический состав кианита (обр. 126/19):  $\text{SiO}_2$  – 35.6%,  $\text{TiO}_2$  – 0.19%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 60.05%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0.29%,  $\text{FeO}$  – 0.14%,  $\text{MgO}$  – 0.04%,  $\text{CaO}$  – 0.18%,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0.02%, п.п.п. – 3.44% [2]. Ограничительным условием применения высокоглиноземистого сырья для производства кремниво-алюминиевых сплавов является минимальное, не превышающее 1.5-1.8%, суммарное содержание примесей железа, титана, щелочных и других элементов в концентратах при содержании глинозема не менее 57-58%.

## Методика численного моделирования

- Из литературных источников известно, что используя электротермический метод для переработки кианита его можно считать прекрасным сырьем для производства алюминия и алюминиевых сплавов и широкого применения высокоглиноземистых кианитовых огнеупоров в металлургических процессах [3]. Последующими экспериментальными работами была показана предлагаемая технологическая схема разложения кианита при помощи малозольных восстановителей [4].

Процесс разложения веществ, широко используемый в химической промышленности, непосредственно связан с характерными особенностями взаимодействия между собой твёрдых фаз при нагревании. Для физико-химического моделирования сложных химических процессов в различных системах используется аппарат математического программирования к гиббсовской теории гетерогенного равновесия, который нашел широкое применение при проведении исследований [5]. При этом в системе одновременно учитываются возможные взаимодействия между компонентами в процессах окисления-восстановления, растворения, гидролиза, комплексообразования, ионного обмена и т.д. В данной работе исходный объект исследования (кианит) в математической модели рассматривается как однородно реагирующее вещество с восстановителем (углерод) в широком интервале температур в условиях равновесия в исследуемой системе. **Хотя результаты таких расчетов принято считать только для равновесных условий, полученные сведения весьма полезны для оценки эволюционирующего состава исследуемой системы в широком диапазоне физико-химических параметров.**
- Цель таких исследований – путём численного моделирования состояния сложных минеральных систем для различных параметров оценить оптимальные условия получения определённых целевых продуктов. Основные этапы данной задачи могут быть сформулированы следующим образом:

  - выявление закономерностей поведения и взаимодействия веществ; расчёт состава и свойств в системах с фазовыми и химическими превращениями; выделение условий образования наиболее представительных компонентов и фаз системы; определение последовательности и характеристик химических и фазовых превращений в конденсированных средах в зависимости от изменения параметров системы; прогнозирование условий образования фаз и компонентов;
  - решение конкретных практических задач. Сюда относят: выявление рациональных условий получения целевых продуктов (в зависимости от исходного состава и параметров системы, выхода продукта, степени разделения исходного вещества и т.д.); определение предельных равновесных характеристик процесса – выход, состав при заданных условиях; выбор оптимальных вариантов переработки исходного минерального сырья; создание научных основ комплексного использования природного сырья.
- Как правило, применение термодинамического моделирования сокращает длительность стадии экспериментальных исследований, и дают значительный экономический эффект, в частности для высокотемпературных технологических схем. При наличии предварительной и объективной расчётной информации может быть резко сокращён объём экспериментальных исследований, времени их проведения и стоимость.



- Данным исследованием предусмотрено установить, какие компоненты могут образоваться в процессе высокотемпературного разложения кианита в присутствии углерода и показать возможные параметры их получения. Используя методы физико-химического моделирования необходимо учитывать факт решающего значения полноты используемых для расчетов компонентов в мультисистемах. Поэтому для проведения физико-химического моделирования необходимо учесть в создаваемых мультисистемах все предполагаемые (возможные) химические соединения, и которые соответствуют объекту исследования. Все необходимые термодинамические величины для этих соединений взяты из справочной литературы [6, 7], банка термодинамических данных ИВТАНТЕРМО [8] и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Термодинамические величины соединений, используемые для проведения физико-химических модельных исследований.

Вещество	М.вес	$V_{298}$	$-\Delta H_{298}^{\circ}$	$-\Delta G_{298}^{\circ}$	$S_{298}^{\circ}$	$C_p = a + b.T.10^{-3} + c.T^2.10^5 + \dots$					TK
		Дж/бар	кДж/моль		Дж/моль·К	a	b	c	d	e	
C	12.011	0.5299	0	0	5.74	23.35	1.3	-37.49	-	71.5	2500
Al	26.9815	0.9999	0	0	28.33	31.84	-18.16	-3.77	22.47	-	933
						31.752	-	-	-	-	2793
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.961	2.557	1675.7	1582.3	50.92	124.56	6.9	-73.76	-	93.7	2327
Al <sub>2</sub> C <sub>2</sub> , r	77.985		-564.94	-500.43	284.488	83.693	1.358	-42.592	-	83.74	2500
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	149.946		208.8	196.2	88.95	179.79	6.25	-113.3	-	166.4	2500
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	162.046	4.441	2594.29	2443.96	83.763	182.096	22.188	-85.529	-	77.03	2500
Si	28.0855	2.269	0	0	18.83	22.80	3.85	-3.56	-	-	1685
						27.20	-	-	-	-	3492
α-SiO <sub>2</sub>	60.0843	2.229	910.94	856.67	41.84	51.76	17.74	-12.3	14.94	-	847
β-SiO <sub>2</sub>		2.372				58.91	10.0	-	-	-	1996
α-SiC	40.097	1.246	62.76	60.20	16.48	49.08	3.01	-43.6	-	68.6	2500
β-SiC	40.097		65.3	62.80	16.61	50.00	2.39	-46.44	-	75.3	2500

## Методика численного моделирования

- Физико-химическое моделирование мультисистем, позволяющее оценить состав образующихся продуктов разложения, предусматривает пересчёт результатов химического анализа теоретического объекта исследования на мольное содержание элементов в 1 кг исследуемого образца. Полученный результат элементарного состава используемых для расчета смесей является исходным вектором  $b_i$ . Численная реализация исследуемых моделей осуществлялась методом минимизации свободной энергии Гиббса, универсальность которой применима для решения конкретных физико-химических задач. Для проведения исследования были созданы мультисистемы, в составе которых присутствовали независимые компоненты Al-C-Si-O. Независимыми компонентами являются химические элементы, через которые выражены химические формулы зависимых компонентов (химические соединения), используемых в мультисистемах.

## Методика численного моделирования

- В работе сделана попытка рассмотреть несколько вариантов мультисистем, в которых предусмотрено изменение содержания углерода в исследуемой системе, что представляет определённый интерес (табл. 2). Этот подход позволит оценить влияние концентрации углерода на последовательность образования и существования продуктов разложения кианита в зависимости от температуры.

Таблица 2. Используемые для расчета вектора  $b_i$  элементов системы (моль / кг)

Вектора	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
$Al_2SiO_5 / C$	90 / 10	82.5 / 17.5	75 / 25	67.5 / 32.5	50 / 50	25 / 75
Al	11.108098	10.182421	9.256747	8.331072	6.171165	3.085582
Si	5.553897	5.091045	4.628247	4.165401	3.085498	1.542749
O	27.769936	25.455725	23.141613	20.827452	15.427742	7.713871
C	8.3257	14.569975	20.81425	27.058525	41.6285	62.44275
$\Sigma$	52.757631	55.299166	57.840857	60.38245	66.312905	74.784952

- Результаты расчётов приведены в табл. 3, а также изображены на рисунках 1-6. В представленном графическом материале видно характерное превращение в продукты разложения кианита с изменением концентрации углерода и температуры в изученных мультисистемах.

Таблица 3. Результаты расчета высокотемпературного взаимодействия кианита с углеродом (смесь = 1 кг)

Т = 450°C	Состав смеси: углерод / кианит					
	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
Компоненты, г/кг						
C	749.9	499.9	324.9	249.9	174.9	99.9
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub>	92.7	185.4	250.3	278.1	305.9	333.7
$\beta$ -SiO <sub>2</sub>						
$Al_2SiO_5$						
$Al_2O_3$	157.3	314.6	424.7	471.9	519.2	566.3
Al						
Si						
$Al_4C_3$						
$\Sigma V_{общ.}, \text{ см}^3$	405.80	370.46	347.00	335.20	324.70	313.97
V газ, г/кг	-	-	-	-	-	-
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	-	9.0e-53	9.0e-53	9.0e-53	9.0e-53	9.0e-53
CO	2.4e-40	4.7e-14	4.7e-14	4.7e-14	4.7e-14	4.7e-14
CO <sub>2</sub>	-	3.3e-24	3.3e-24	3.3e-24	3.3e-24	3.3e-24

Таблица 3.

T = 600°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	749.9	499.9	324.9	249.9	174.9	99.9
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub>						
$\beta$ -SiO <sub>2</sub>	92.7	185.4	250.3	278.1	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	157.3	314.6	424.7	471.9	519.2	566.3
Al						
Si						
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>						
$\Sigma V_{\text{общ.}}, \text{ см}^3$	406.8	372.5	352.5	338.2	328.8	314.0
V газ, г/кг	-	-	-	-	-	-
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	4.9e-66	2.5e-42	1.7e-43	1.7e-43	1.7e-43	1.7e-43
CO	4.7e-22	7.3e-10	1.2e-10	1.2e-10	1.2e-10	1.2e-10
CO <sub>2</sub>	2.4e-42	1.2e-18	2.9e-19	2.9e-19	2.9e-19	2.9e-19

T = 800°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, масс. %	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	749.9	499.9	324.9	249.9	175.0	100.0
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub>						
$\beta$ -SiO <sub>2</sub>	92.7	185.4	250.3	278.1	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	157.3	314.6	424.7	471.9	519.1	566.3
Al						
Si						
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	12.75	29.95	46.06	54.50	24.64	
$\Sigma V_{\text{общ.}}, \text{ см}^3$	405.8	372.5	355.2	338.2	329.6	317.6
V газ, г/кг						
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	6.9e-21	5.5e-21	1.1e-35	1.1e-35	1.1e-35	1.1e-35
CO	9.9e-01	8.9e-01	4.0e-08	4.0e-08	4.0e-08	4.0e-08
CO <sub>2</sub>	1.4e-01	1.1e-01	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16

Таблица 3.

T = 1000°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	667.0	334.0	100.9	-	-	-
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub>						
$\beta$ -SiO <sub>2</sub>	92.7	185.4	250.3	278.1	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Al	-	-	-	-	160.4	299.7
Si						
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	111.1	222.1	299.8	333.1	152.5	-
$\Sigma V_{\text{общ.}}, \text{ см}^3$	486894.4	973342.8	1313871.0	1468564.1	1206125.0	826645.8
V газ, г/кг	129.3	258.5	348.9	388.8	381.2	366.6
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	3.5e-19	3.5e-19	3.5e-19	6.7e-21	1.9e-15	6.4e-04
CO	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	6.6e-01	6.6e-07
CO <sub>2</sub>	7.3e-3	7.3e-3	7.3e-3	9.7e-04	3.4e-01	9.9e-01

T = 1200°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	666.7	333.3	99.9	-	-	-
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub>						
$\beta$ -SiO <sub>2</sub>	92.7	185.4	250.3	278.1	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Al	-	-	-	-	274.7	299.7
Si						
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	111.1	222.1	299.8	333.2	-	-
$\Sigma V_{\text{общ.}}, \text{ см}^3$	566779.4	1133112.1	1529566.1	1699234.1	1784786.5	1020642.3
V газ, г/кг	129.6	259.2	350.0	388.8	419.4	366.6
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	6.4e-18	6.4e-18	6.4e-18	8.5e-18	2.3e-14	7.0e-04
CO	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.5e-01	1.1e-04
CO <sub>2</sub>	8.4e-04	8.4e-04	8.4e-04	9.7e-04	4.8e-02	9.9e-01

Таблица 3.

T = 1500°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	666.6	333.3	99.9	-	-	-
α-SiO <sub>2</sub>						
β-SiO <sub>2</sub>	92.7	185.4	250.3	278.1	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Al	-	-	-	сл.	274.7	299.7
Si						
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	111.1	222.1	299.8	333.2	-	-
ΣVобщ., см <sup>3</sup>	682639.8	1364831.6	1842391.8	2045238.5	2148210.5	1230166.1
V газ, г/кг	129.6	259.2	350.0	388.8	419.4	366.6
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	1.5e-16	1.5e-16	1.5e-16	1.7e-14	4.5e-11	2.1e-03
CO	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.5e-01	2.9e-03
CO <sub>2</sub>	9.2e-05	9.2e-05	9.2e-05	9.7e-04	4.8e-02	9.9e-01

T = 1800°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	629.6	259.1	-	-	-	-
α-SiO <sub>2</sub>						
β-SiO <sub>2</sub>			299.8	278.1	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Al	-	-	-	0.4	274.7	299.7
Si	43.3	86.7	116.8	-	-	-
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	111.1	222.1	299.8	332.6	-	-
ΣVобщ., см <sup>3</sup>	1329933.3	2659417.0	3587171.3	2393175.8	2511634.0	1368273.0
V газ, г/кг	216.1	432.1	582.9	388.9	419.4	366.6
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	1.5e-15	1.5e-15	1.2e-14	8.0e-14	7.9e-09	5.7e-03
CO	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.5e-01	1.0e-02
CO <sub>2</sub>	2.2e-05	2.2e-05	6.2e-05	1.6e-04	4.8e-02	9.8e-01

Таблица 3.

T = 2000°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	629.6	259.1	-	-	-	-
α-SiO <sub>2</sub>						
β-SiO <sub>2</sub>	-	-	-	69.8	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Al	-	-	0.6	249.8	274.7	299.7
Si	43.3	86.7	117.0	97.4	-	-
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	111.1	222.1	299.1	-	-	-
ΣVобщ., см <sup>3</sup>	1458218.3	2915986.0	3936264.8	3934005.3	2753916.5	1606920.3
V газ, г/кг	216.1	432.1	583.4	583.1	419.4	366.6
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	5.0e-14	5.0e-14	1.9e-13	4.0e-11	6.5e-07	3.7e-02
CO	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.5e-01	7.3e-02
CO <sub>2</sub>	7.6e-06	7.6e-06	2.7e-05	4.0e-04	4.8e-02	8.9e-01

T = 2200°C		Состав смеси: углерод / кианит				
Компоненты, г/кг	75 / 25	50 / 50	32.5 / 67.5	25 / 75	17.5 / 82.5	10 / 90
C	629.6	259.1	-	-	-	-
α-SiO <sub>2</sub>						
β-SiO <sub>2</sub>	-	-	-	69.7	305.9	333.7
Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Al	-	-	0.6	249.8	274.7	299.7
Si	43.33	86.7	117.0	97.4	-	-
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	111.1	222.1	299.0	-	-	-
ΣVобщ., см <sup>3</sup>	1586495.8	3172540.0	4282712.0	4280120.0	2996200.0	1778530.4
V газ, г/кг	216.1	432.1	583.4	583.1	419.4	366.6
Парциальное давление, Pi						
O <sub>2</sub>	1.5e-14	1.5e-14	1.9e-13	4.0e-11	6.5e-07	3.7e-02
CO	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.9e-01	9.5e-01	7.3e-02
CO <sub>2</sub>	7.6e-06	7.6e-06	2.7e-05	4.0e-04	4.8e-02	8.9e-01



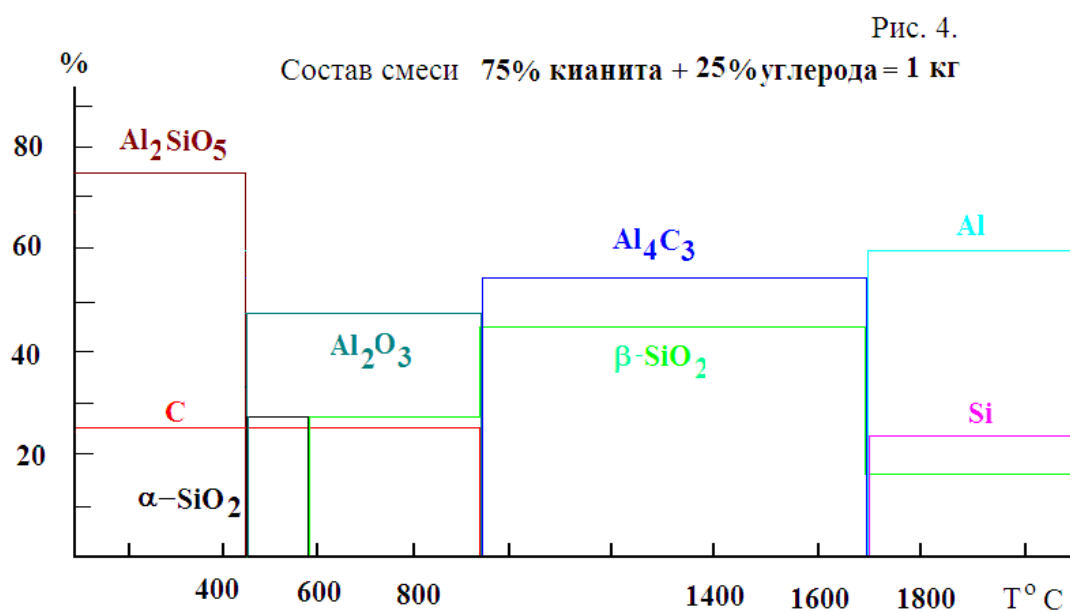
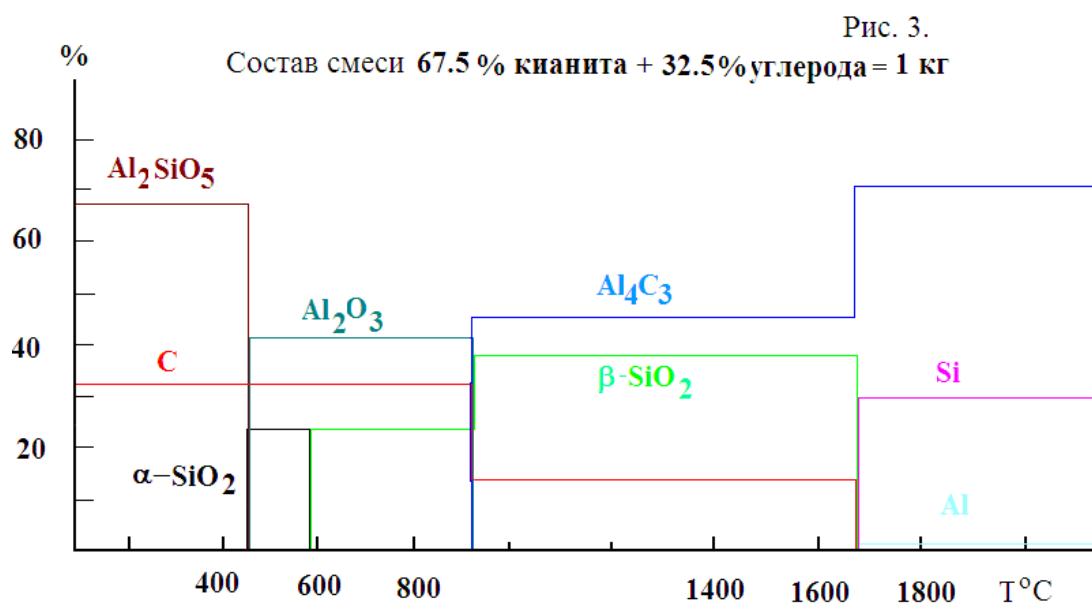


Рис. 5.

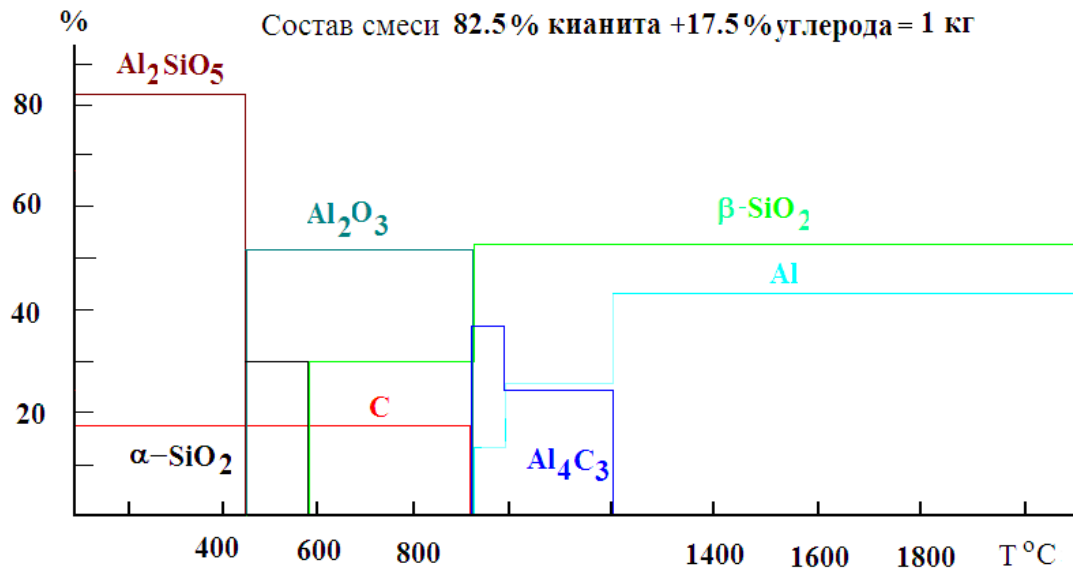


Рис. 6.



**В.А.КОРОТЕЕВ, В.Н.ОГОРОДНИКОВ, А.Н.САВИЧЕВ, В.Н.САЗОНОВ,  
Ю.А. ПОЛЕНОВ, Д.В.КОРОТЕЕВ  
ИГГ УрО РАН, Екатеринбург**

**Уральские месторождения кианита –  
ПЕРСПЕКТИВНАЯ БАЗА ПРОИЗВОДСТВА  
ВЫСОКОГЛИНОЗЕМНЫХ ОГНЕУПОРОВ,  
СИЛУМИНА И АЛЮМИНИЯ**

Алюминий входит в состав более 300 минералов, но рудообразующими из них являются лишь некоторые (табл. 1).

Таблица 1

Основные промышленные алюминийсодержащие минералы

Минерал	Формула	Содержание $Al_2O_3$ %
<b>Бёмит и диаспор</b>	$Al_2O_3 \cdot nH_2O$	<b>85</b>
<b>Гиббсит</b>	$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	<b>65,4</b>
<b>Нефелин</b>	$Na[AlSiO_4]$	<b>34</b>
<b>Алунит</b>	$KAl_3[SiO_4](OH)_6$	<b>До 40</b>
<b>Лейцит</b>	$K[AlSi_2O_6]$	<b>23,5</b>
<b>Силлиманит</b>	$Al_2SiO_5$	<b>62,9</b>
<b>Андалузит</b>	$Al_2SiO_5$	<b>62,9</b>
<b>Кианит</b>	$Al_2SiO_5$	<b>62,9</b>
<b>Корунд</b>	$Al_2O_3$	<b>100</b>
<b>Муллит</b>	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	<b>71,8</b>

В настоящее время глинозем для получения металлического алюминия и других целей в промышленных масштабах производят в подавляющей массе из **бокситов** (малокремнистых и маложелезистых), в значительно меньшей мере из **нефелиновых и алунитовых руд**. Нефелиновые породы беднее бокситов глиноземом, но при их комплексном использовании получают важные побочные продукты: сода, поташ, серная кислота. Нефелиновые руды образуют, в отличие от бокситов, весьма крупные месторождения и создают практически неограниченные возможности для развития алюминиевой промышленности.



В связи с тем, что перспективы выявления месторождений бокситов ограничены, в настоящее время значительное внимание уделяется развитию геологоразведочных и поисковых работ на **небокситовые виды глиноземистого сырья**, которые пока занимают небольшой вес при производстве алюминия (**1 %**)

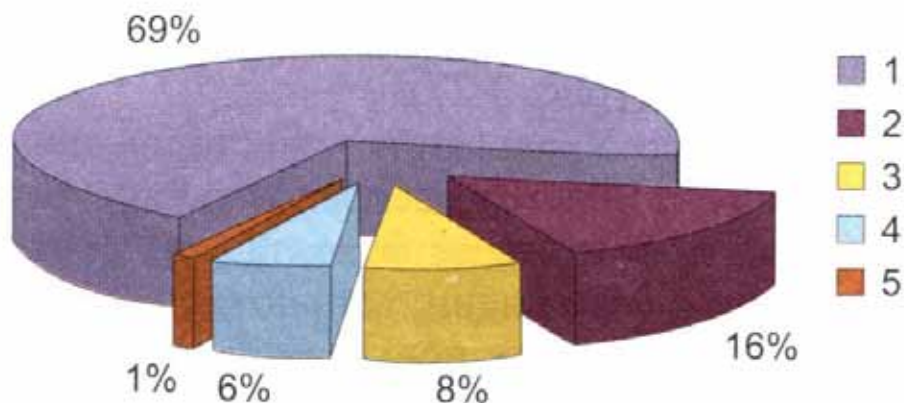


Рис. 2. Основные геолого-промышленные типы месторождений алюминиевого сырья.  
По (Недра России, 2001):

1 – пластообразные латеритных бокситов; 2 – линзо- и пластообразные латеритно-осадочные; 3 – пластообразные осадочные в карбонатных породах; 4 – то же, в терригенных породах; 5 - месторождения небокситового сырья (нефелиновые, алунитовые, кианитовые и др.)

С самого начала становления российской алюминиевой промышленности недостаток отечественных запасов бокситов и, что особенно важно, весьма невысокое качество российских руд стимулировали поиск альтернативного небокситового сырья для производства глинозема. Эти исследования продолжаются на протяжении последних 70 лет и коснулись практически всех природных и техногенных глиноземсодержащих образований (нефелиновые и алунитовые руды, каолины, минералы группы силлиманита, золы теплоэлектростанций, различные шлаки и прочие отходы металлургических и горных производств (Бронева, Лапкин, 2001).

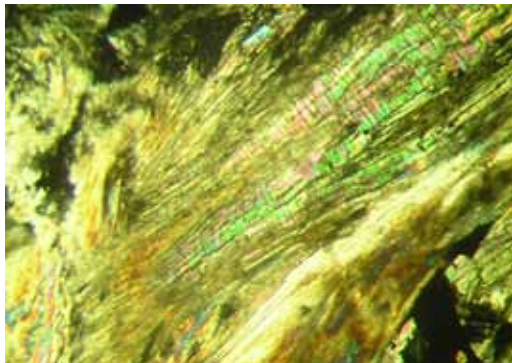
Кварц-глиноземистые породы, представленные **минералами группы силлиманита**, служат сырьем для нового бурно развивающегося электротермического производства алюминиевых сплавов и силумина. Требования к химическому составу электротермического сырья весьма высоки. Согласно А. К. Быкову (1976), в нем должно содержаться:  $Al_2O_3$  не менее 38% для каолинов и 57% для кианит-силлиманитовых концентратов,  $Fe_2O_3$  не более 0,7%,  $CaO+MgO$  не более 1%,  $Na_2O+K_2O$  не более 1%,  $TiO_2$  не более 0,8%. Промышленное месторождение должно содержать не менее 10 млн. т таких руд.

Высокоглиноземистые кианит-силлиманитовые концентраты могут быть получены как путем обогащения метаморфических кварц-глиноземистых пород, так и в виде побочных продуктов при разработке россыпей, содержащих эти минералы. **«Чистые» кварц-глиноземистые породы** в природе образуются главным образом путем вторичного метасоматического обогащения кремнием и алюминием метаморфических пород, первоначально обогащенных глиноземистыми минералами (Кориковский, 1967; Огородников, 1975, 1993; Михайлов и др., 1976).

К группе силлиманита относятся следующие минералы:

**силлиманит, андалузит, дистен (кианит) и муллит.**

**Силлиманит** – высокотемпературная полиморфная модификация  $Al_2SiO_5$  ( $Al_2O_3[SiO_4]$ ) – встречается в регионально и термально метаморфизованных первично глинистых породах высоких ступеней метаморфизма; обычно образует тонкие призматические кристаллы или волокна (рис.).



Состав силлиманита исключительно постоянен и почти точно соответствует формуле  $Al_2SiO_5$ , содержит 62,9%  $Al_2O_3$  и 37,1%  $SiO_2$ , имеет ромбическую сингонию, призматического или игольчатого (фибролит) облика, белого, серого, бурого или зеленоватого цвета, обладает совершенной спайностью по (010), твердостью 6-7, удельный вес 3,23-3,24 г/см<sup>3</sup>. Показатели преломления:  $n_p = 1,654-1,661$ ;  $n_g = 1,673-1,683$ ;  $n_m = 1,658-1,662$ ;  $n_g - n_p = 0,020-0,022$ ;  $+2V = 21-30^\circ$ .

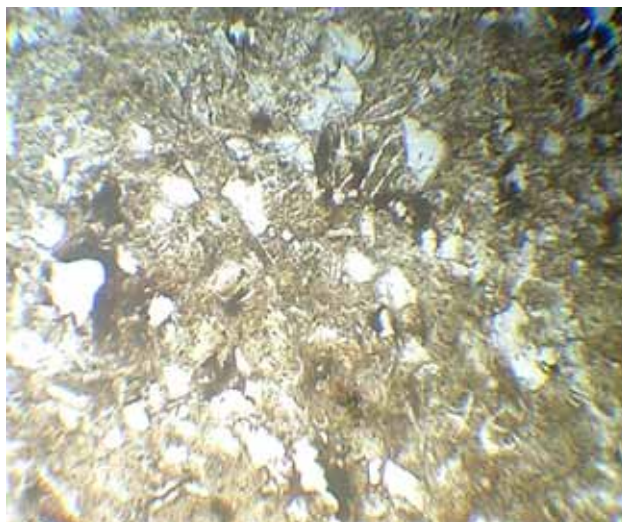
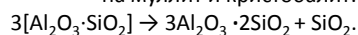


**Андалузит** имеет аналогичный силлиманиту состав и формулу, ромбическую сингонию, образует столбчатые кристаллы (рис. 13), имеющие совершенную спайность по {100}, хорошую спайность по {110}, твердость 6,5-7,5, удельный вес 3,12-3,16 г/см<sup>3</sup>. Показатели преломления  $n_p = 1,629-1,640$ ;  $n_g = 1,638-1,650$ ;  $n_m = 1,633-1,644$ ;  $n_g - n_p = 0,009-0,011$ ;  $-2V = 73-86^\circ$ . Цвет кристаллов в породах серый, бурый, розовый, в оторочках кварцевых жил – красно-коричневый, фиолетово-коричневый.



**Кианит** – минерал метаморфических пород и обычно встречается в гнейсах и сланцах в районах высокобарического метаморфизма. Кианит имеет аналогичный силлиманиту состав и формулу, но имеет триклинную сингонию, представлен призматическими, пластинчатыми, реже игольчатыми кристаллами, имеющими совершенную спайность по {100} и {110}, по {001} развита отдельность. Показатели преломления:  $n_p = 1,712-1,718$ ;  $n_g = 1,727-1,734$ ;  $n_m = 1,721-1,723$ ;  $n_g - n_p = 0,012-0,016$ ;  $-2V = 82-83^\circ$ . Цвет кристаллов серый, синий, зеленый.

**Муллит** (преимущественно продукт обжига) имеет формулу  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  и состав 71,8%  $Al_2O_3$  + 28,2%  $SiO_2$ , ромбическую сингонию, призматические или игольчатые, спутано-волокнистые кристаллы, агрегаты, похожие на силлиманит (рис. 15). Уд. вес. 3,15 г/см<sup>3</sup>, показатели преломления  $n_p = 1,642$ ;  $n_g = 1,654$ . Муллит по кристаллической своей структуре и по большинству остальных своих свойств крайне близок к природному силлиманиту. При прокаливании силлиманита, а равно и других полиморфных разновидностей алюмокремневого ангидрита,  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$  – андалузита и кианита (дистена), а также и каолина, происходит распад их на муллит и кристобалит:



По запасам и ресурсам руд **минералов группы sillimanita** Россия занимает первое место в мире. Разведанные запасы руд стран с наиболее крупной ресурсной базой, таких как ЮАР, США, Индии и Франции, совокупно составляют всего 450 млн. тонн, в России они достигают 4 млрд. тонн, а прогнозные ресурсы достигают 19 млрд. тонн.

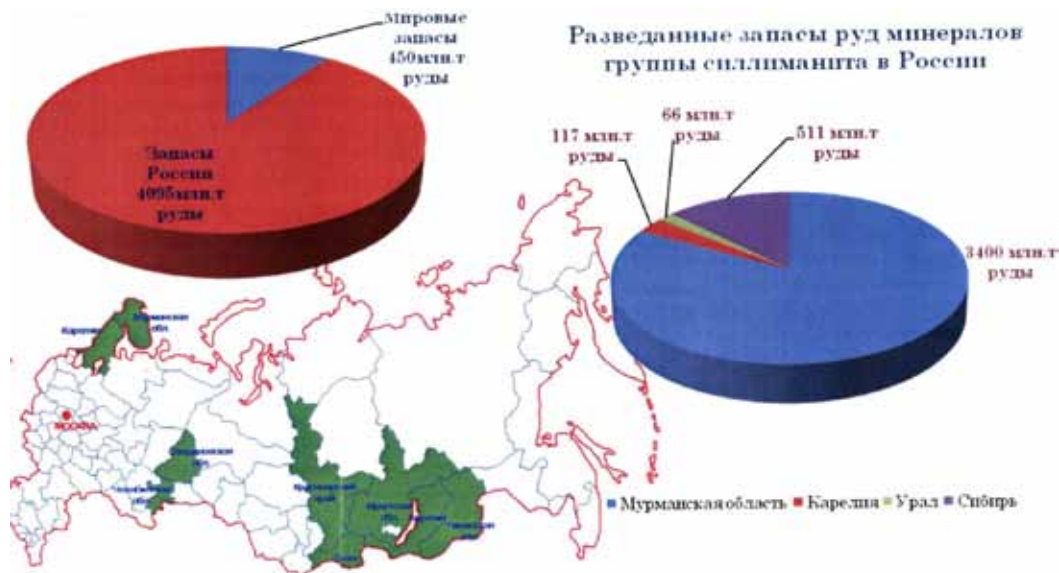
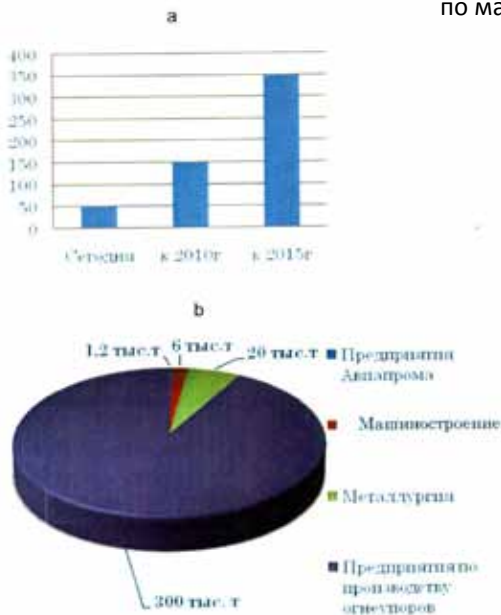


Рис. 16. Разведанные запасы руд минералов группы sillimanita в России (по материалам ОАО «Гранит»)

Потребность в **кианитовом концентрате** на российском рынке (по материалам ОАО «Гранит») в настоящее время оценивается 50 тыс. т, а в перспективе к 2015 г. возрастет до 327 тыс. т (рис. 17).

Рис. 17. Потребность в кванитовом концентрате на российском рынке (а) и перспектива спроса по отраслям (б), по материалам ОАО «Гранит»



Разведанные запасы и прогнозные ресурсы руд, минералов группы sillimanita ( $Al_2SiO_5$ ), глинозема и алюминия в России, тыс. тонн

Район	Руда	$Al_2SiO_5$	$Al_2O_3$	Al
Разведанные запасы (категории C <sub>2</sub> , C <sub>1</sub> , B, A)				
Кольский п-ов	3400000	1186879	676518	358556
Карелия	116820	25000	14250	7553
Урал	66684	11710	6675	3537
Сибирь	511750	13109	74732	39608
Итого	4095254	1236698	772175	409254
Прогнозные ресурсы (категории P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> )				
Кольский п-ов	11000000	3840000	2188230	1159762
Урал	109890	30000	17100	9063
Сибирь	8138400	2588517	1475455	781991
Итого	19248290	6458517	3680785	1950816

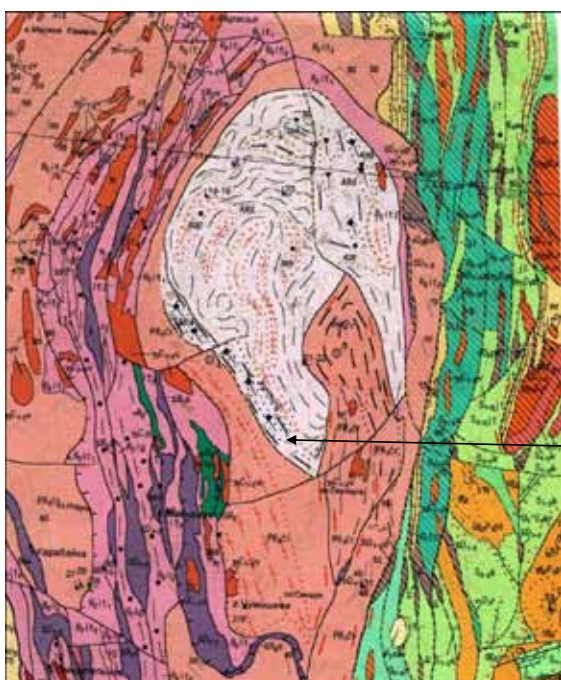
Урал считается типичным палеозойским складчатым поясом. Однако, не менее значительную роль в его развитии играл докембрийский этап, так как из под «уралид» повсеместно обнажаются архейско-протерозойские метаморфические комплексы, которые представляют собой тектонические блоки, как отторженцы Восточно-Европейской платформы – гнейсо-амфиболитовые ядра (по определению Г. А. Кейльмана). Щиты и кристаллические основания древних платформ сложены глубоко измененными породами, которые являются продуктами метаморфизма вулканогенных, вулканогенно-осадочных и осадочных образований (Белевцев, 1990).

Можно наметить две группы продуктивных метаморфогенно-метасоматических пород, обогащенных высокоглиноземистыми минералами:

- 1) стратифицированные горизонты в толще плагиогнейсов раннего архея и протерозоя – **глиноземистая (кианитовая) формация щитов и древних платформ (метаморфогенный, кейвский тип);**
- 2) нестратифицированные метасоматические породы, слагающие внутренние и внешние части шовных зон полифациальных метаморфических комплексов андалузит-силлиманитового и кианит-силлиманитового термодинамических типов, образующихся по разновозрастным, обычно пелитовым породам – **глиноземистая формация складчатых поясов (гидротермально-метасоматический, уральский тип).**

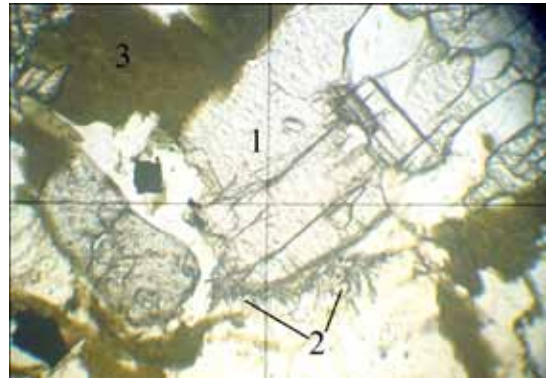
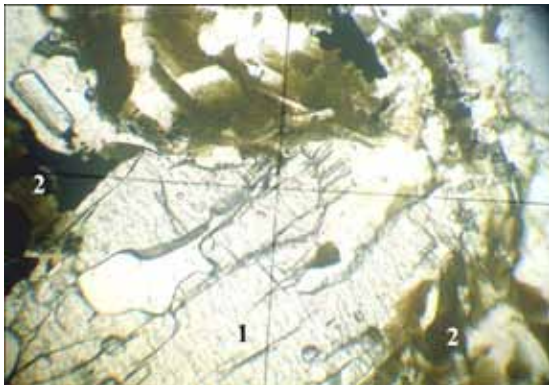
### **ГЛИНОЗЕМИСТАЯ (КИАНИТОВАЯ) ФОРМАЦИЯ ЩИТОВ И ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ (МЕТАМОРФОГЕННЫЙ, КЕЙВСКИЙ ТИП)**

Древнейшие на Урале, **архейские** супракрустальные образования, обнажающиеся на поверхности, картируются в Тараташском (тараташский комплекс) и Сысертско-Ильменогорском (шумихинская и селянкинская свиты) метаморфических комплексах.

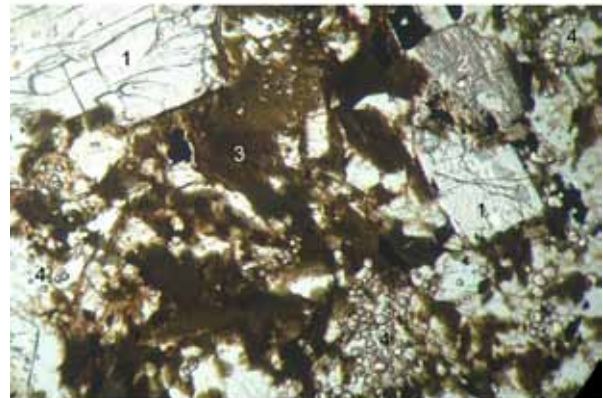
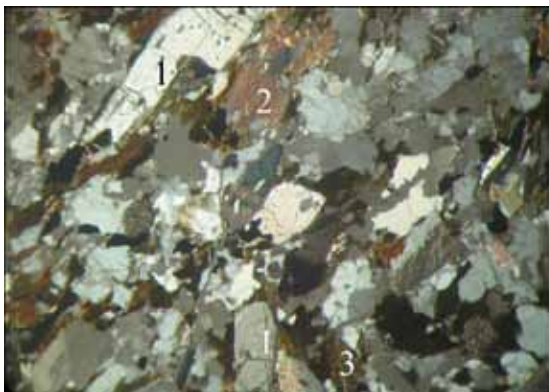


Появление высокобарических парагенезисов в шовных зонах докембрийских метаморфических комплексов (Кольский п-ов, Карелия, Алданский щит, Урал и др.) связано не столько с гидротермально-метасоматическими преобразованиями (изменение кислотности-щелочности) пород глубинными флюидами, сколько с кристаллохимическим фракционированием, обусловленным селективным переходом под давлением в раствор «наименее надежно закрепленных» ионов в кристаллической решетке, которое меняет соотношение химических потенциалов компонентов в твердой и жидкой фазах, определяя, в частности, щелочность-кислотность и другие свойства раствора (Кейльман, 1974; Огородников, 1975, 1993).

Поэтому кианит в плагиогнейсах Уфалейского, Сысертско-Ильменогорского, Кочкарского, Адамовского, Джабык-Карагайского метаморфических комплексов образуется по биотиту (рис. 82), а не по алюмосиликатам полевым шпатам или мусковиту, и минеральная ассоциация создается без кварца, в отличие от гидротермально-метасоматического способа образования кианит-кварцевых зон (рис. 83).



В плагиогнейсах наряду с порфиробластическим *метаморфогенным* кианитом широким развитием пользуется *метасоматический* лучистый кианит. Образование лучистого кианита сопровождается окварцеванием и появлением марганцевого граната (рис. 92). Кианитовые гнейсы отличаются повышенным содержанием кианита (3-35 %) и мусковита.



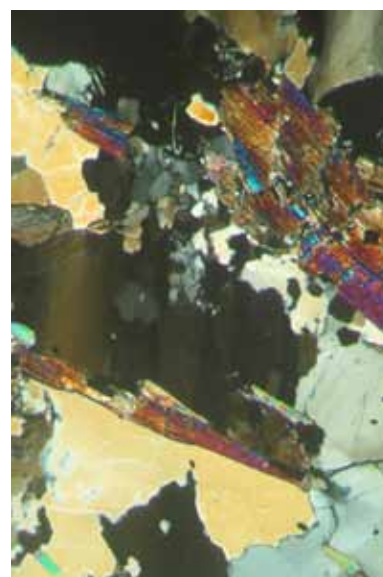
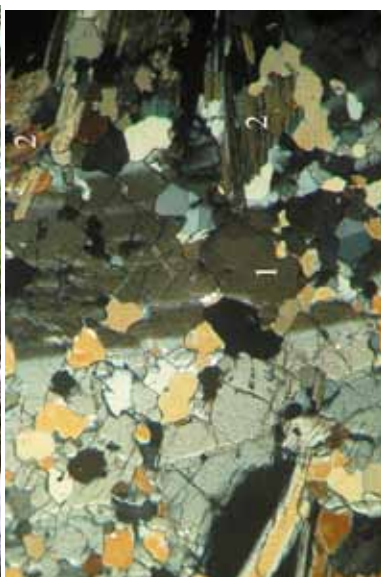
**Кианит** развит довольно широко в пределах сысертско-ильменогорского гнейсово-мигматитового комплекса и его обрамления. Образование его обусловлено, с одной стороны, метаморфизмом осадочных пород, изначально обладающих избытком глинозема (*метаморфогенный тип*), с другой - кислотным выщелачиванием, приводящим к относительному обогащению пород  $Al_2O_3$  при отчетливом выносе из них таких компонентов, как Fe, Mg, Ca, Na, K (*гидротермально-метасоматический тип*). Развитие метасоматического кианита всегда сопровождается появлением мелкокристаллического розового граната (рис. 94). Прогнозные ресурсы кианита оцениваются по категории  $P_1$  в 1,5 млн.т.

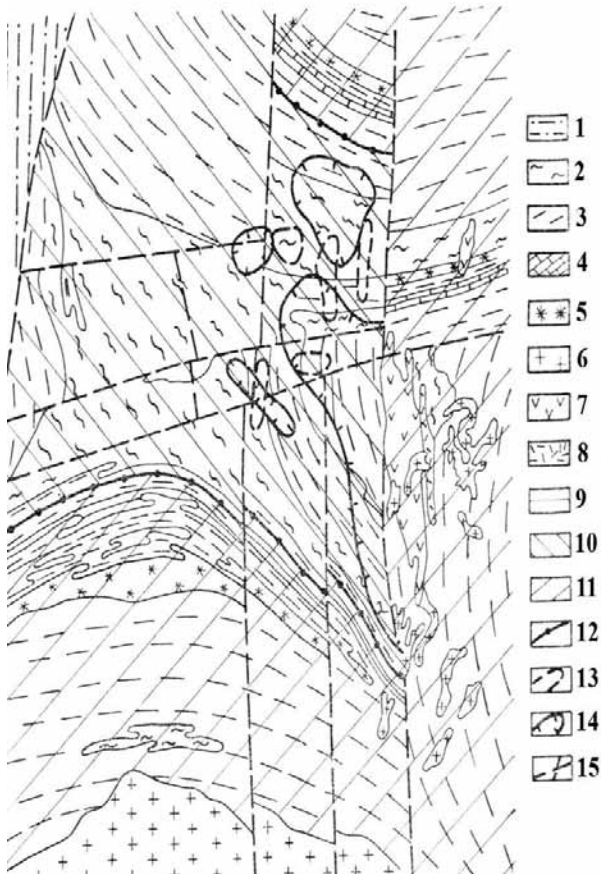
Образования **нижнего протерозоя (PR<sub>1</sub>)** картируются в пределах Уфалейского (уфалейский комплекс – егустинская и слюдяногорская свиты), Сысертско-Ильменогорского (вишневогорская и черновская), Салдинского (салдинский комплекс – бродовский и емехский подкомплекс), Мурзинско-Адуйского (адуйский комплекс), Кочкарского (еремкинская толща), Джабык-Карагайского (джабыкский комплекс), Адамовского (яршалинская толща) и др.



В **Уфалейском метаморфическом комплексе** выделены *егустинская свита* амфиболитов с прослоями амфиболовых и биотитовых плагиогнейсов мощностью более 1800 м и *слюдяногорская свита* амфиболитов, амфиболовых и биотитовых плагиогнейсов с прослоями кианит-слюдяно-кварцевых сланцев, кварцитов (в том числе и с кианитом) общей мощностью 1700 м (Кейльман, 1974), где известно Карабашское кианитовое месторождение (рис. 97), включающее два участка – Уфимский увал и Егустинский (рис. 98).

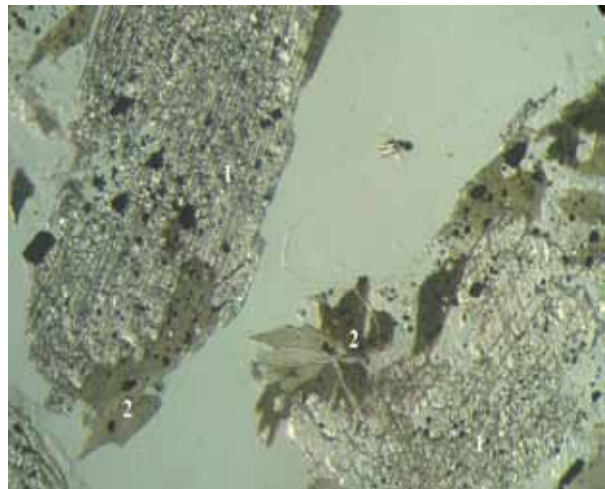
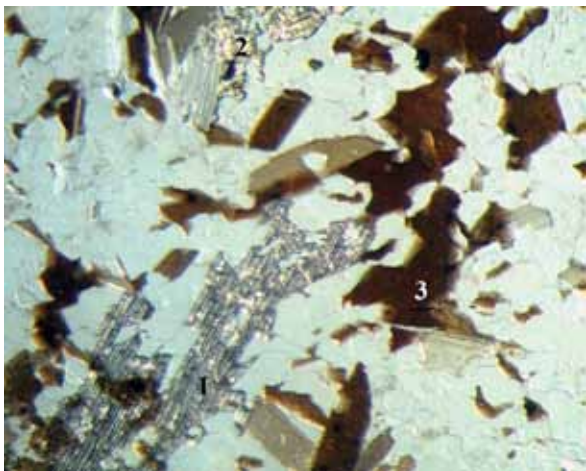
Кианит в гнейсах егустинской свиты (*метаморфогенный тип*) выделяется в виде мелких до 0,5 см призматических бесцветных кристаллов среди бурого биотита, нередко нарастает на ставролит. Кианит-мусковит-кварцевые сланцы представляют собой прослои, имеющие мощность от 30 до 70 м, прослеживаются по простиранию на расстояние до 15 км. Среди этих сланцев наблюдаются скальные выходы кианитовых кварцитов (*метасоматический тип*) в виде линз и прослоев переменной мощности, обычно не превышающей 10 м в виде гребневидных выходов (рис.). Кварциты содержат в большом количестве радиально-лучистый метасоматический кианит, который в ассоциации с кварцем замещает порфиробластический метаморфогенный кианит (рис.). По данным поисково-разведочных работ ЮУГРП (1986-1989 гг), прогнозные ресурсы кианита (силлиманита) на Егустинском участке по категории P<sub>1</sub> составляют 713, по категории P<sub>2</sub> - 206 тыс. тонн, на участке Уфимский увал: P<sub>1</sub> – 3750 тыс. т.





При картировании метаморфической зональности Кочкарского метаморфического комплекса была установлена выдержанная последовательность изоград от центра к периферии: силлиманит (кианит) – ставролит – гранат – биотит – хлорит (Болтыров и др., 1973; Огородников, 1975, 1993; Огородников и др., 2004). При внимательном рассмотрении оказывается, что каждый индекс-минерал, как правило, появляется в двух модификациях, образуя две «изограды появления»; одна обусловлена метаморфизмом, другая – гидротермально-метасоматическими процессами (рис. 115). Последние прогрессивно накладываются на продукты метаморфизма так, что во внешнюю зону выходят минеральные ассоциации, отвечающие более высокому фациальному уровню внутренней зоны (Кейльман, 1974; Кейльман и др., 1976; Огородников, 1975, 1993; Огородников и др., 2004).

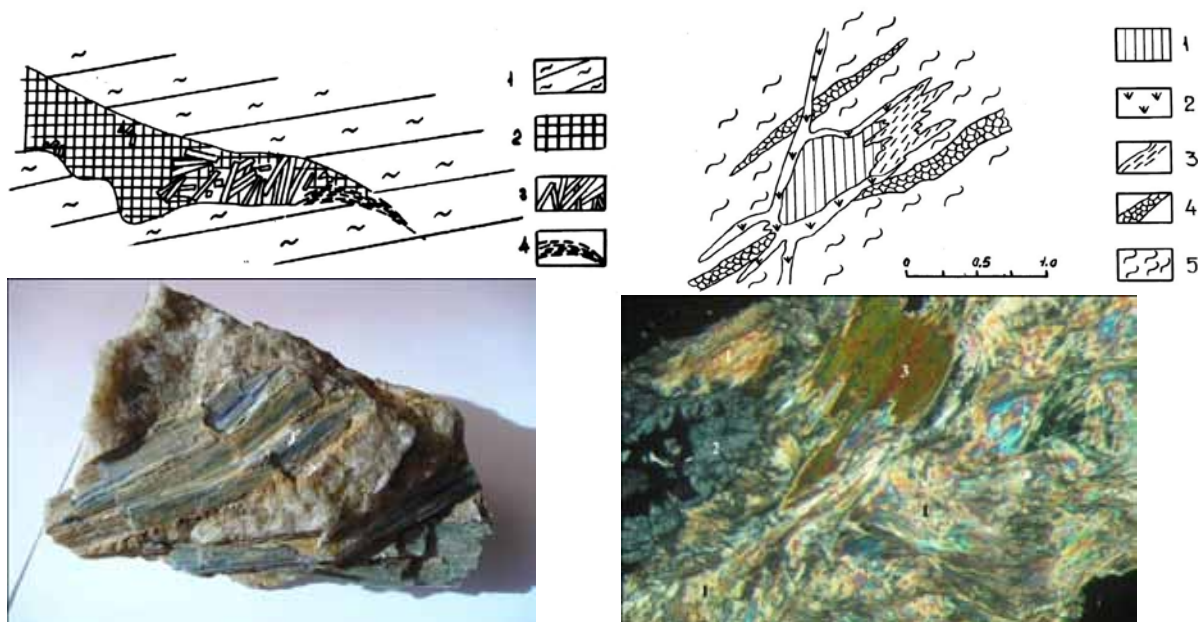
Метаморфогенный кианит появляется вблизи изограды силлиманита, нередко совместно со ставролитом (рис. 118) в биотит-плаггиоклаз-кварцевых сланцах. Метаморфогенный кианит в плаггиогнейсах преимущественно развивается в прослоях, обогащенных биотитом, замещая его (рис. 119). Несколько необычное замещение обусловлено неустойчивостью  $K^+$  в кристаллической решетке биотита при высоких давлениях вследствие его большого ионного радиуса и слабой связи с ионами гидроксила (Bassett, 1960).



Метасоматический кианит, силлиманит и андалузит развивается в тех же зонах, что и метаморфогенный, или в тектонических зонах на значительном удалении от метаморфической изограды кианита, силлиманита – в результате последующих преобразований с формированием отчетливой метасоматической зональности, не зависящей в главных чертах от состава вмещающих пород и уровня их метаморфизма. В результате образуются кварцевые жилы с порфиробластическим голубым кианитом, силлиманитом или андалузитом в зальбандах (рис. 120).

**Кианит**

**Силлиманит**



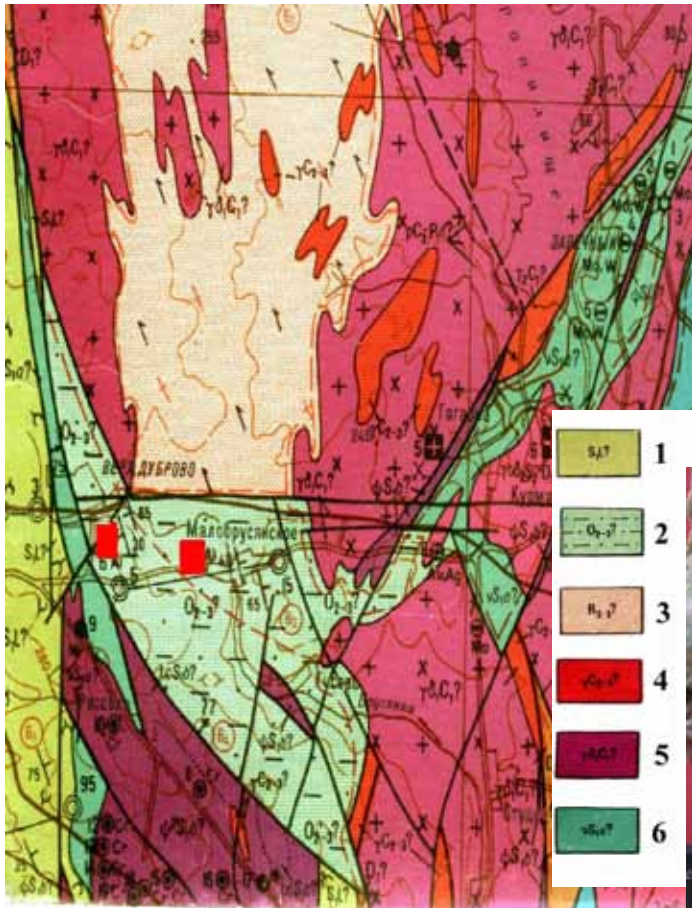
**Глиноземистая формация складчатых поясов (гидротермально-метасоматический, уральский тип).**

Кианит метасоматический развивается в тектонически ослабленных шовных зонах с образованием отчетливой метасоматической зональности, которая не зависит от состава и уровня метаморфизма исходных пород. Во внешней зоне колонки обычно развиты метасоматиты мусковит-кварцевого состава, которые постепенно переходят в мусковит-кианитовые (силлиманитовые), а затем в кианитовые кварциты нередко с силлиманитом, что свидетельствует о давлении не ниже 6 кбар и температурах выше 650 °С (Огородников, 1993).

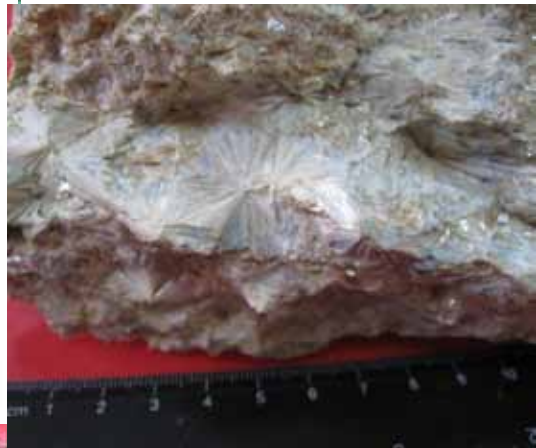
**Малобрусянское месторождение кианита.**







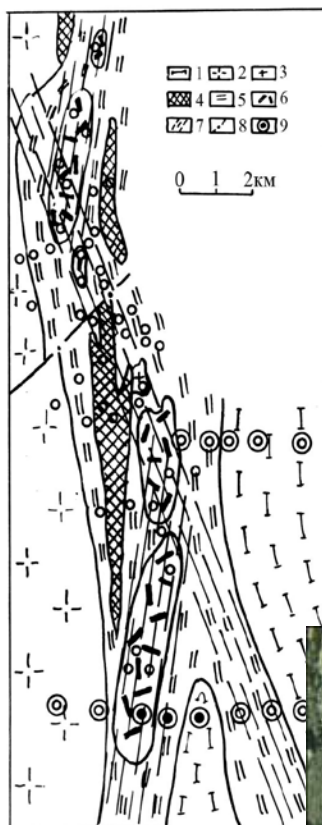
Кианитовые кварциты представляют собой плотные породы, разбитые трещинами отдельности на крупные блоки (см. рис. 142). Кианит распределяется в кварцитах неравномерно: от единичных зерен до 40 – 50 %. В зонах высокой концентрации кианита, последний кристаллизуется в виде радиально-лучистых агрегатов светло-голубой окраски (рис. 144). Кианит образует радиально-лучистые агрегаты в кварците, в котором по границам зерен наблюдаются скопления пылевидного магнетита (рис. 145), реже появляется зерна рутила, пирита, гематита.



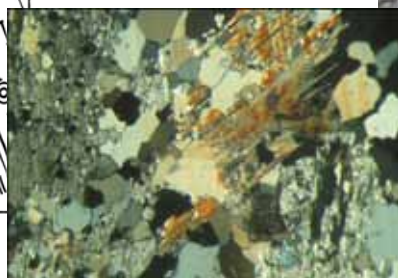
#### **Борисовское месторождение кианита**

находится в Кочкарском районе Челябинской области к югу от пос. Борисовского. Месторождение представляет собой небольшую меридиональную гряду, известную под названием «Борисовских сопок», длиной около 5-6 км и шириной 0,5-1,0 км. Поперечными долинками гряда расчленена на несколько более или менее обособленных участков, причем наиболее резко выделяются три горки (сопки), вершины которых сложены кианитовыми кварцитами или монокварцитами (рис. 126, 127).

**Месторождение Борисовские сопки**

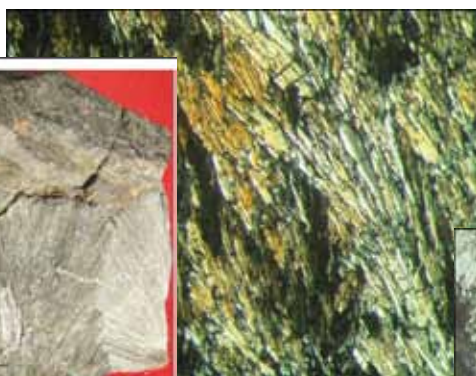


Борисовские сопки представляют собой шовную высокобарическую зону и метасоматическую зональность с кианитовыми кварцитами в центре. Кианитовые руды представлены порфиробластическим типом. Руды претерпели двух этапный метаморфизм и метасоматические преобразования, с чем связано появление радиально-лучистого кианита и высокотемпературного силлиманита по кианиту (фото шлифа)

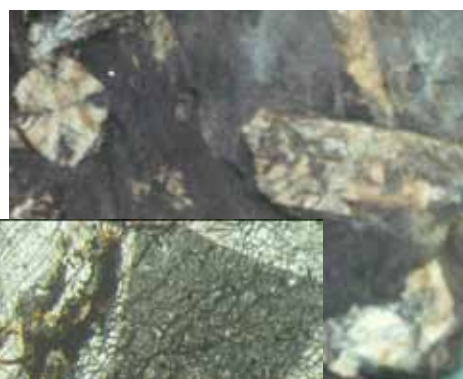


**Кианитовые руды Кольского полуострова (свита Кейв)**

Радиально-игольчатый кианит.

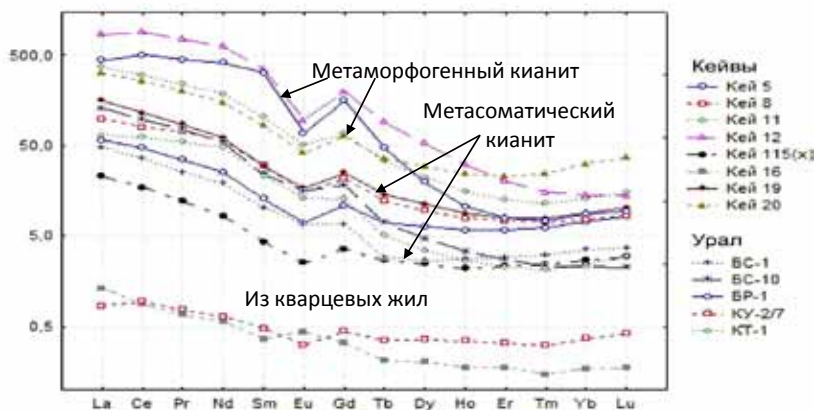
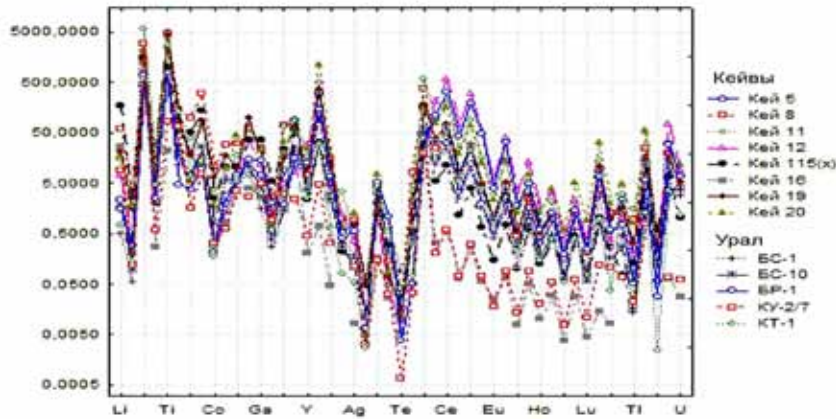


Параморфические руды



Конкреционные руды





Из обзора видно, что кейвские и уральские месторождения кианита сложены однотипными метаморфогенными и метасоматическими рудами. Сравнение их по содержанию редких и редкоземельных элементов показало, что они практически идентичные (рис. ) Наиболее «грязный» - метаморфогенный; пригодный для промышленного освоения является метасоматический (уральский тип).

**Конечная цель проекта – с учетом всей совокупности имеющихся и полученных исполнителями программы данных, обосновать принципиальную возможность освоения месторождений МГС России и создания на их базе промышленных производств концентратов, а затем и промышленных производств высокоглиноземистых огнеупоров, силумина, алюминия.**

Организовать крупномасштабное производство концентратов МГС в короткие сроки невозможно, но с использованием результатов наших исследований вполне реально в течение 2-3 лет освоить месторождение с производительностью МГС в 30-50 тыс. тонн в год. Наиболее благоприятными в этом отношении являются месторождения кианита Урала. Их преимущества: инфраструктура региона развита; месторождения (Абрамовское, Карабашское, Борисовское и др.) находятся недалеко от железных дорог; потребители местные (Магнитогорский, Челябинский, Нижнетагильский металлургические комбинаты, Первоуральский, Богдановичский и Сухоложский огнеупорные, Богословский и Уральский алюминиевые заводы); имеются обогатительные фабрики (Кыштымская, Тайгинская и др.), мощности которых незагружены; потребности в кианитовых концентратах в десятки раз превышают ожидаемые производственные возможности; руды имеют предельно простой минералогический состав и на их базе можно создать безотходное производство концентратов с выделением в качестве товарных продуктов кианита, кварца, слюды, рутила и золота. Ресурсы сырья достаточны для крупномасштабного производства концентратов; на базе кианита и кварца в дальнейшем можно организовать обжиговое, огнеупорное, керамическое, силуминовое, алюминиевое, стекольное и другие предприятия.

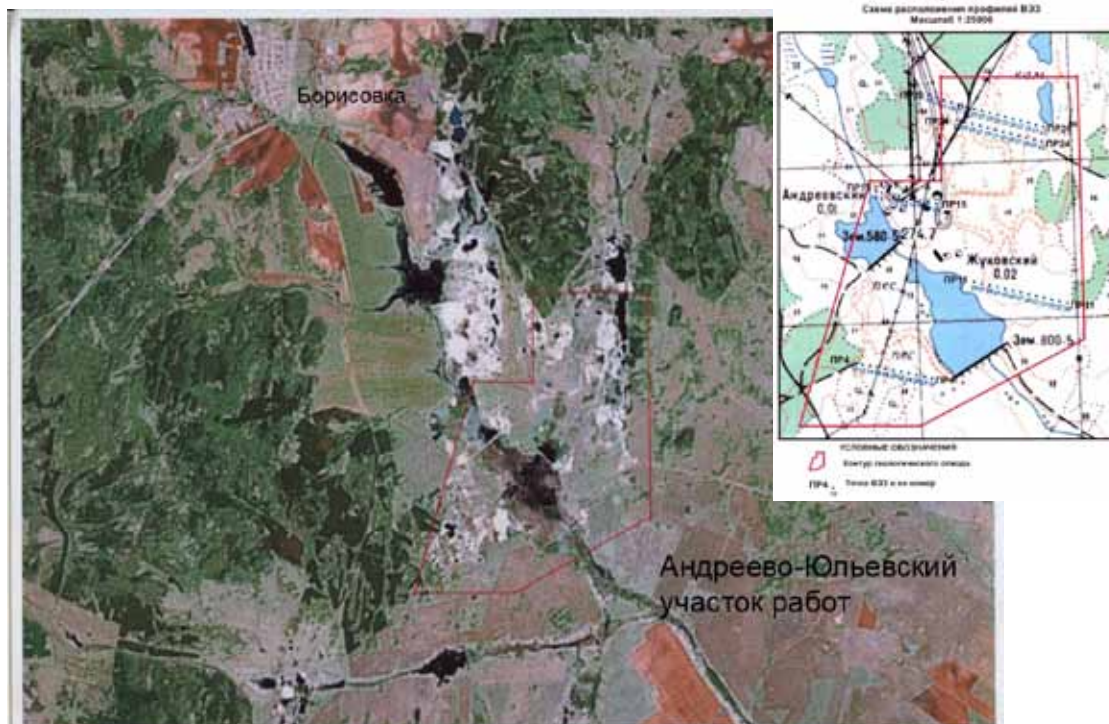


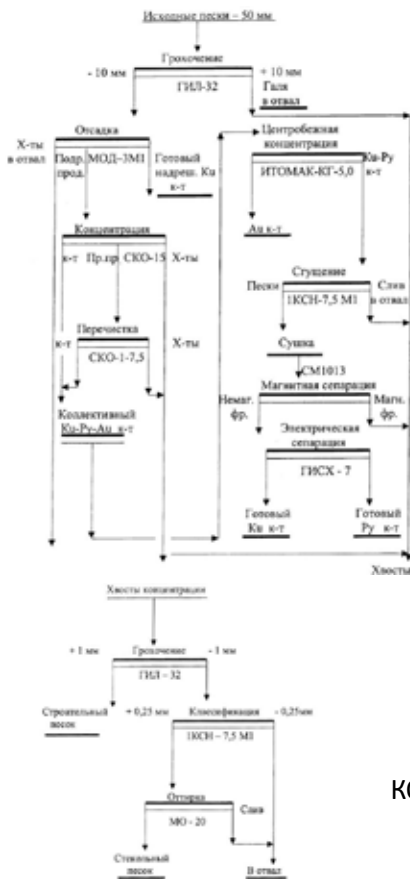
Концентрат кианита из техногенных песков



Панорама техногенных песков Андрее-Юльевской россыпи

Геофизические работы на Андрее-Юльевском участке проводились по договору № 51-09 с ООО «Мингруппсил» с целью выделения и прослеживания погребенных техногенных образований, картирования рельефа коренных пород, определения мощности рыхлых отложений и их расчленения. Участок работ находится в 4 км южнее дер. Борисовка (рис.7)





Технологическая схема  
мокрого обогащения и  
передвижная  
гравитационная установка  
для производства  
кианитовых концентратов и  
попутной продукции

#### КОНЦЕНТРАТОР ЗОЛОТА «ИТОМАК»



Проведенные исследования являются частью пилотного проекта по освоению месторождений МГС с производительностью получения концентрата в 10-30 тыс. тонн в год. Кианитовые концентраты Уральских месторождений ни по каким параметрам не уступают аналогам зарубежных фирм.

Получено заключение ВОСТИО: ***"кианитовый концентрат является перспективным минеральным сырьем для производства качественных мулито-кремнеземистых огнеупорных материалов и изделий"***.

Заключение огнеупорного предприятия Нижнетагильского металлургического комбината: ***«Кианитовый концентрат может быть использован как составная часть в различных алюмосиликатных массах и бетонах непосредственно на металлургических производствах, например, для желобных масс, сталеразливочных и промежуточных ковшей»***.

## НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МИНЕРАЛОГИИ КИАНИТОВЫХ И СТАВРОЛИТОВЫХ СЛАНЦЕВ КЕЙВ

Нерадовский Ю.Н.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

### Минеральный состав кианитовых сланцев

- главные - кианит, кварц;
- второстепенные – мусковит, плагиоклаз, ставролит, графит, диккит, пирротин, пирит;
- минералы-примеси: халькопирит, пентландит, виоларит, магнетит, молибденит, *галенит*, *сфалерит*, золото, *макинавит*, *халькозин*, лимонит, рутил, ильменит, гематит, биотит, хлорит, гранат, клиноцоизит, апатит, циркон, ортит, монацит, хеттанит, титанит, флюорит.

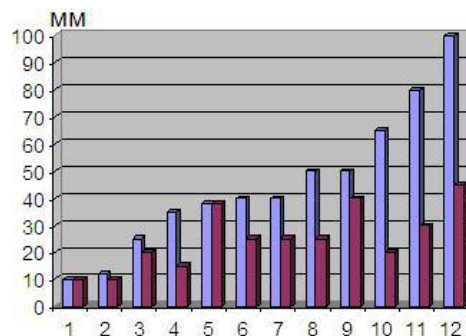
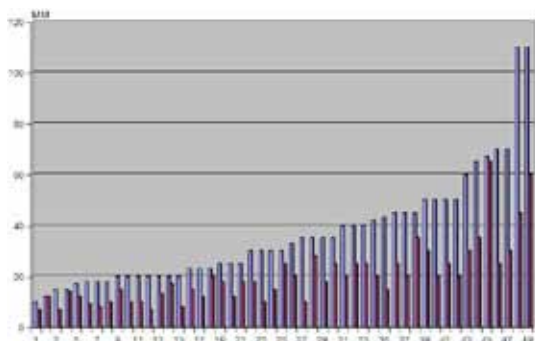
Текстура руды м-я Н.Шуурурта: 1-конкреции, 2-параморфозы, 3- субстрат, 4- кварцевые жилы.



- Кварцевый субстрат-45%(Ку – нет)
- Конкреции-40%(Ку – 75-97%)
- Параморфозы-10%(Ку – 40-85%)
- Кварцевые жилы-5% (Ку – нет)

## Параметры конкреций и параморфоз и размеры зерен кианита.

- Конкреции от 10х7 мм до 110х60 мм, средний размер для 49 измеренных конкреций 36.6х20.3 мм. Размеры зерен кианита 0,05 до 1,0 мм, средний размер чистого кианита составляет 0,1 мм
- Параморфозы от 10х10 мм до 100х4мм, в среднем для 12 измеренных параморфоз 45,4х25,3 мм. Размеры зерен чистого кианита варьируют от 0,2 до 0,6 мм, средний размер 0,3 мм.

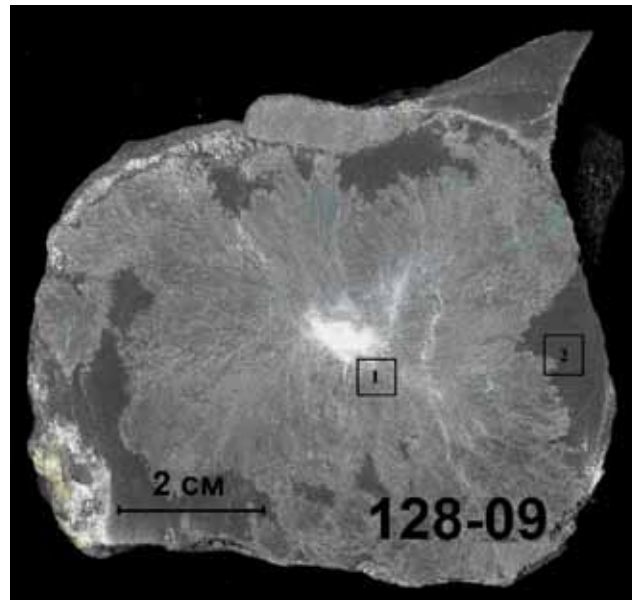


## Химический состав кианита по данным микрозондового анализа

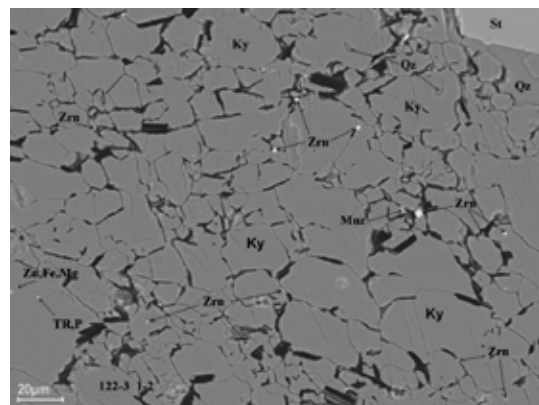
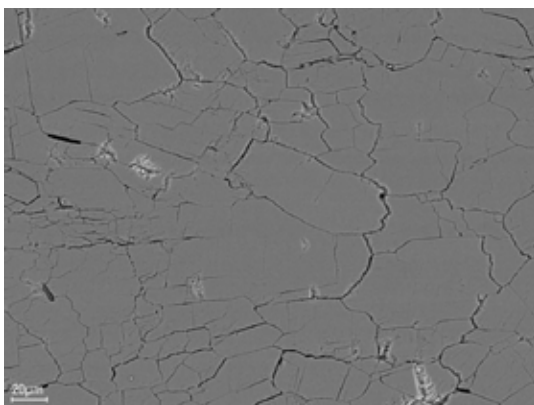
№№/пп	№№/обр	Месторождение	Тип руды	Место анализа	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма
1	122-3	Н.Шуурурта	Конкреционный	Край конкреции	36,87	62,97	99,84
2	122-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Ядро конкреции	36,9	62,94	99,84
3	128-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Край конкреции	37,13	62,95	100,08
4	128-1	Н.Шуурурта	Конкреционный	Центр конкреции	36,49	63,21	99,7
5	121-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Центр параморфозы	36,58	63,16	99,74
6	121-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Центр параморфозы	36,53	63,2	99,73
7	121-6-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Край параморфозы	37,24	62,94	100,18
8	121-6-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Край параморфозы	37,19	62,96	100,15
9	121-6-2	Н.Шуурурта	Конкреционный	Центр параморфозы	37,07	63,09	100,16



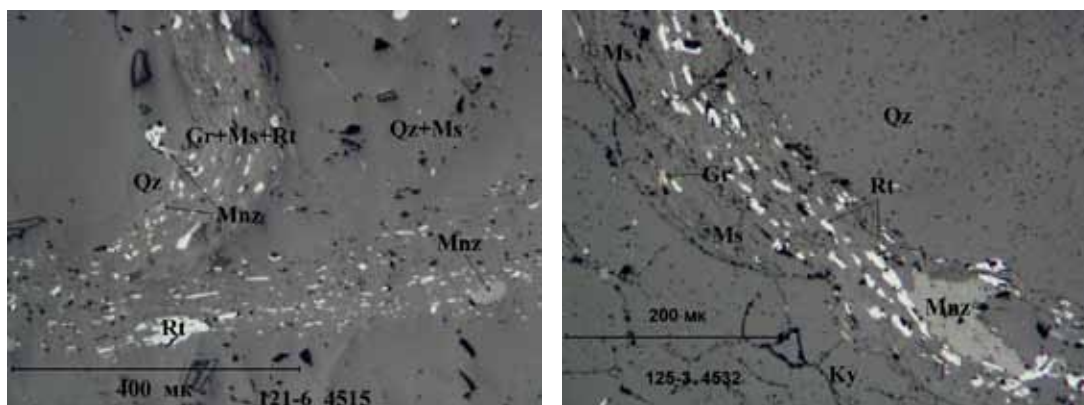
## Разрез конкреции



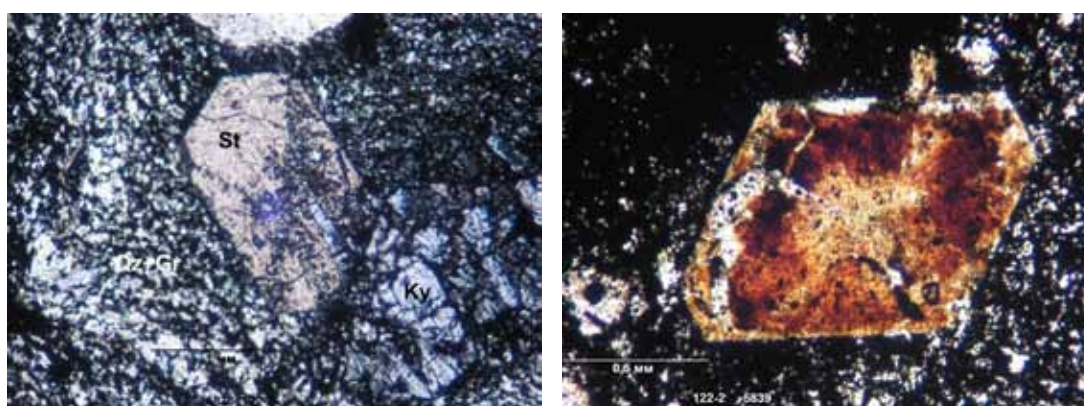
Структура зерен кианита и минералы-примеси в центре и на краю конкреции



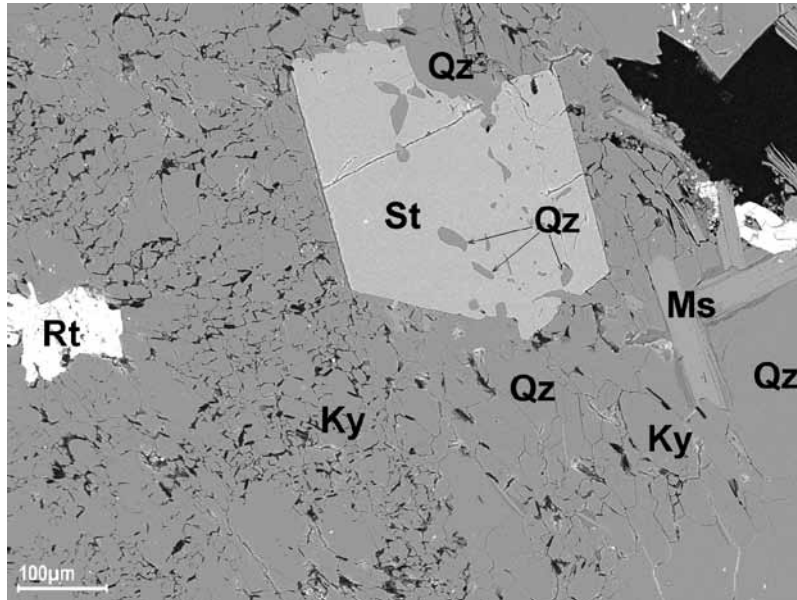
## Жилы с редкими минералами в кварцевом субстрате



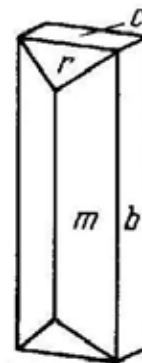
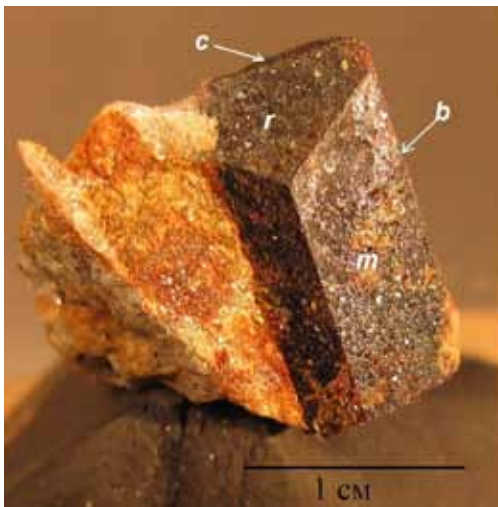
## Цинкставролит в кианитовом сланце



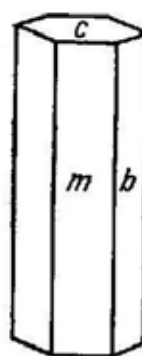
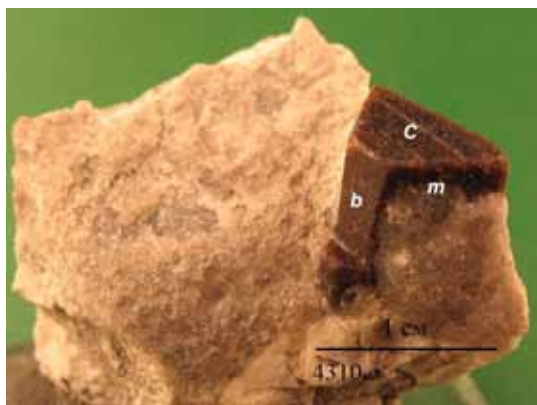
## Метакристалл цинкставролита



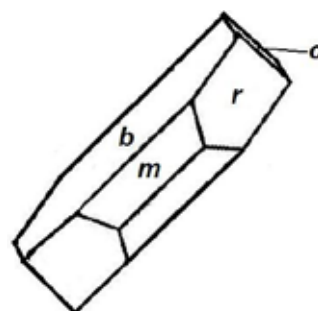
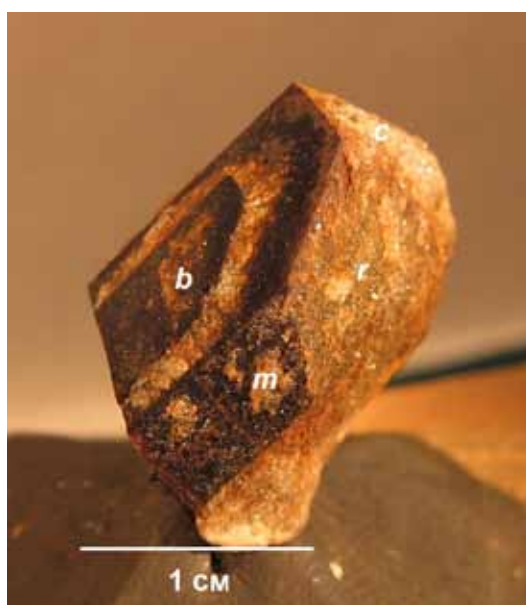
Кристалл ставролита из ставролитовых сланцев:  
Простые формы ( $m, b, r, c$ ) – тип призматический с активным развитием грани  $m$  (110).



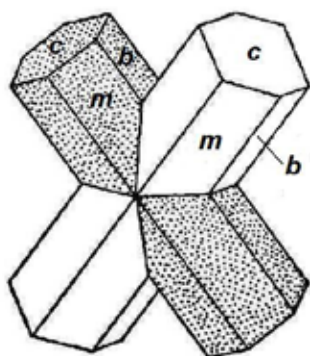
Кристалл ставролита из ставролитовых сланцев: Простые формы  $(c,m,b)$  – тип призматический с активным развитием грани  $c$  (001)



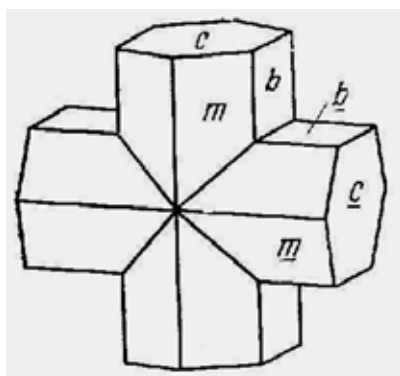
Кристалл ставролита из ставролитовых сланцев: простые формы  $(b,r,m,c)$  – тип пинакоидальный с активным развитием граней  $b$  (010) и  $r$  (201);



Наиболее распространенные косые двойники ставролита по (231)



Редкие крестообразные двойники ставролита по (031)

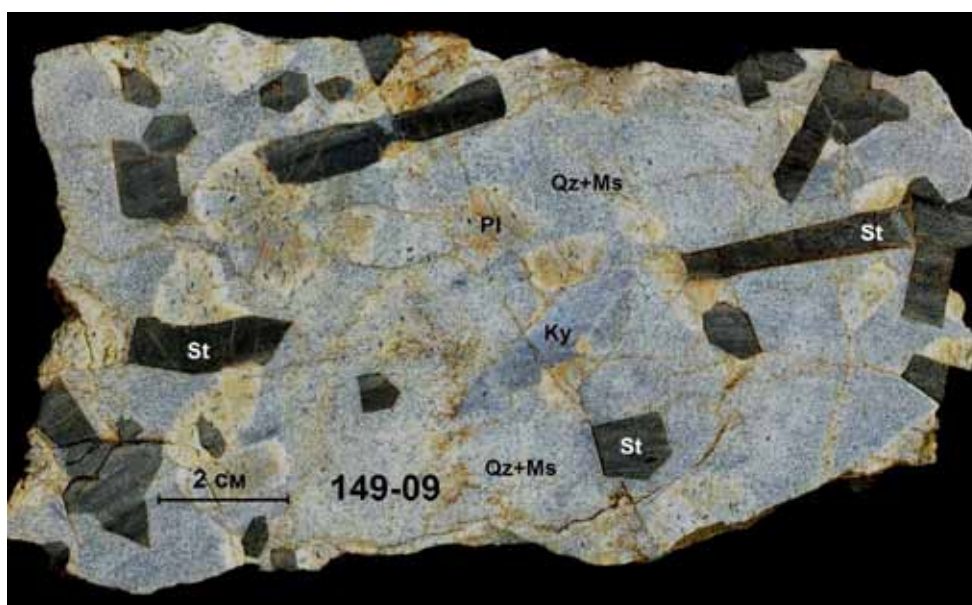


Весьма редкие тройники по (231)

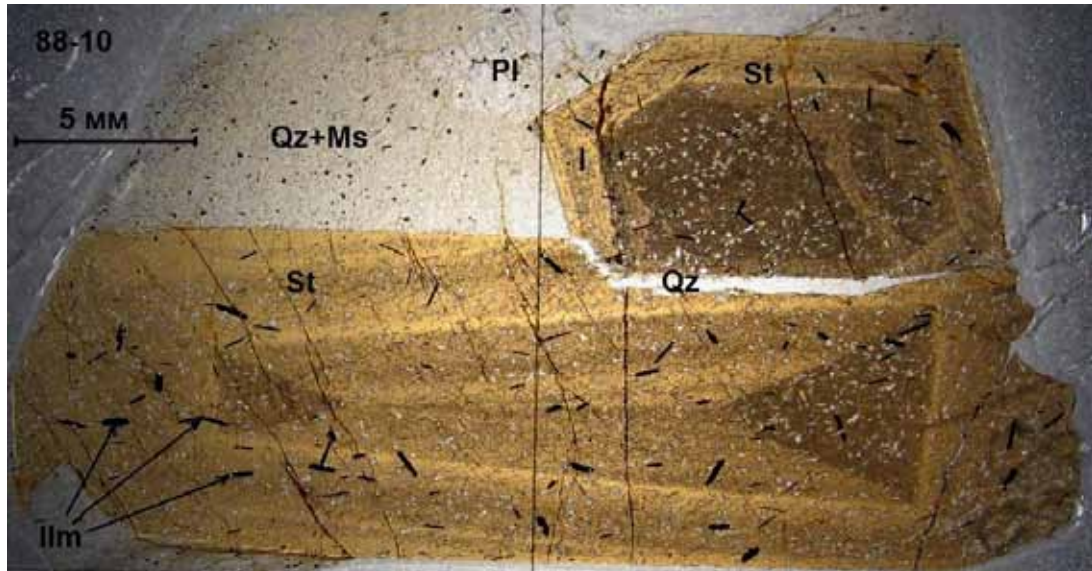
- Упомянуты И.В.Бельковым (1963), есть в музее, в частных коллекциях (Интернет), но пока не описаны в известных справочниках (Минералы, 1972; Федькин, 1975).



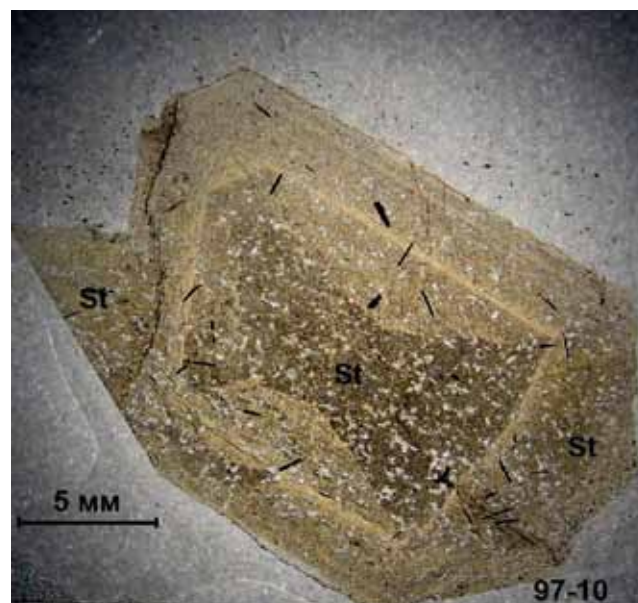
Положение кристаллов ставролита в текстуре сланца



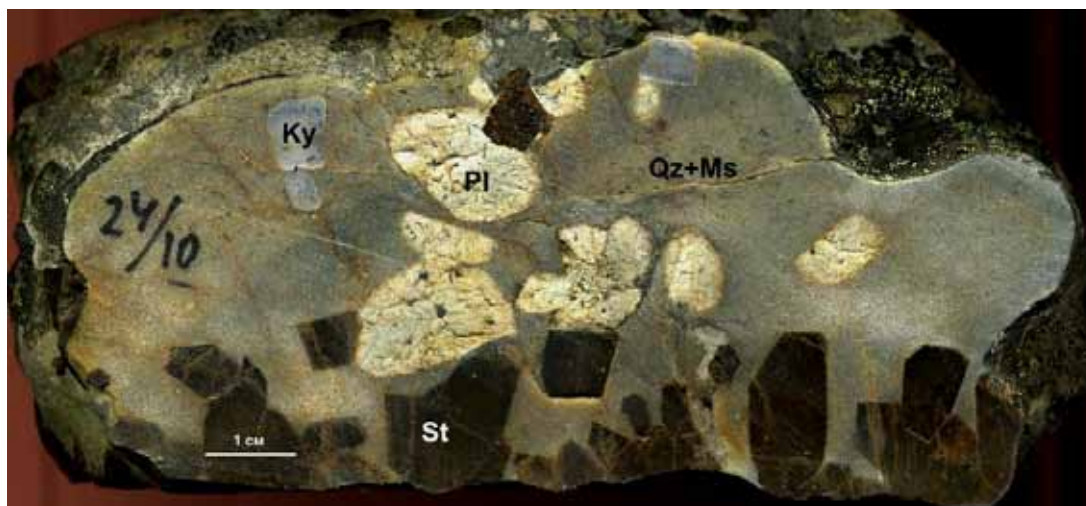
Характерная трехзонная внутренняя структура кристалла ставролита, расположенного вдоль линейной сланцеватости: длинный кристалл, две головки у ядра, вытянутая вторая зона, четкие контуры кристалла. Фото прозрачного крупного шлифа.



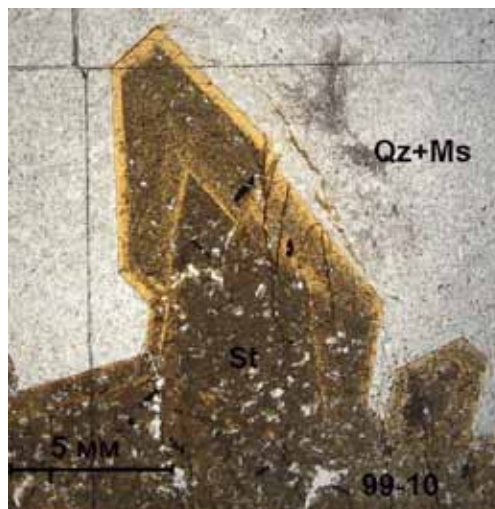
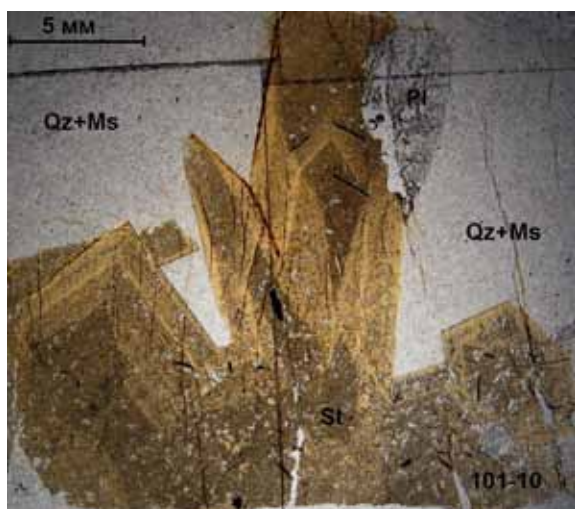
Характерная трехзонная внутренняя структура кристалла ставролита, расположенного косо к линейной сланцеватости: короткий кристалл, ядро в виде песочных часов, четкие зоны обрастания ядра и огранки кристалла. Фото прозрачного крупного шлифа.



## Положение кристаллов ставролита в трещинах

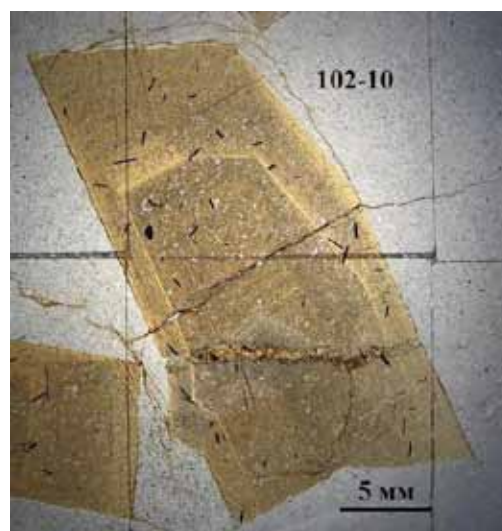
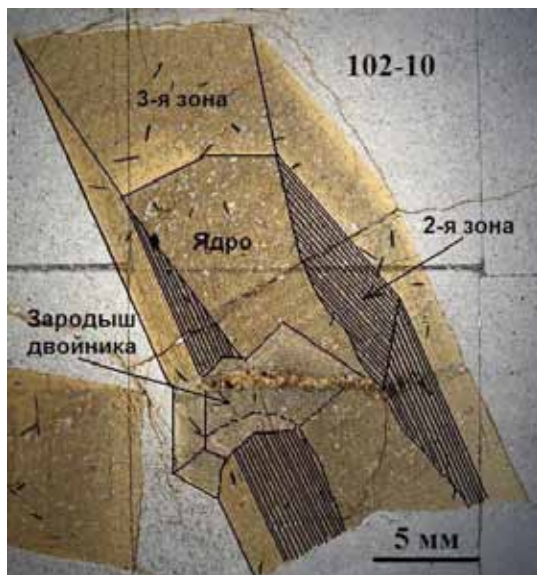


Зональность в кристаллах ставролита (St) из друзовых агрегатов. Видны признаки естественного отбора, развитие граней призмы и пинакоида на завершающей стадии роста кристаллов. Рост кристаллов происходил в мусковит-кварцевом субстрате (Qz+Ms). Фото прозрачных крупных шлифов.

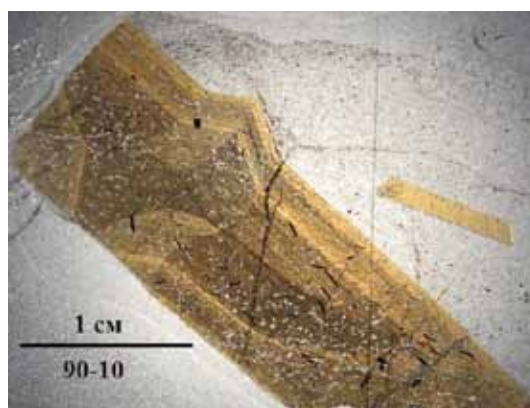
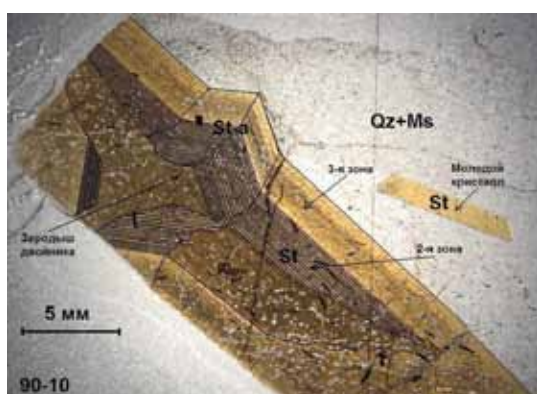




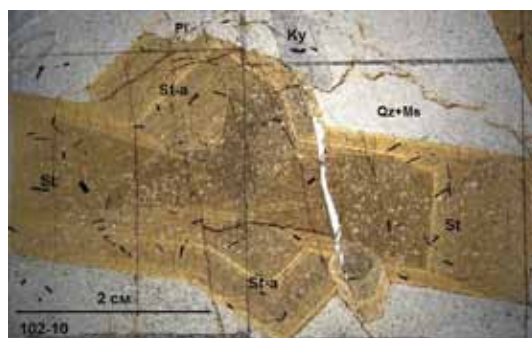
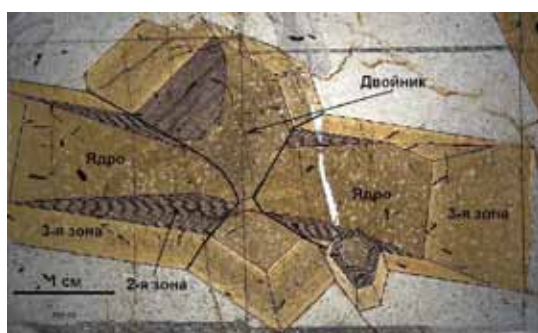
Начальная стадия зарождения двойника: односторонний зародыш двойника в кристалле с растянутым ядром.



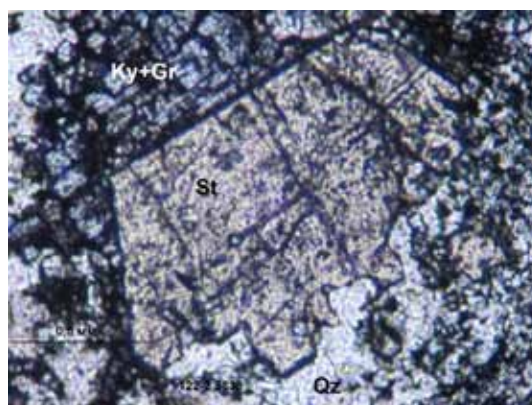
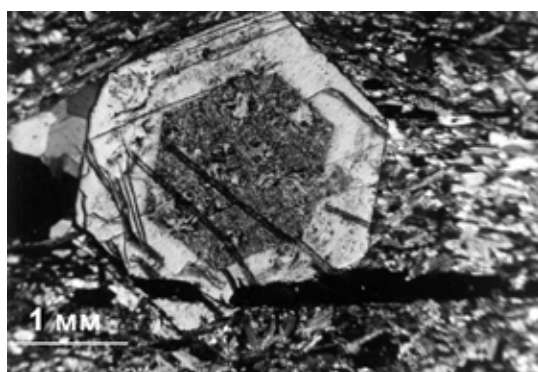
Средняя стадия образование «сквозного» двойника при разрыве ядра



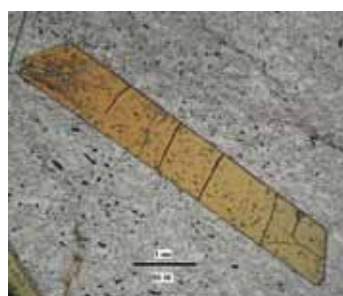
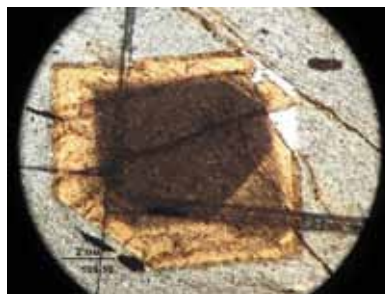
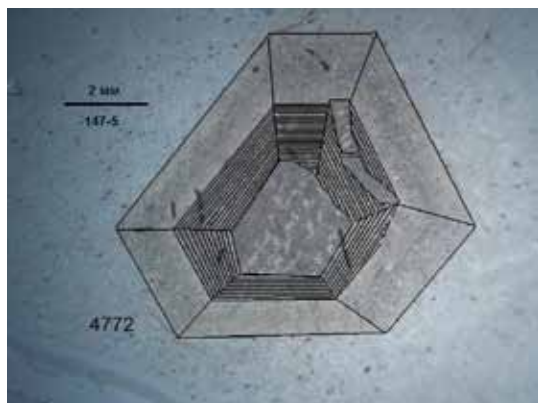
Стадия зрелого двойника: полностью развитый двойник в кристалле с разорванным ядром.



Типы зональности кристаллов ставролита в кинанитовых сланцах



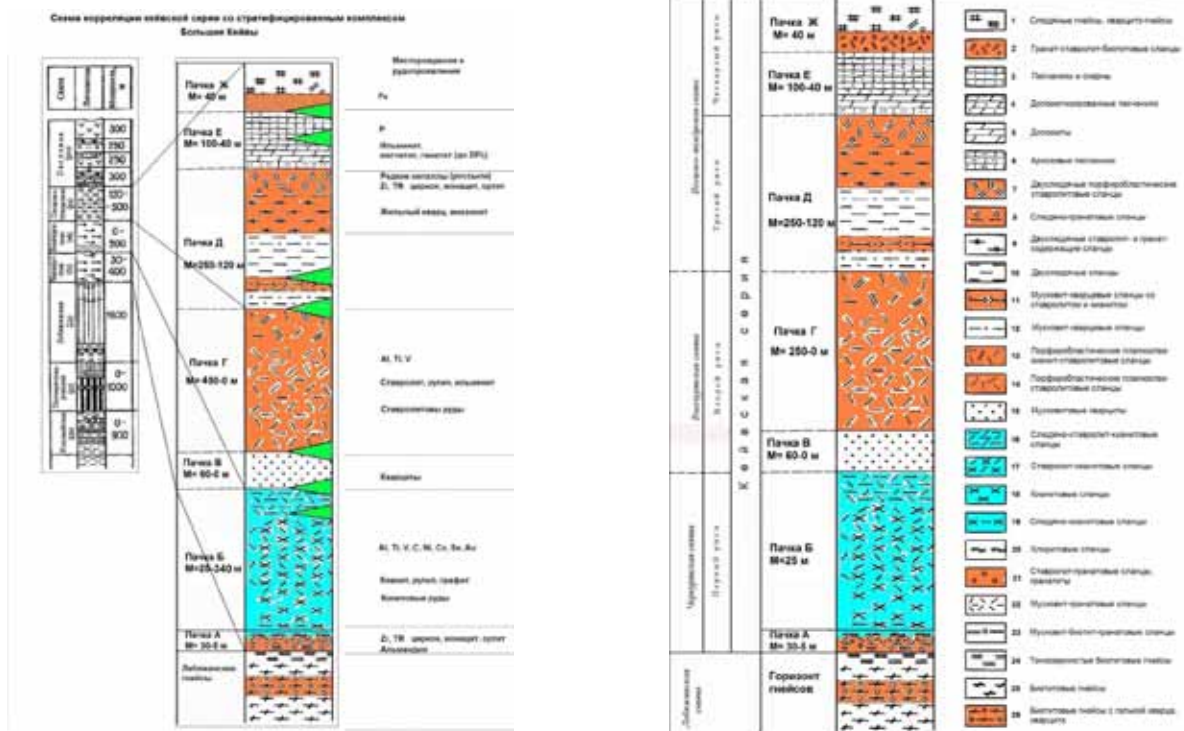
## Типы зональности кристаллов ставролита в ставролитовых сланцах



# Онтогенез ставролита из ставролитовых сланцев Кейв

Нерадовский Ю.Н.

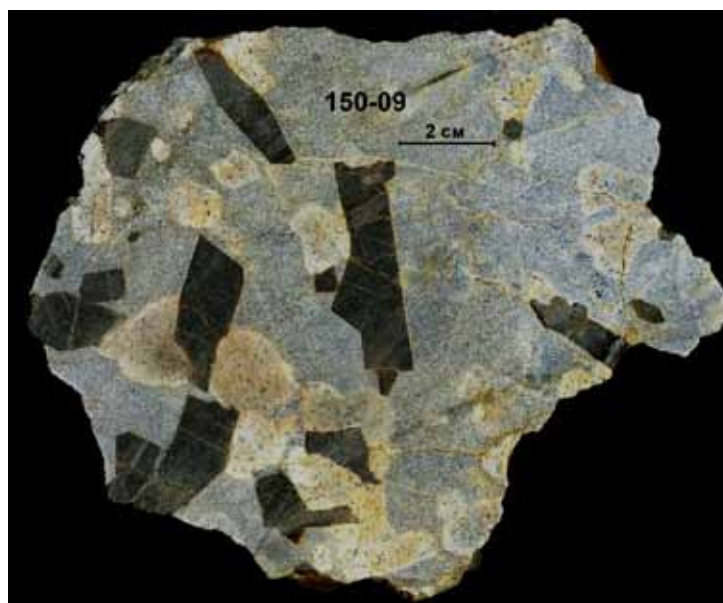
Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты



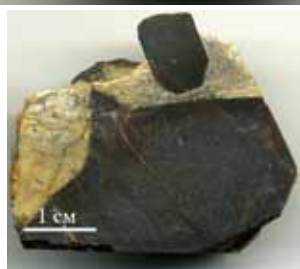
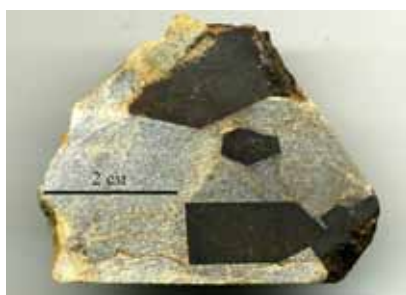
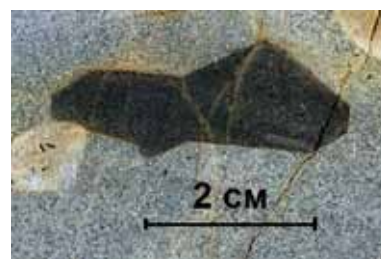
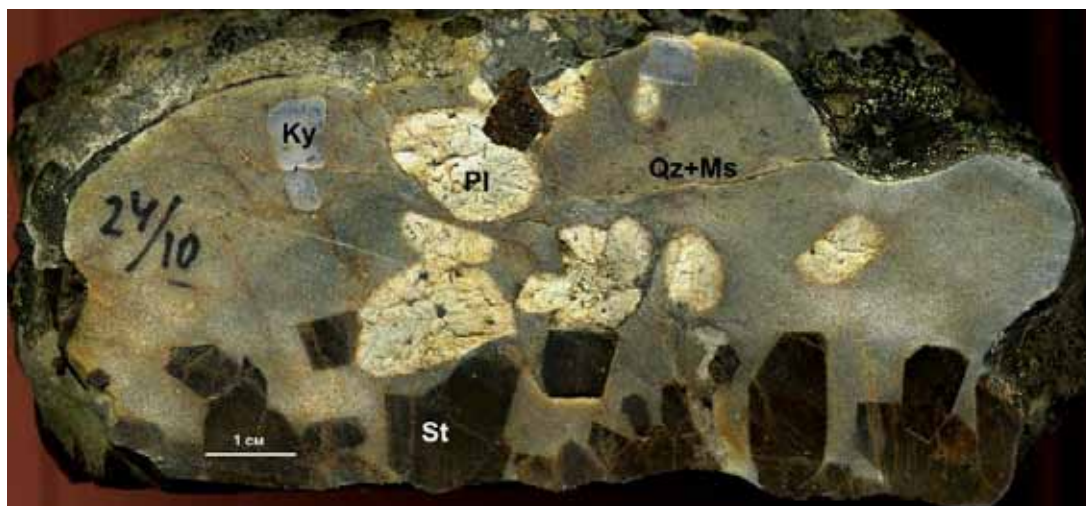
Плагиоклаз-ставролитовые сланцы с порфиробластами ставролита

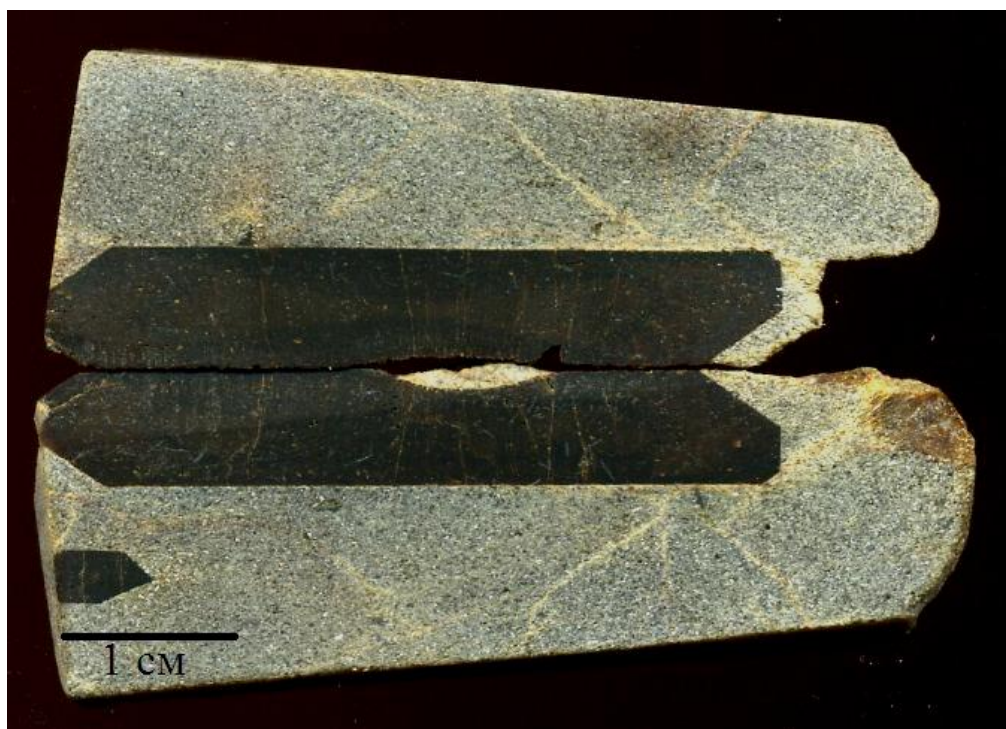
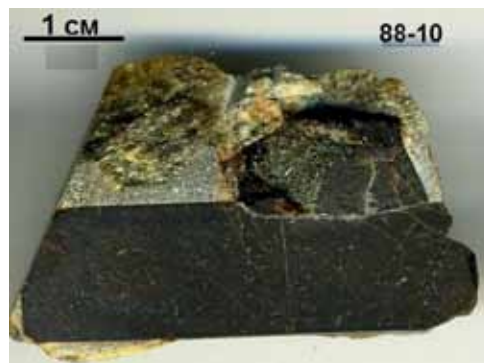
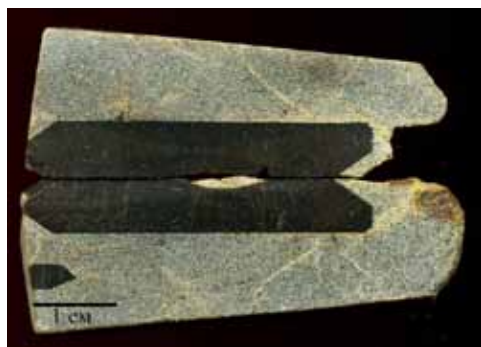
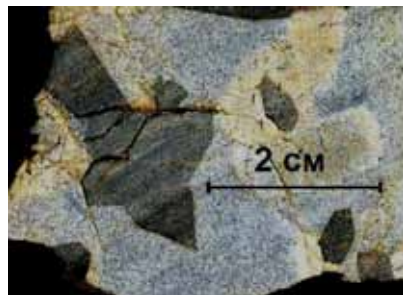
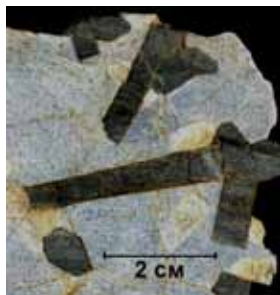


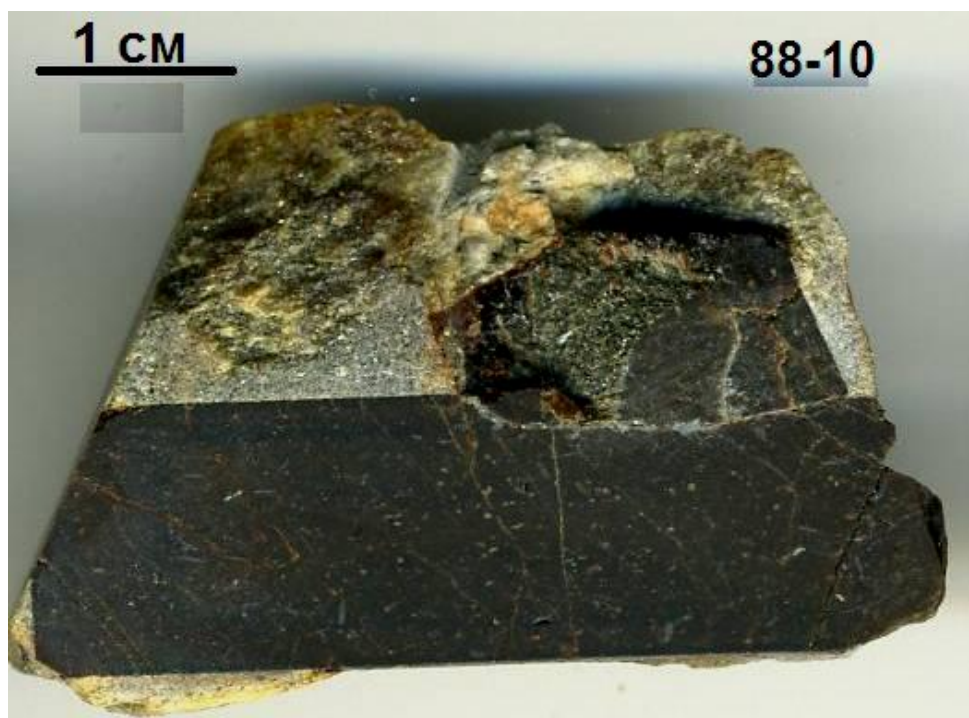
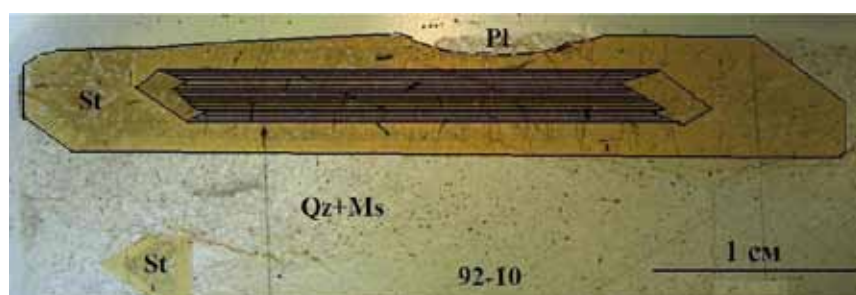
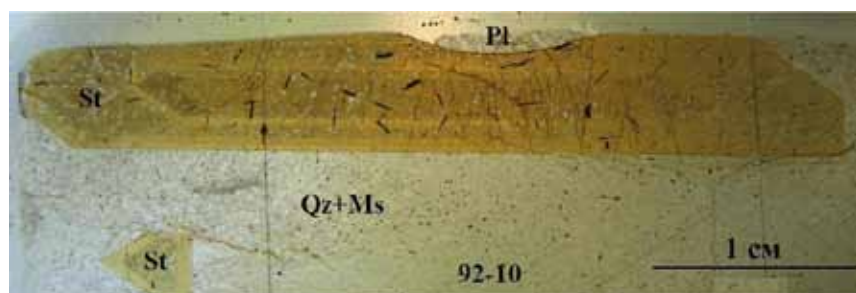
Метакристаллы ставролита и плагиоклаза в плагиоклаз-ставролитовом сланце (срез)



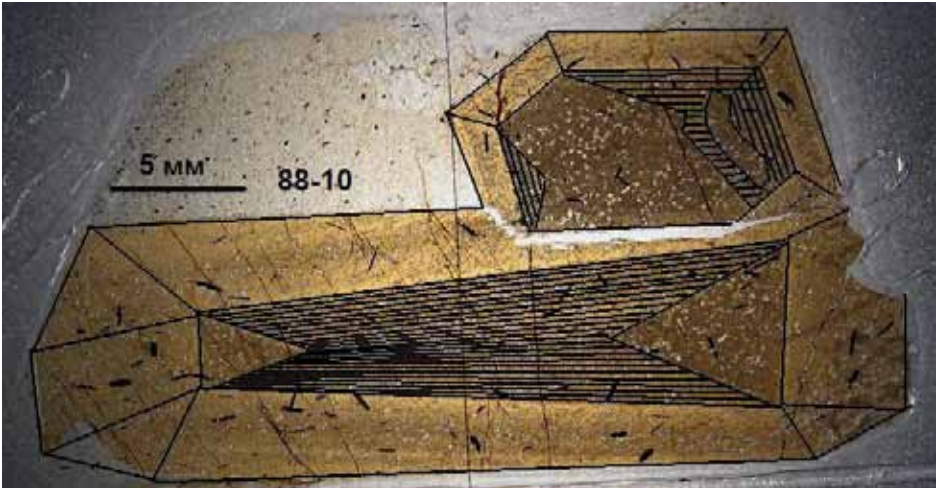
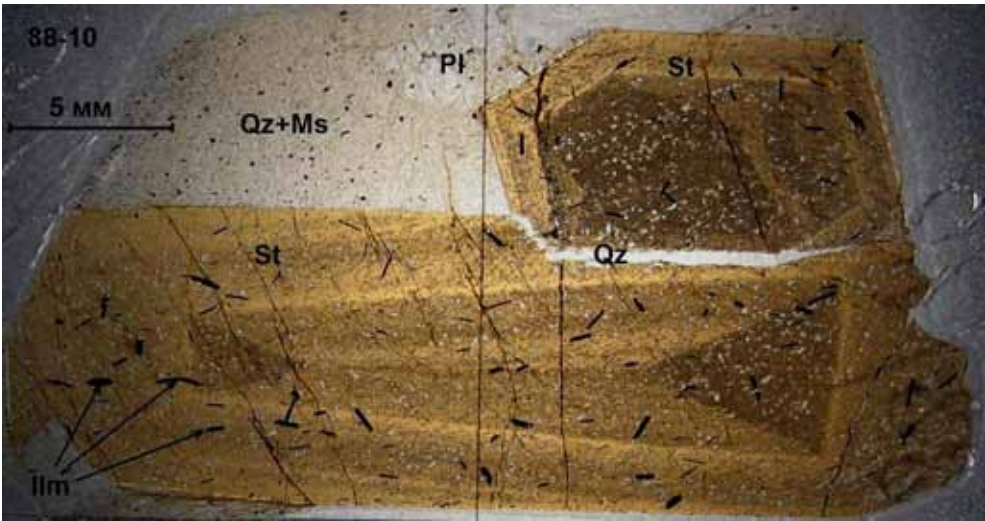
Метакристаллы ставролита, кианита и плагиоклаза в  
кианит-плагиоклаз-ставролитовом сдэнце

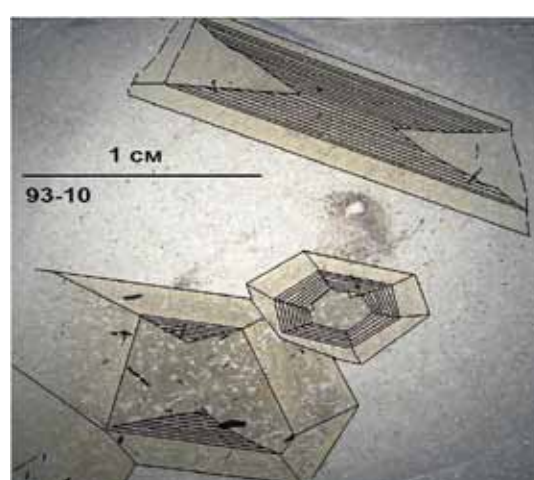
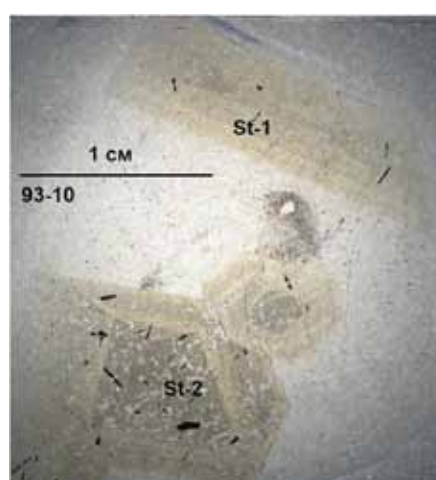












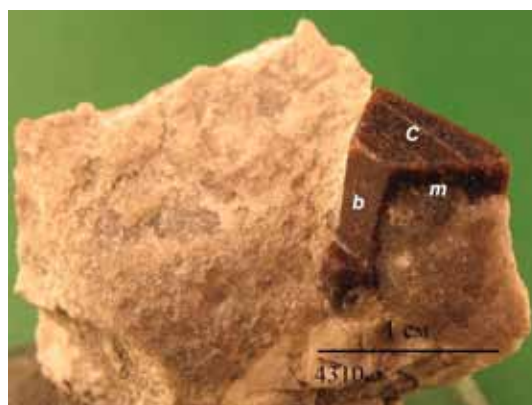
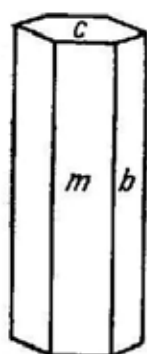
- Особенностью ставролитовых кристаллических сланцев является образование метакристаллов ставролита, кианита, плагиоклаза, биотита и ильменита в мусковит-кварцевом субстрате.

## Ставролит

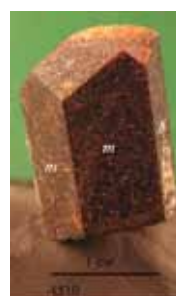
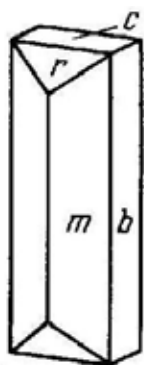
## Кристаллографические формы

Главными кристаллографическими формами ставролита в плагиоклаз-ставролитовых сланцах Кейв являются призмы  $m$  (110) и  $r$  (201) и пинакоиды  $c$  (001) и  $b$  (010), а также двойники по (231) и (031) и тройники по (231). Последние упоминаются И.В.Бельковым (1963), имеются в музее, в частных коллекциях (Интернет), но не описаны в известных справочниках (Минералы, 1972; Федькин, 1975).

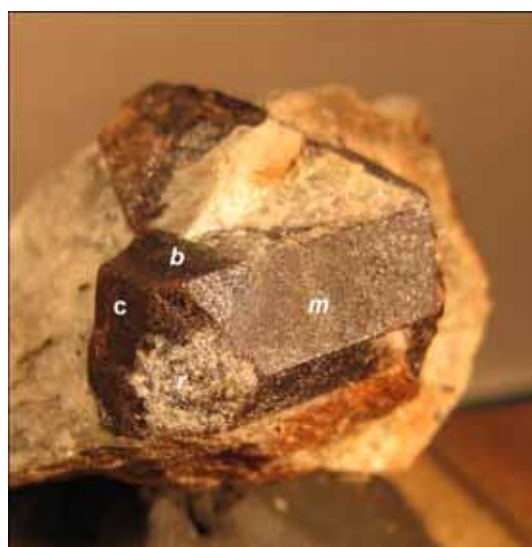
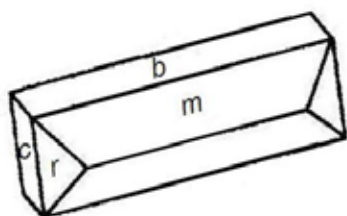
Кристалл с хорошо развитой гранью пинакоида  $c$  (001)



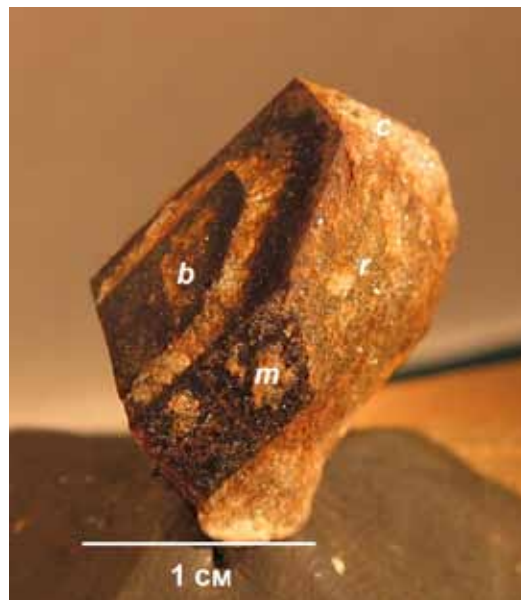
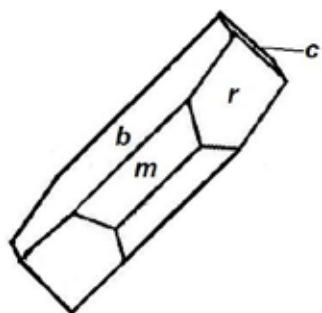
Кристалл с хорошо развитой гранью призмы  $r$  (201)



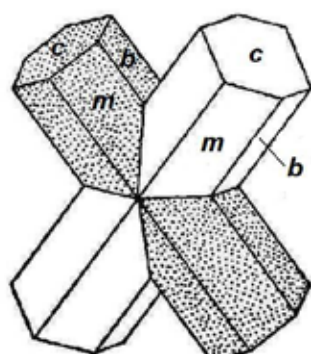
Кристалл с хорошо развитой гранью пинакоида  $b$  (010)



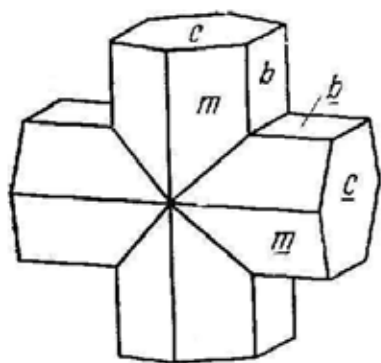
Кристалл с хорошо развитыми гранями пинакоида  $b$  (010) и призмы  $r$  (201). На грани пинакоида  $b$  (010) присутствует выступающий кристаллизационный слой.



Наиболее распространенные косые двойники ставролита по (231)



## Редкие крестообразные двойники ставролита по (031)



## Весьма редкие тройники по (231)

- Упомянуты И.В.Бельковым (1963), есть в музее, в частных коллекциях (Интернет), но пока не описаны в известных справочниках (Минералы, 1972; Федькин, 1975).

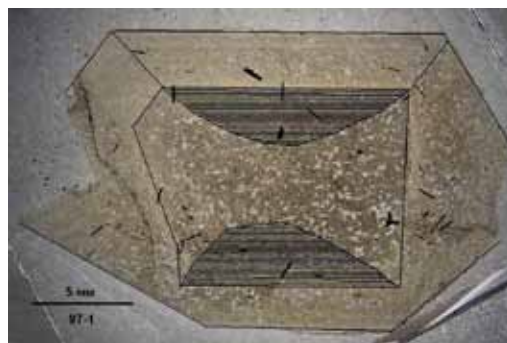
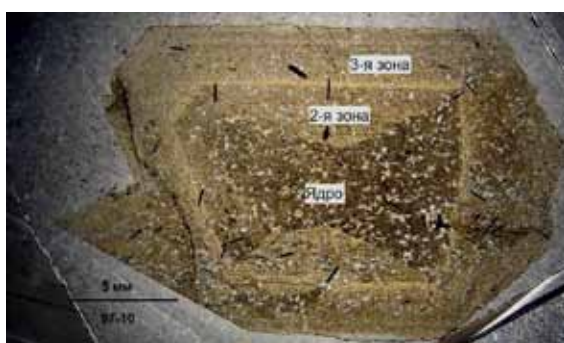


## Типы зональности кристаллов

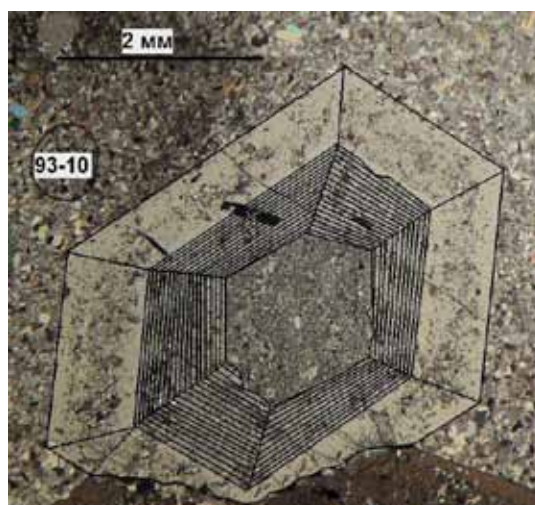
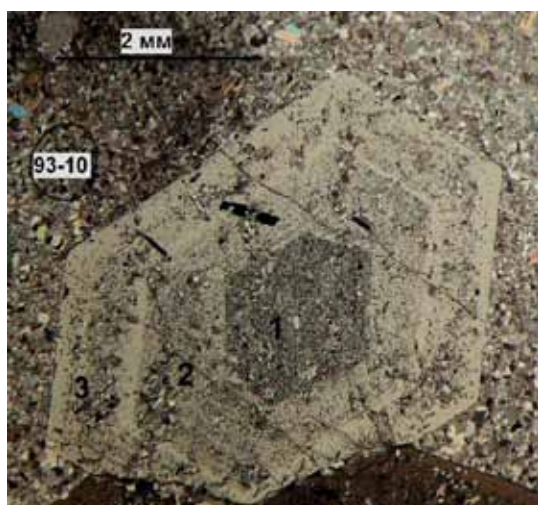
- Установлены кристаллы 1, 2 и 3-х зонные.
- 3-х зонные кристаллы относятся к полнозональным кристаллам, остальные – не полнозональные.
- В каждом полнозональном кристалле имеется ядро и две зоны первого рода.



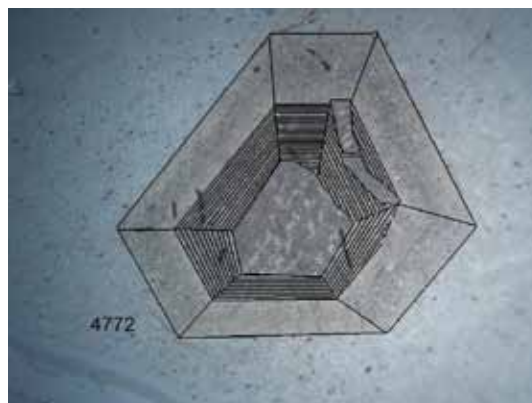
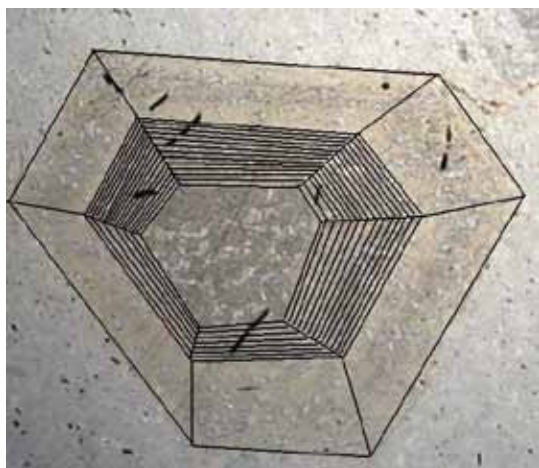
Полнозональный 3-х зонный кристалл секториально-концентрическая зональность (продольное сечение)



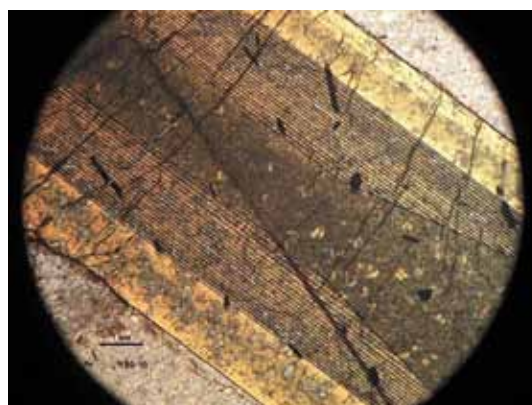
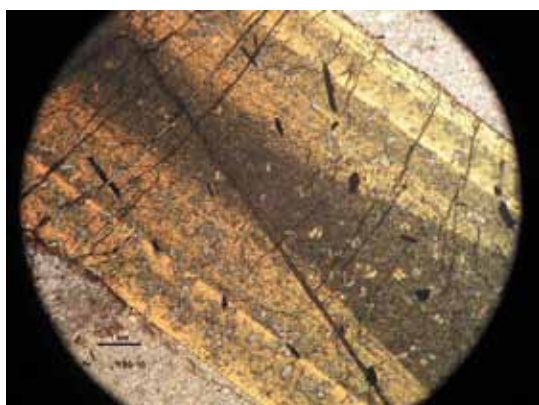
Полнозональный 3-х зонный кристалл, симметричная концентрическая зональность



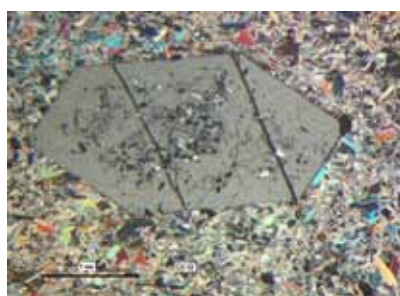
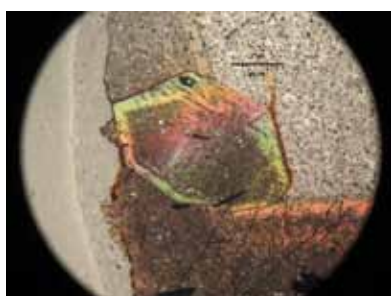
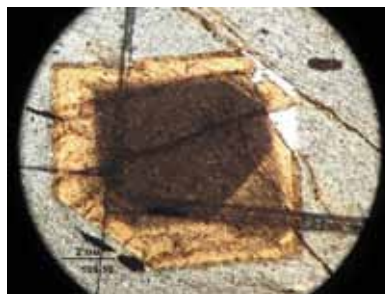
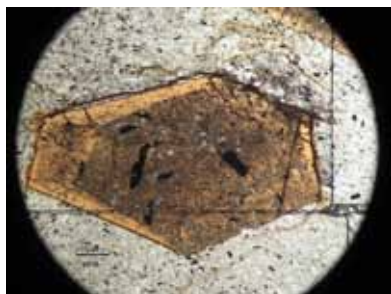
Полнозональные 3-х зонные кристаллы,  
симметричная концентрическая зональность



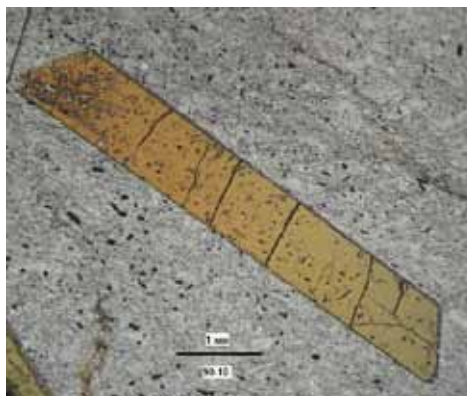
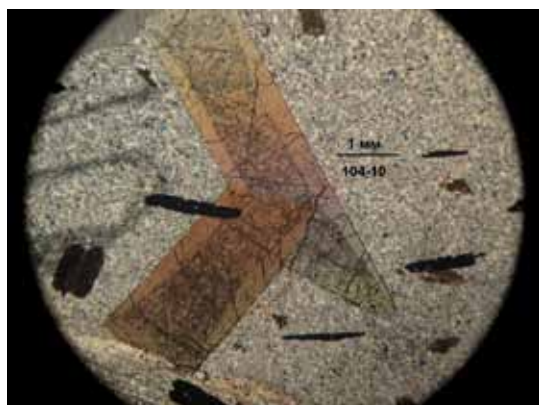
Полнозональный 3-х зонный кристалл в  
продольном сечении



## Не полнозональные 2-зонные кристаллы



## Не полнозональные 2-х и 1- зонные кристаллы

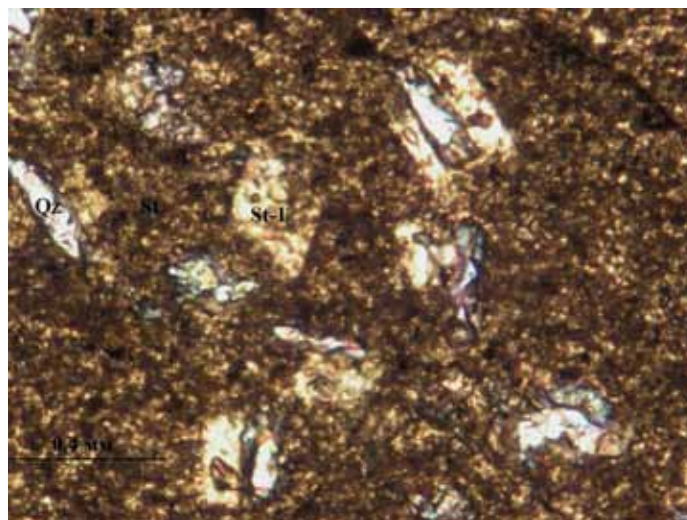


## Структура зон

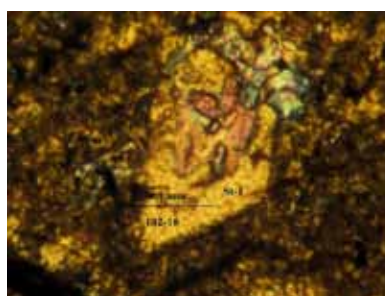
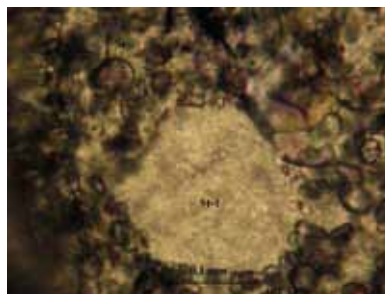
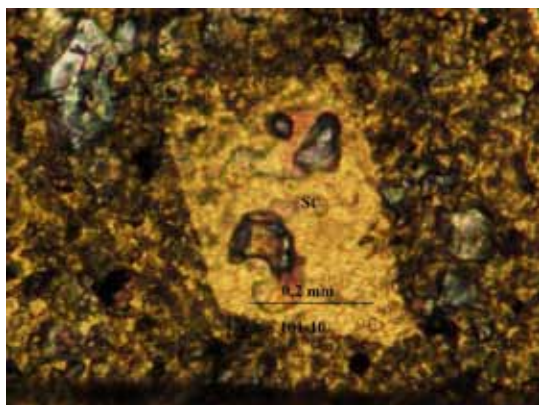
- Ядро отличается от обрамляющих зон наличием микрокристаллов ставролита среди криптокристаллической массы кварца и ставролита и гомогенностью.

## Строение ядра (первой зоны)

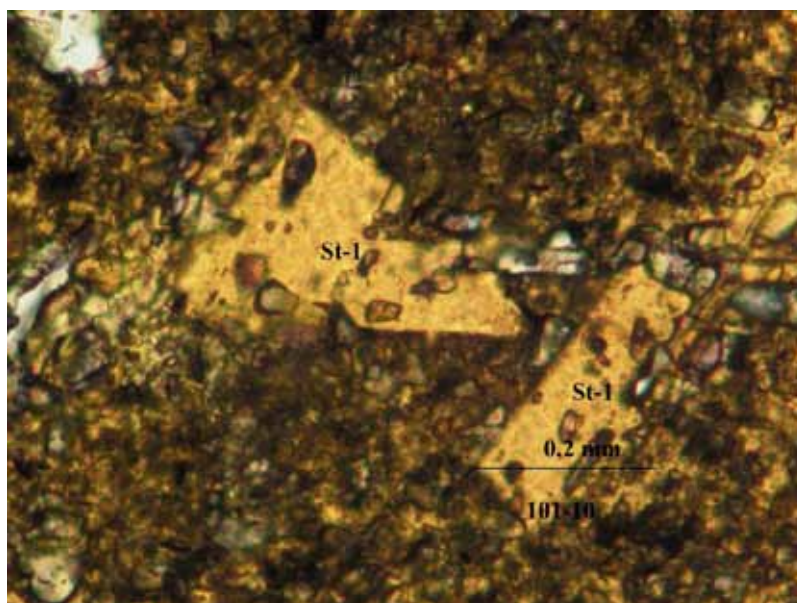
Микрокристаллы ставролита в криптокристаллической массе кварца и ставролита



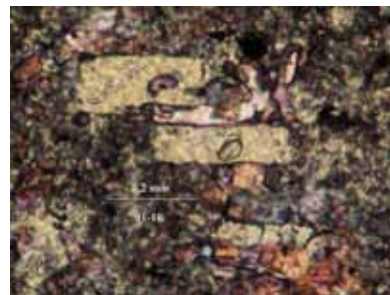
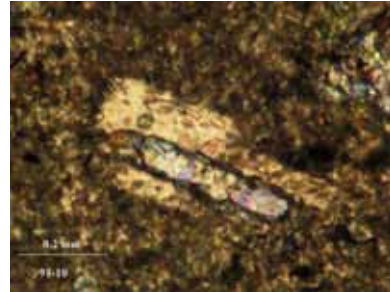
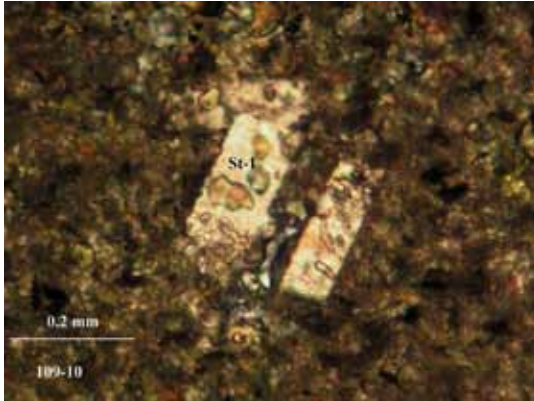
## Ромбические и гексагональные пластинки ставролита



## Треугольные и прямоугольные пластинки ставролита



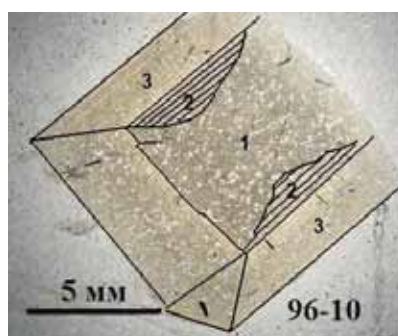
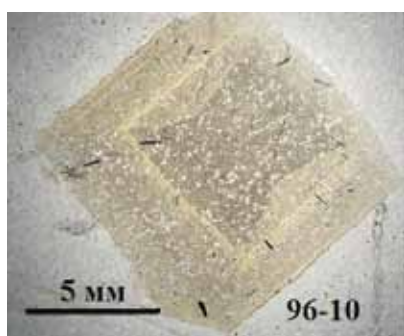
## Пластинчатые кристаллы ставролита в виде пакетов



## Строение второй зоны

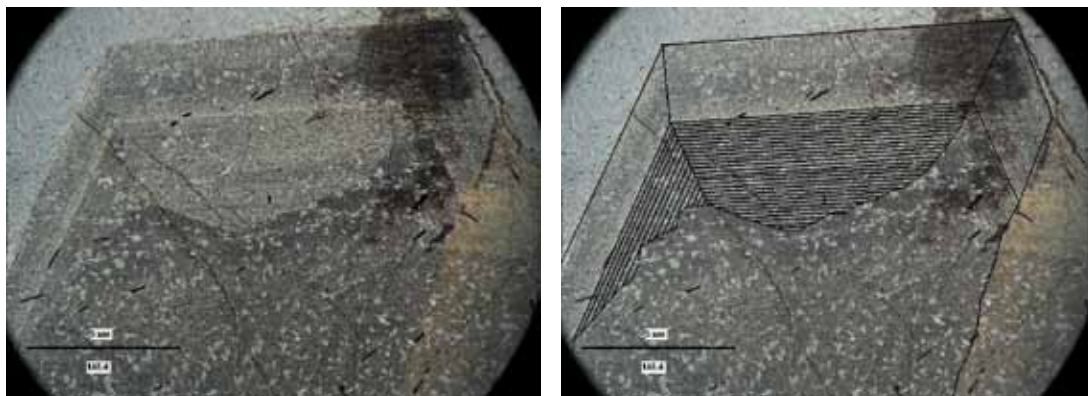
- Вторая и третья зоны отличаются от ядра наличием тонкой зональности (зоны второго рода или порядка).
- Вторая зона обрамляет ядро кристаллов, заполняя дефекты, возникающие при деформации ядра.

## Морфология второй зоны

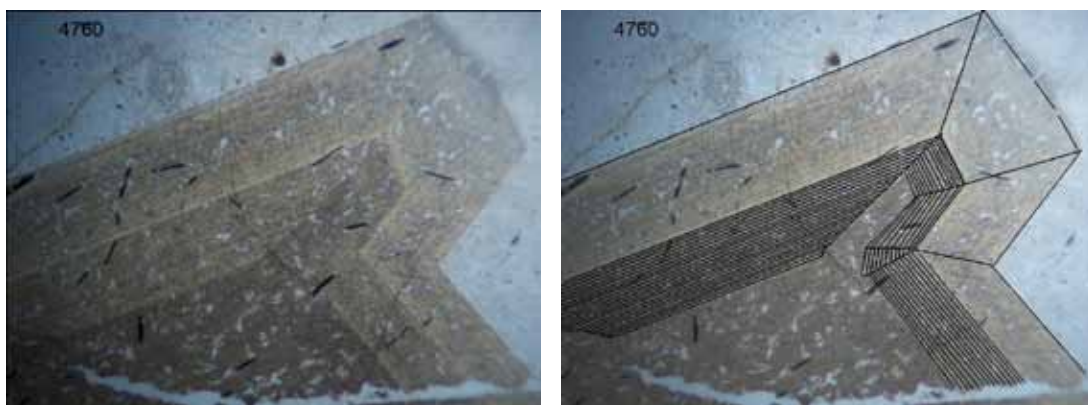




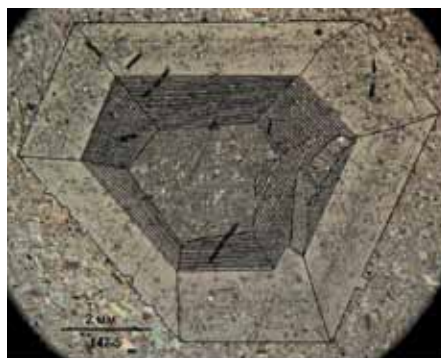
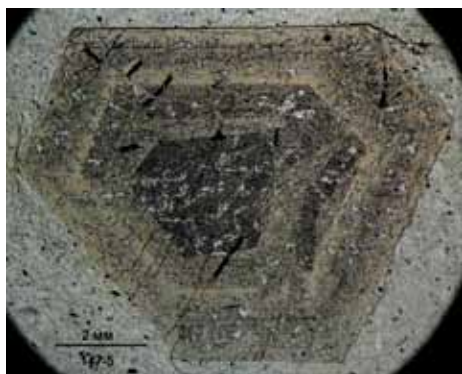
### Морфология второй зоны



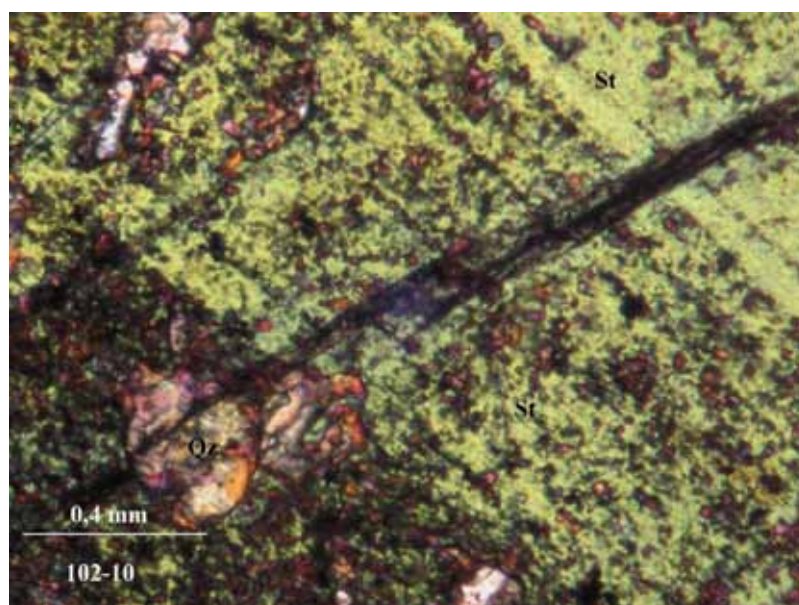
### Морфология второй зоны



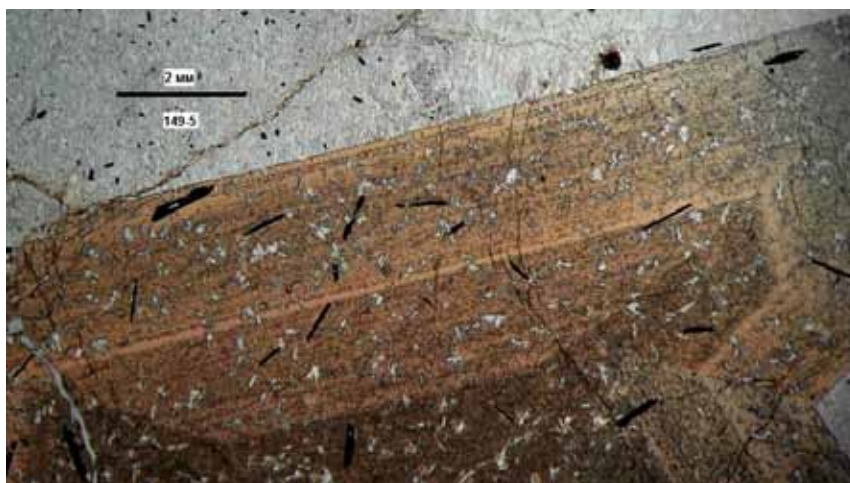
## Морфология второй зоны



Контакт второй зоны с ядром: тонкая зональность



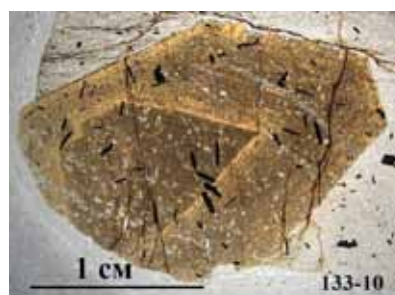
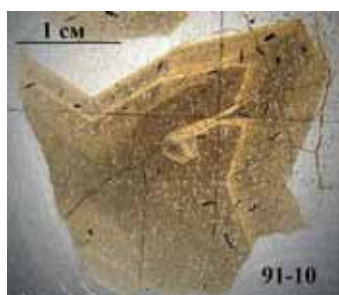
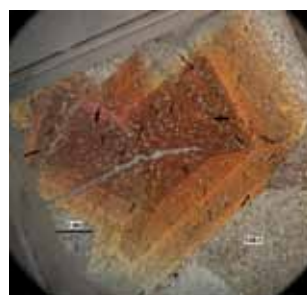
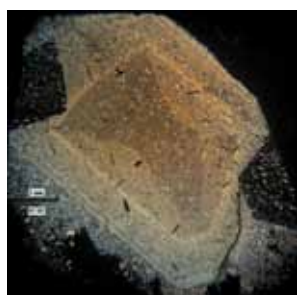
Тонкая зональность во второй зоне



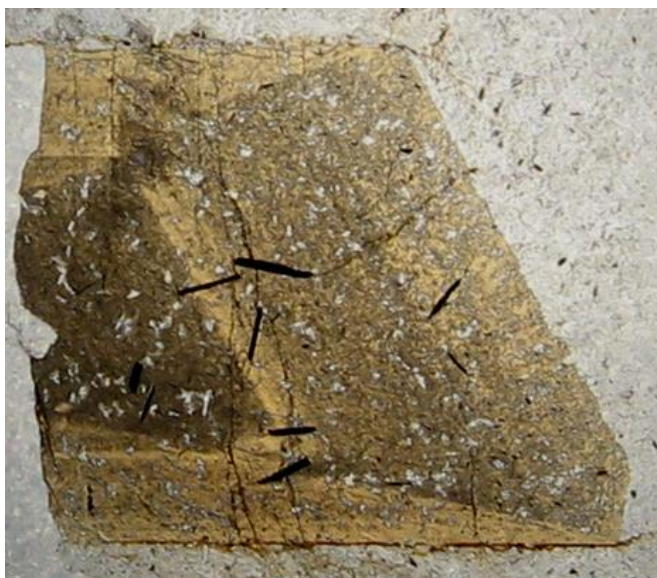
Строение третьей зоны

- Ядро и вторая зона первого рода обрамлены широкой зоной второго рода без включений. Она является реперной для определения начала кристаллизации третьей зоны.
- Третья зона начинается и заканчивается широкими зонами второго рода, не содержащими включений. Эти зоны являются реперными для для определения границы ядра и второй зоны и границ кристалла.

### Общий вид границ третьей зоны, ядра и второй зоны



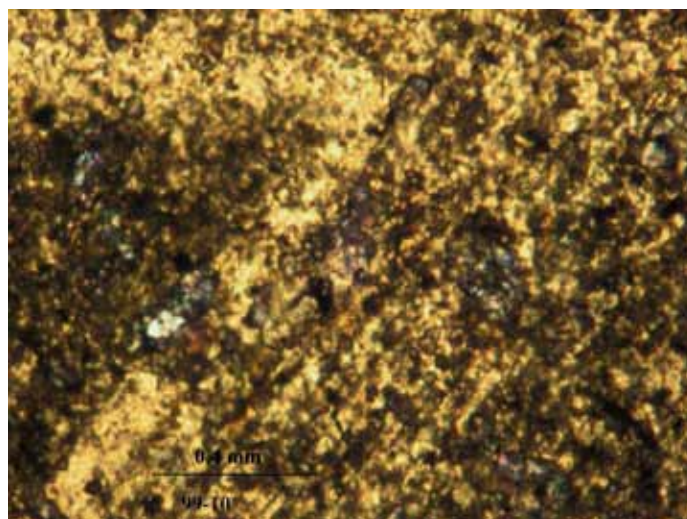
### Строение третьей зоны



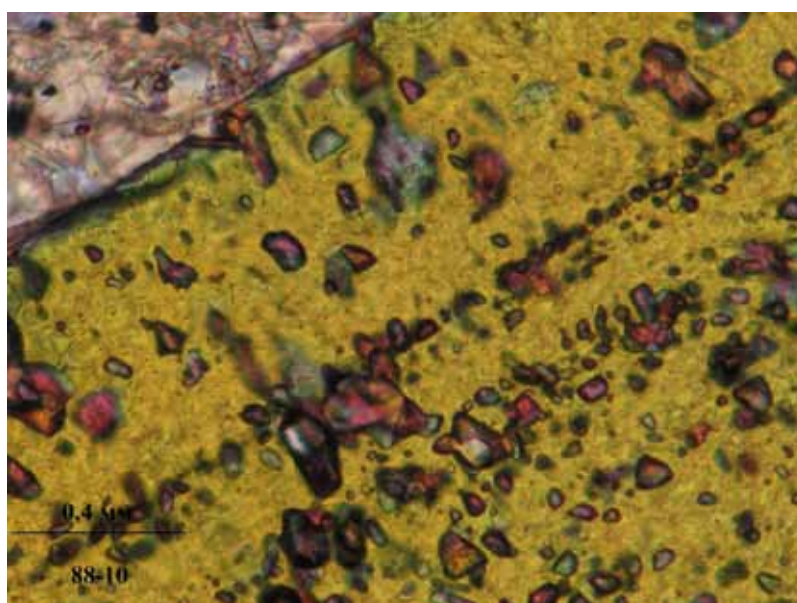
### Строение третьей зоны



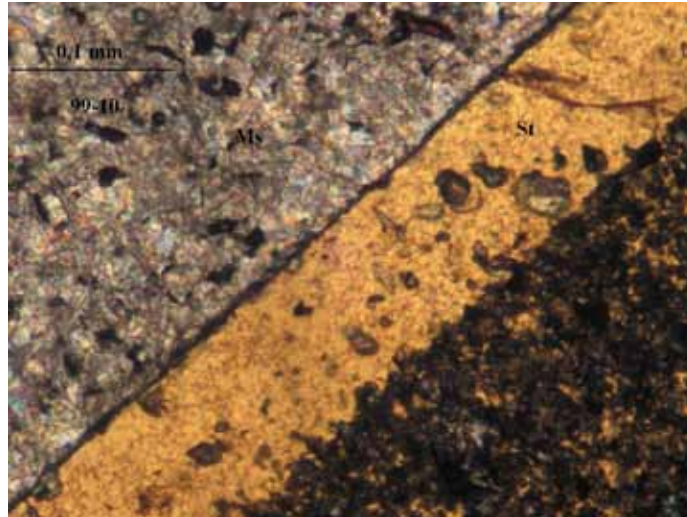
## Граница третьей зоны с ядром



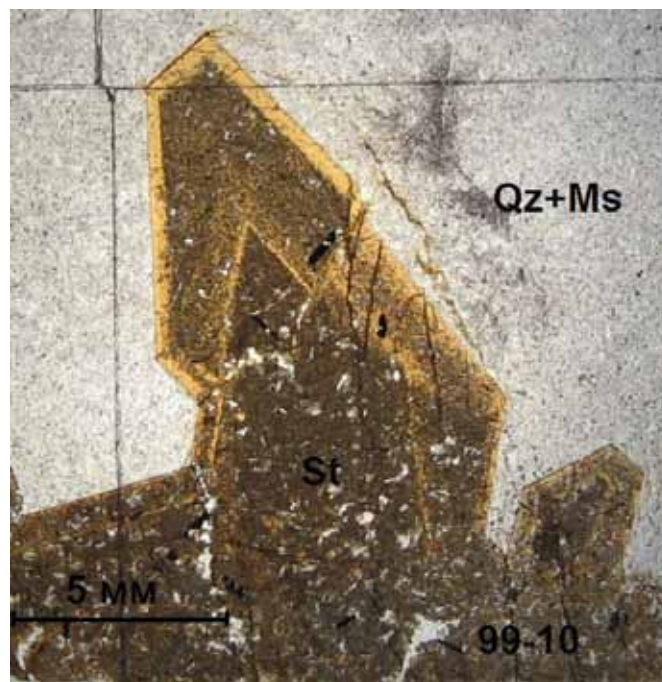
## Тонкая зональность в третьей зоне



Граница третьей зоны на контакте с вмещающим субстратом.



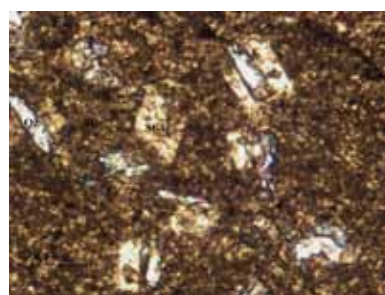
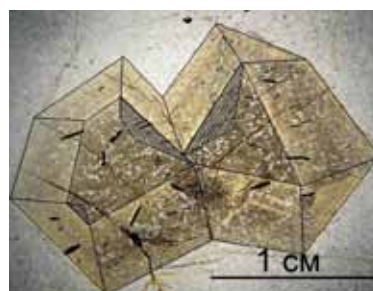
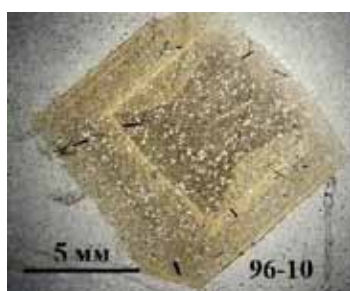
Общий вид зональности кристалла: чистые зоны на границе ядра и кристалла.



## Схема роста кристаллов

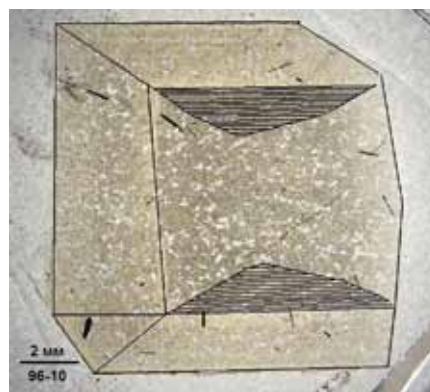
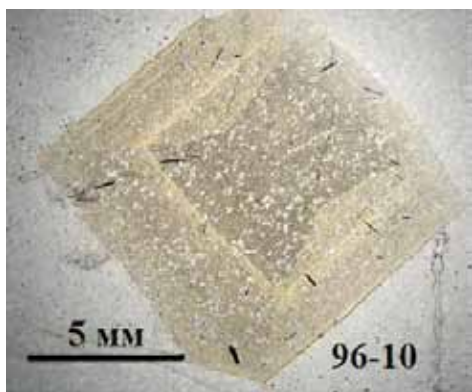
1. Зарождение ядра
2. Растяжение ядра и рост 2-й зоны
3. Рост 3-й зоны

## Зародыши ядра

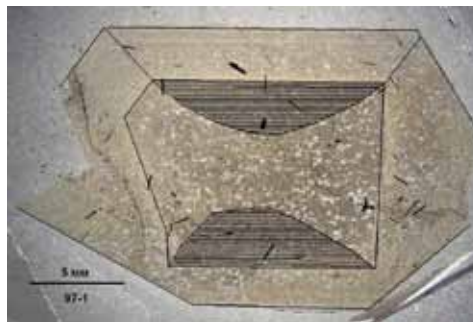




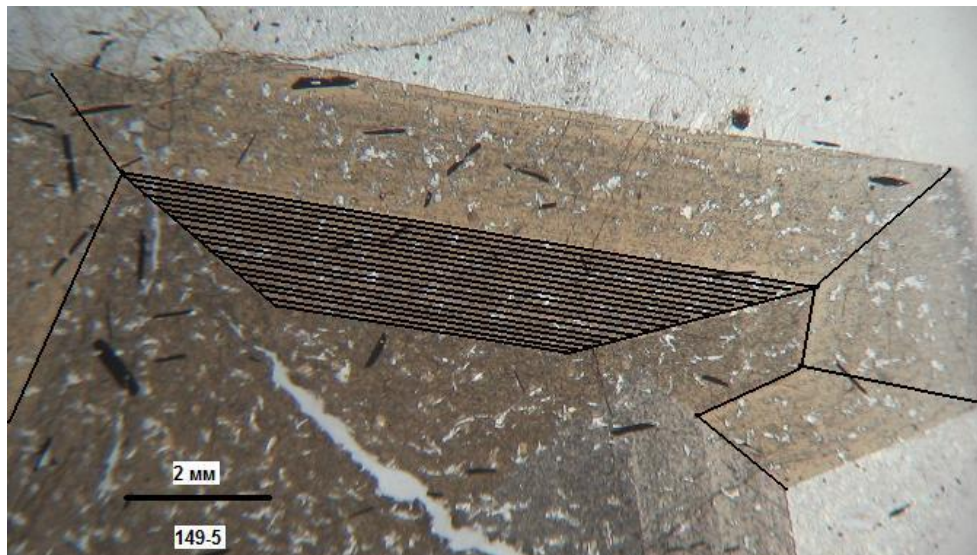
### Кристалл со слабо растянутым ядром



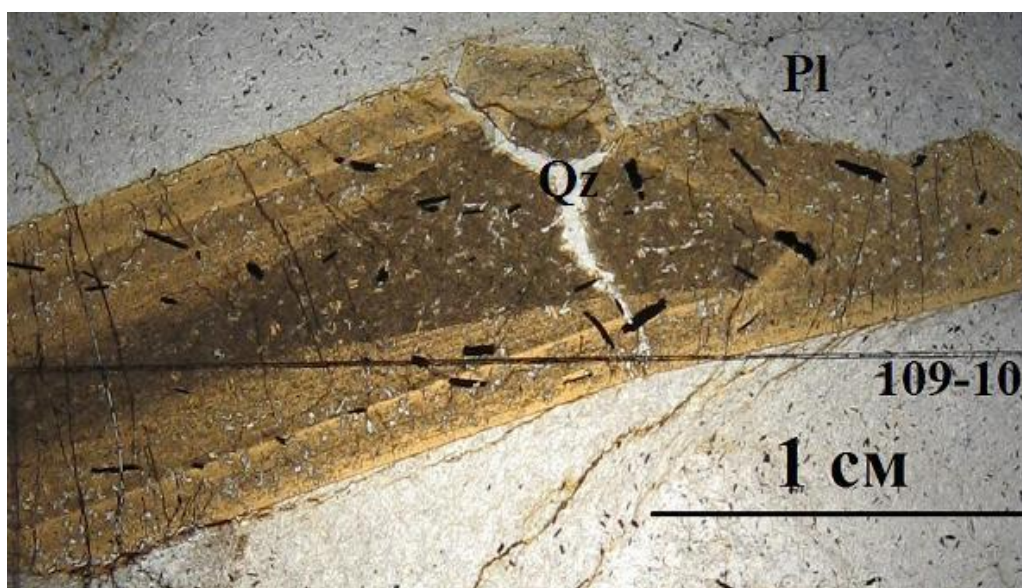
### Кристалл со слабо растянутым ядром



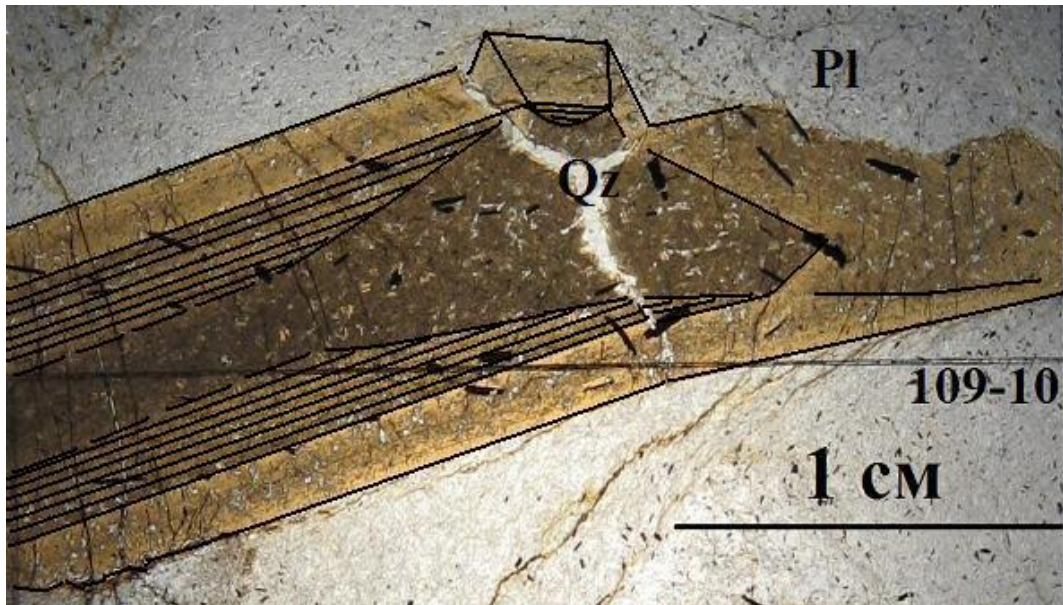
## Кристалл с растянутым ядром



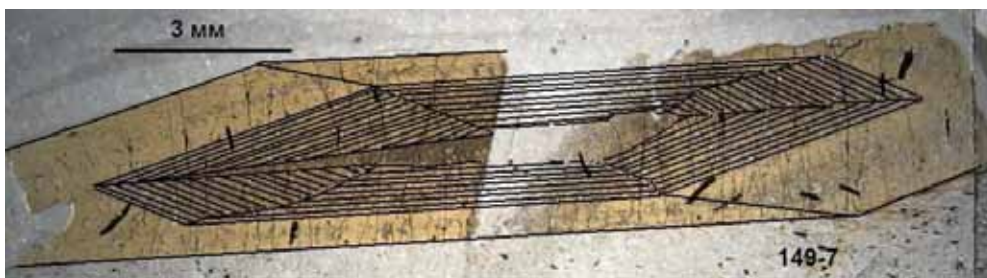
## Кристалл с сильно растянутым ядром



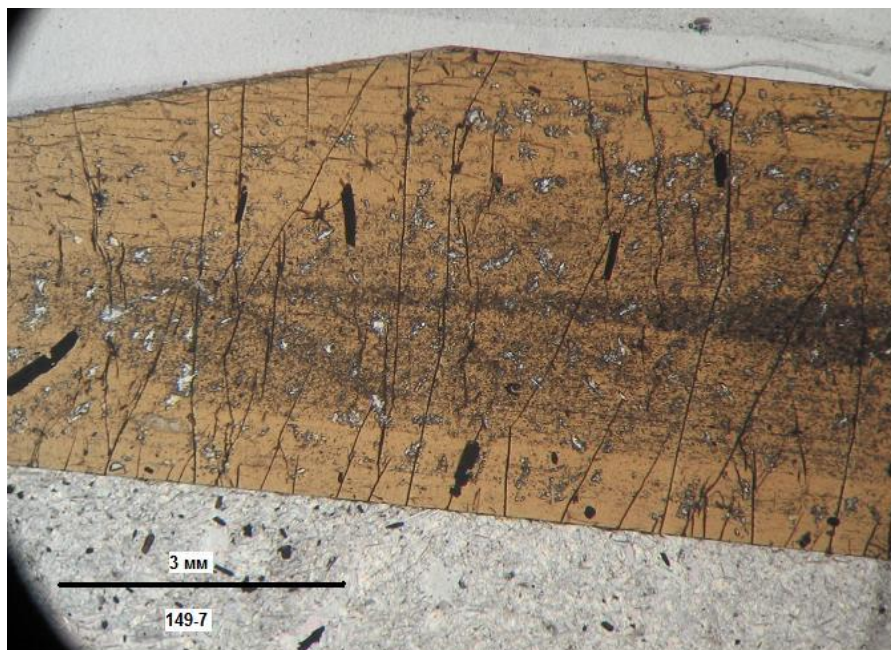
## Кристалл с сильно растянутым ядром



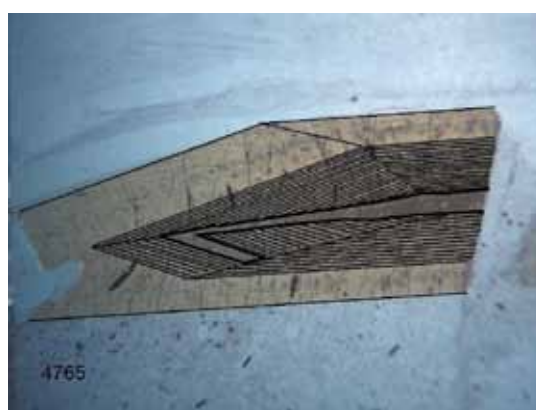
## Кристалл с сильно растянутым ядром



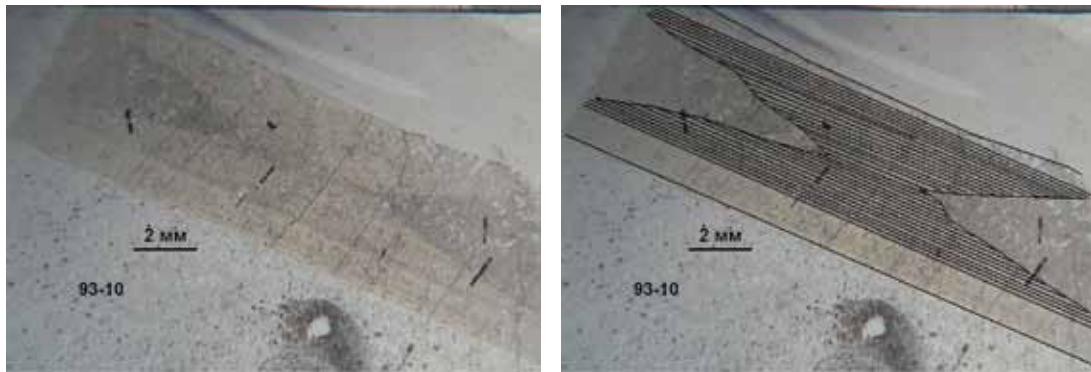
Фрагмент: размытые контуры ядра



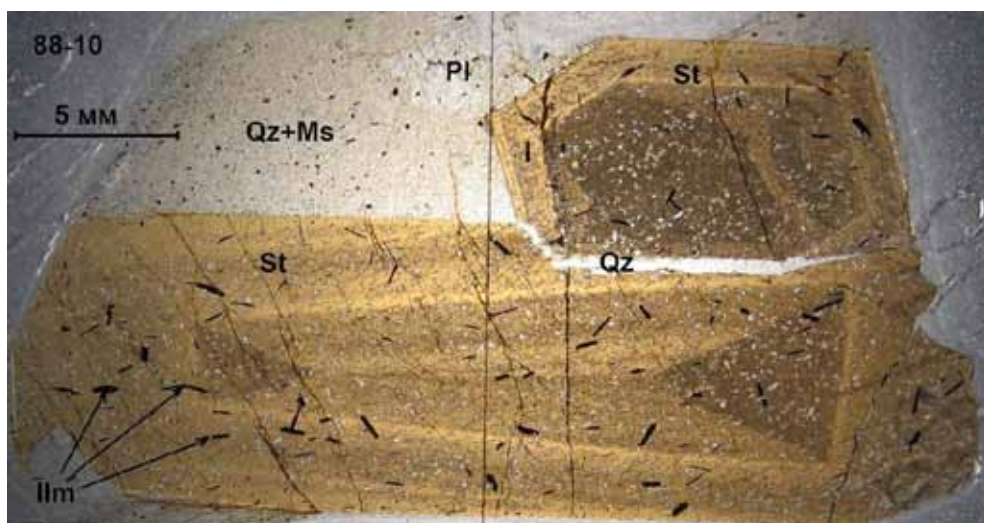
Фрагмент: размытые контуры ядра, схема зон



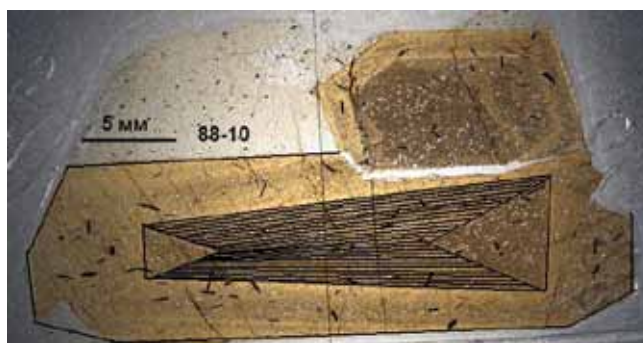
## Кристалл с разорванным ядром



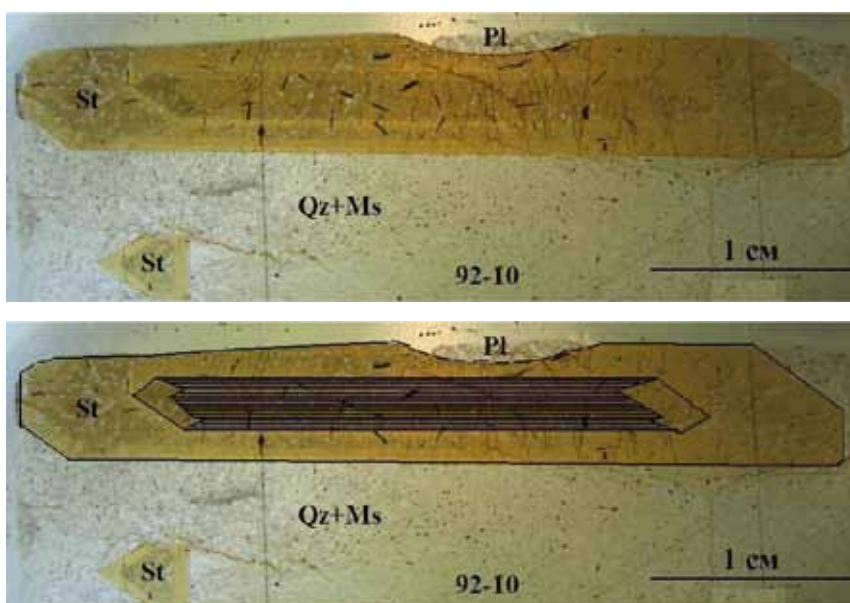
## Кристалл с разорванным ядром



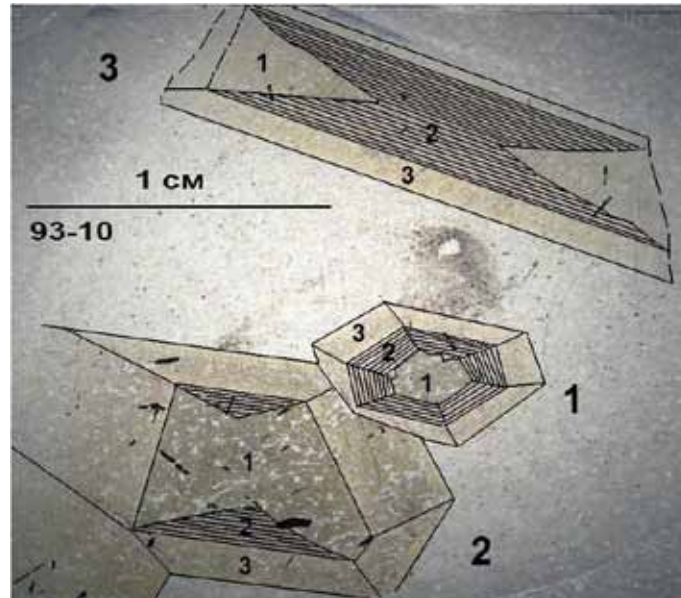
## Кристалл с разорванным ядром



## Кристалл с разорванным ядром

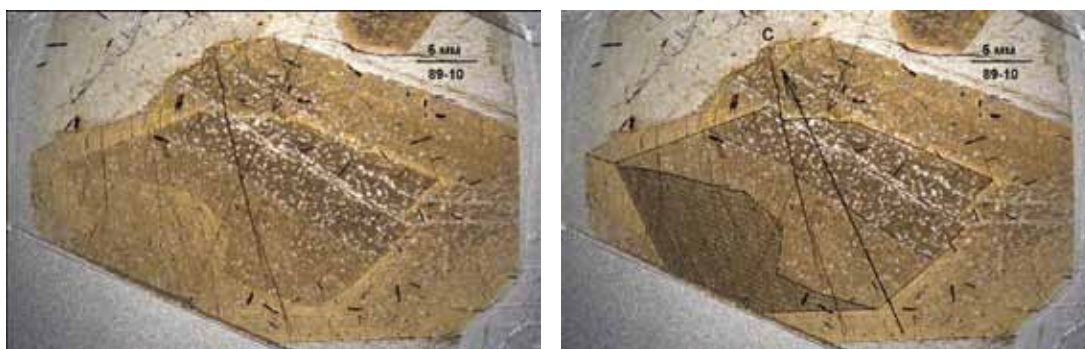


## Кристаллы с разной ориентировкой и степенью растянутости ядра

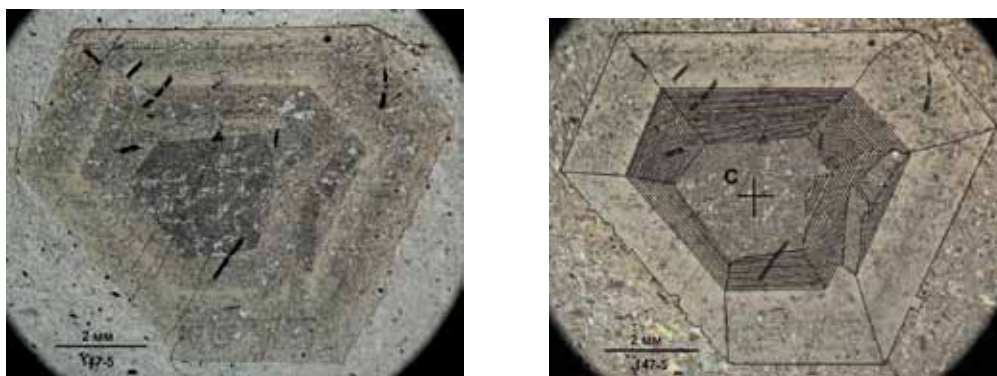


- Т.о. деформация растяжения ядра играла основную роль в формировании удлинённых кристаллов.
- Судя по морфологии кристаллов, наиболее эффективное растяжение происходило в тех кристаллах, в которых с направлением растяжения совпадает ось  $c$ , по этой оси максимальное удлинение кристаллов вдоль призмы  $m$  (110) и пинакоида  $b$  (010).
- Есть основание полагать, что в направлении оси  $c$  в решетке ставролита имеются наиболее благоприятные условия для дислокаций, возможно комбинация трех направлений спайности: по пинакоидам  $b$  (010) и  $c$  (100) и призме  $m$  (110).
- Связь между обликом кристаллов и их ориентировкой по отношению к сланцеватости породы отмечалась ранее для ставролитов Среднего Приазовья (Шелудько, Агафонова, 1958). Замечено, что если оси  $c$  и  $b$  лежат в плоскости сланцеватости, то облик кристаллов ромбический, а при расположении оси  $c$  параллельно и оси  $b$  перпендикулярно сланцеватости – кристаллы псевдогексагонально-призматические. Т.о. также наблюдалось влияние оси  $c$  на развитие призматического облика.
- Если направление оси  $c$  не совпадало с направлением растяжения, то ядро не удлинялось, а иногда разламывалось. Это можно видеть на многих ядрах кристаллов удлинение которых не совпадает со сланцеватостью.

Признаки разрывной деформации ядра в кристалле, ось  $c$  которого не совпала с направлением деформации растяжения.

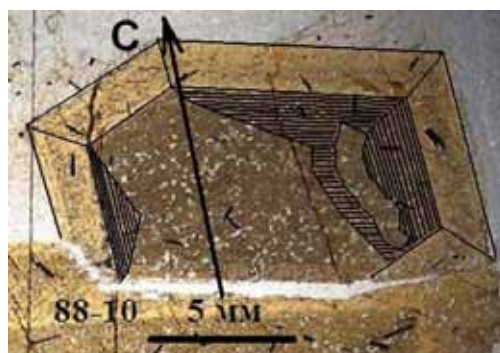


Признаки разрывной деформации ядра в кристалле, ось  $c$  которого не совпала с направлением деформации растяжения.





Признаки разрывной деформации ядра в кристалле, ось  $c$  которого не совпала с направлением деформации растяжения.



Числовая характеристика  
зональности кристаллов

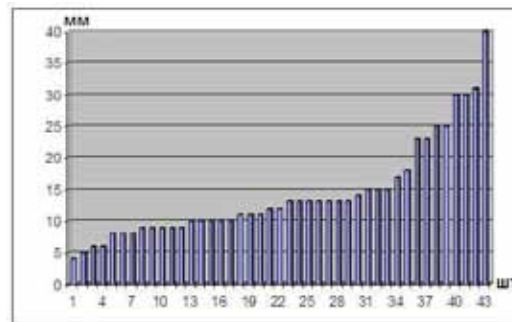
## Основные характеристики кристаллов

- 1. Размеры ядра
- 2. Размеры зародышей в ядре
- 3. Мощности второй и третьей зон первого рода.
- 4. Число зон второго рода в зонах первого рода.
- 5. Мощность зон второго рода в зонах первого рода.

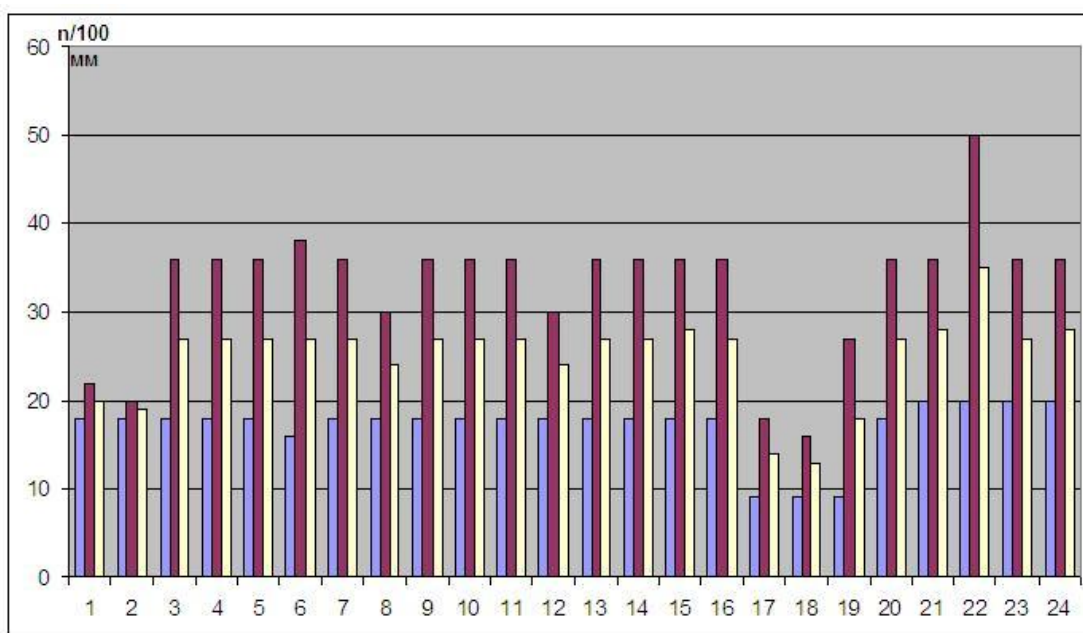
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗОНАЛЬНОСТИ КРИСТАЛЛОВ

№№/пп	Ядро				2-я зона			3-я зона		
	Размер ядра, макс. мм	Размер зародыша в ядре, мм			Мощность макс. мм	Число ритмов	Мощность нарастания за 1 ритм. мм	Мощность макс. мм	Число ритмов	Мощность нарастания за 1 ритм. мм
	мин	макс	ср							
I	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Пределы	4-40	0,09-0,27	0,16-0,50	0,14-0,35	0,5-7,0	28-308	0,013-0,06	0,36-7,0	38-308	0,013-0,072
Число кристаллов	34	23	18	18	24	15	15	32	23	23
среднее	13,5	0,175	0,323	0,25	2,92	123	0,028	3,9	147	0,03

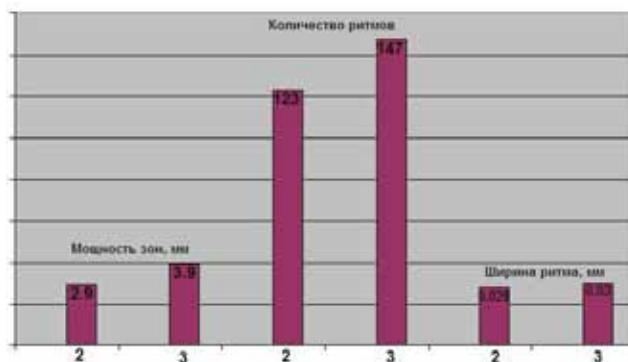
## Вариации размеров ядра



## Вариации размеров зародышей в ядрах разных кристаллов



## Сравнение 2-й и 3-й зон

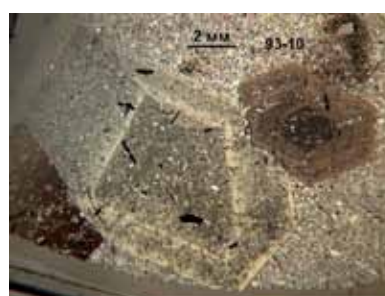
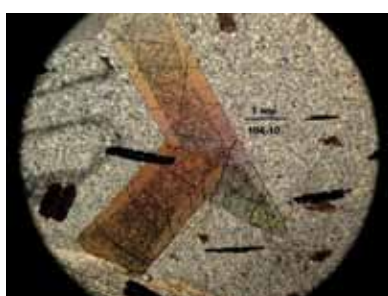
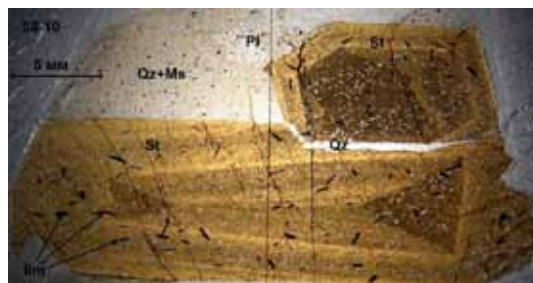
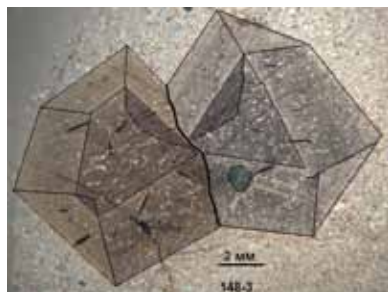


- Анализ основных параметров показал:
- 1) размеры ядер кристаллов варьируют от 4 до 40 мм.
- Этот факт свидетельствует о существенных различиях размеров ядер кристаллов, что подтверждает их различное поведение в процессе деформации растяжения, обусловленное вышеупомянутыми причинами.
- 2) размеры микрокристаллов ставролита в ядрах варьируют в пределах 0,16-0,35 мм, в большинстве кристаллов близки 0,25 мм.
- Этот факт свидетельствует в пользу одновременного образования микрокристаллов в ядрах всех кристаллов ставролита.
- 3) мощности 2-й и 3-й зон первого рода в кристаллах ставролита варьируют в одинаковых пределах от 0,36 до 7,0 мм, но в среднем мощность 3-ей зоны больше на 1 мм (во 2-й зоне 2,92 мм, а в 3-ей зоне 3,9 мм).
- 4) число ритмов зональности второго рода варьируют во 2-й и 3-ей зонах также в одинаковых пределах от 28 до 308, но среднее число ритмов больше в 3-ей зоне на 24 (во 2-й зоне 123, а в 3-ей зоне 147).
- 5) мощность нарастания кристалла за один ритм, во 2-й и 3-ей зонах в среднем одинаковая и составляет около 0,03 мм.
- Таким образом, полнозональные кристаллы ставролита зародились, вероятно, одновременно и прошли одинаковый генетический цикл. Можно полагать, что длительность кристаллизации 3-ей зоны была большей, чем длительность кристаллизации 2-й зоны и растяжения ядра.

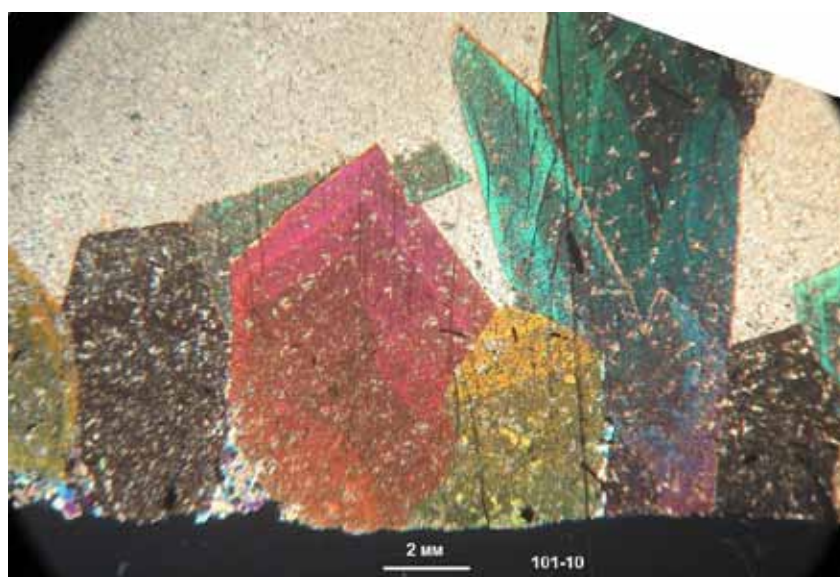
## Образование сростков и двойников

- В сланцах присутствуют сростки и двойники кристаллов ставролита.
- В сростках кристаллы ставролита расположены случайным образом, ориентированы хаотически, развивались независимо друг от друга, рост в контакте происходил по законам естественного отбора.

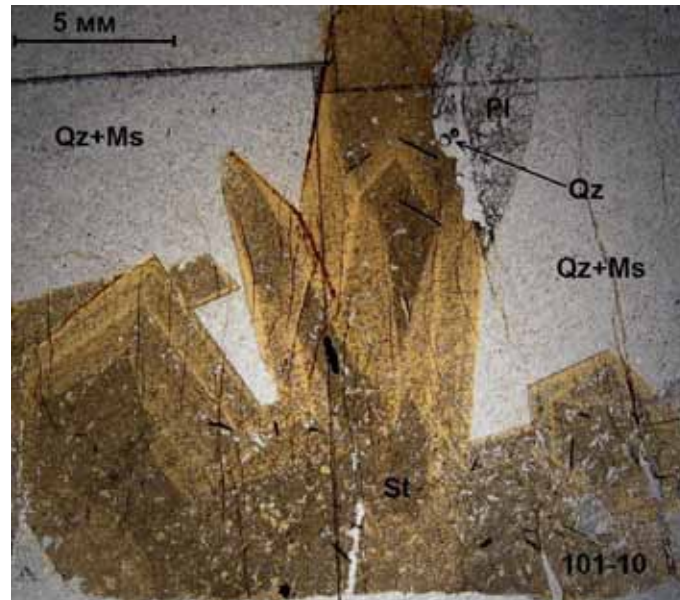
## Сростки



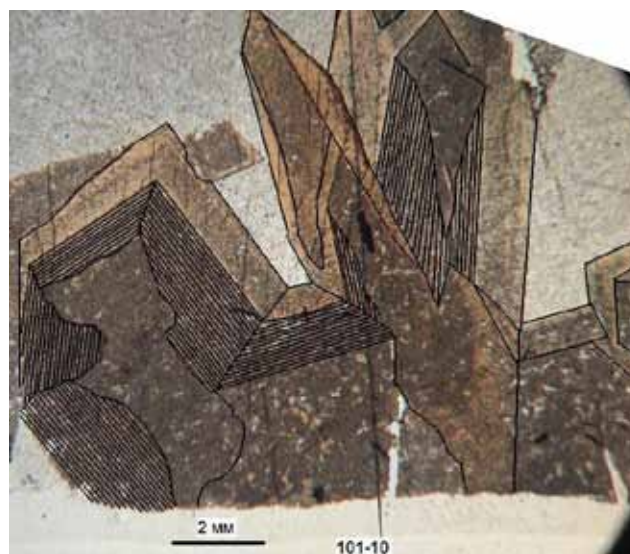
## Сросток кристаллов с признаками естественного отбора



Сросток кристаллов с признаками  
естественного отбора



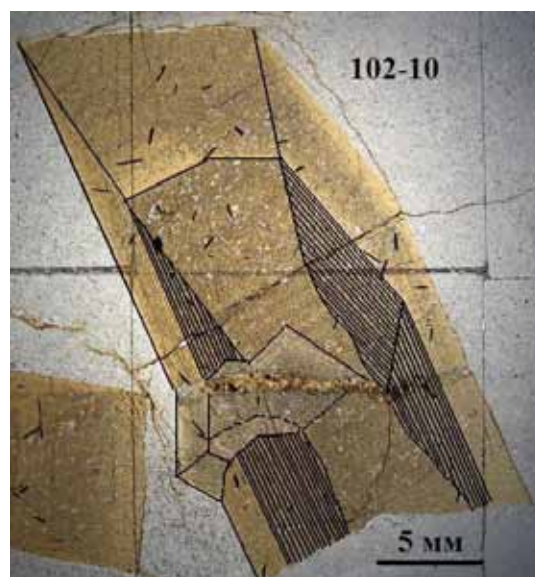
Сросток кристаллов с признаками  
естественного отбора



## Двойники

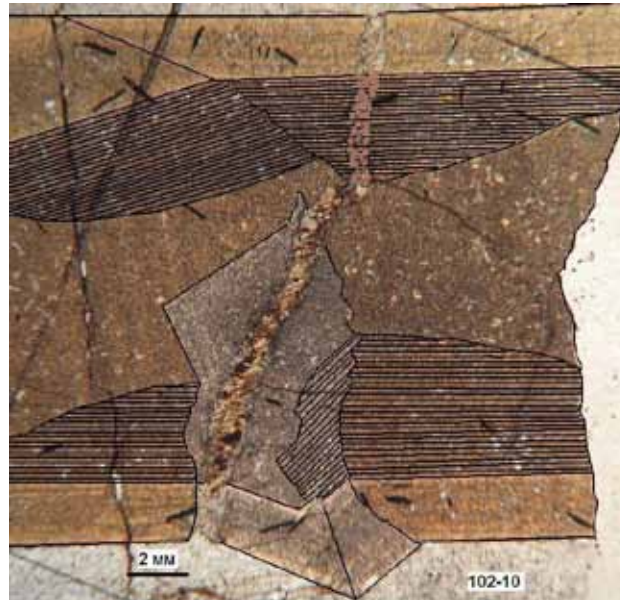
- Двойники – особый тип сростков, они образовались вследствие деформации растяжения ядра кристалла.
- Зарождение двойников обусловлено разрывом ядра первичного кристалла.
- Рост двойников происходил одновременно с первичным кристаллом по одной схеме, при этом они ориентировались закономерно по определенным кристаллографическим плоскостям: по (231) и (031).
- Тройников по (231) мы не обнаружили, но и тройники должны развиваться по этому же сценарию.
- Двойники и тройники закончили формироваться вместе с окончанием растяжения ядра, т.е. на второй стадии кристаллизации ставролита, в дальнейшем они обрастали, вместе с материнским кристаллом, третьей зоной.

Начальная фаза зарождения двойника:  
односторонний зародыш двойника в кристалле с  
растянутым ядром





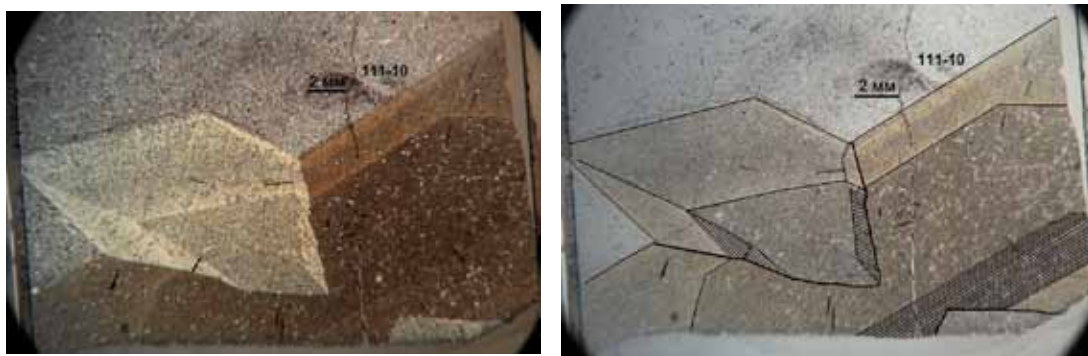
В качестве зародыша двойника использует ядро, затем на нем продолжается растяжение ядра и появляются собственные грани.



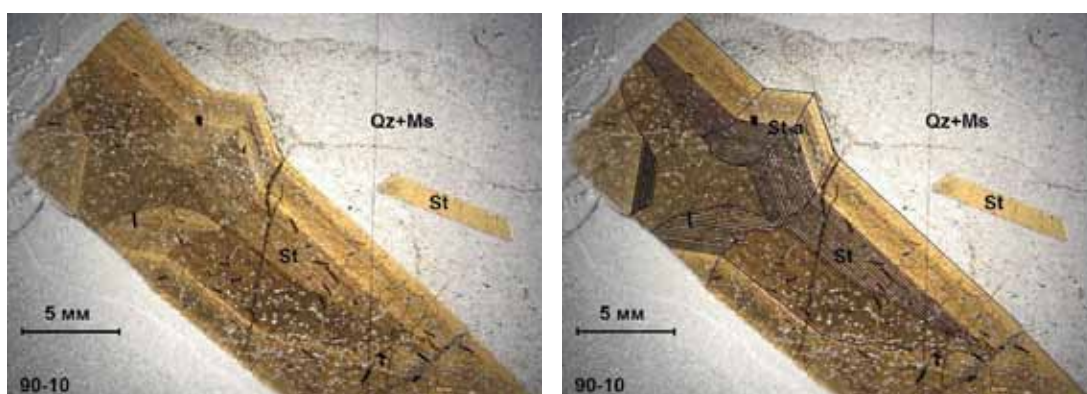
Структура зародыша двойника: неоформленный кристалл, зональность в области роста второй зоны, нарастание третьей зоны.



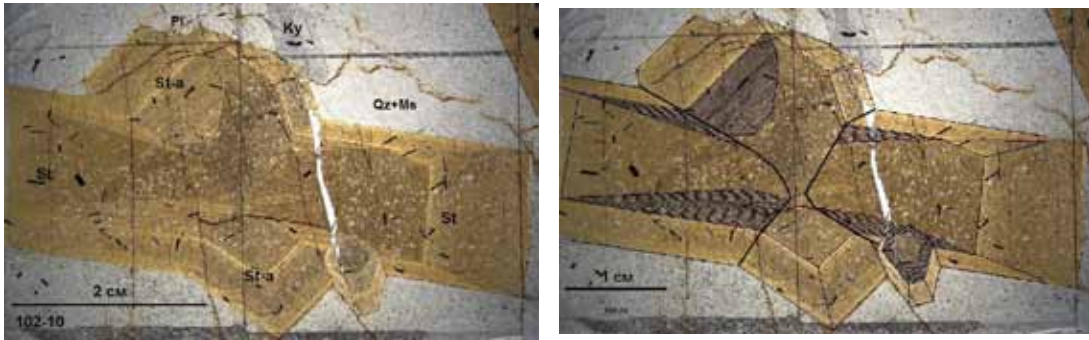
Начальная фаза: двусторонний рост зародыша в кристалле до разрыва ядра



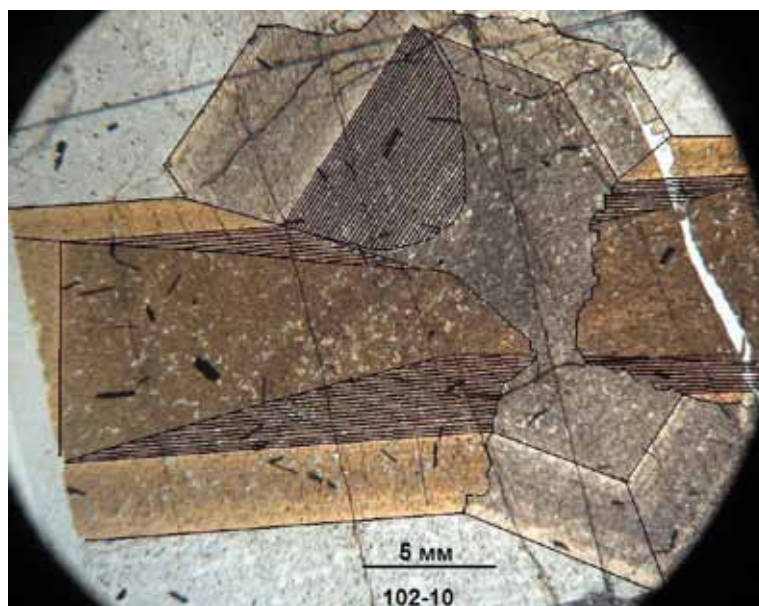
Начальная фаза образование «сквозного» двойника при разрыве ядра



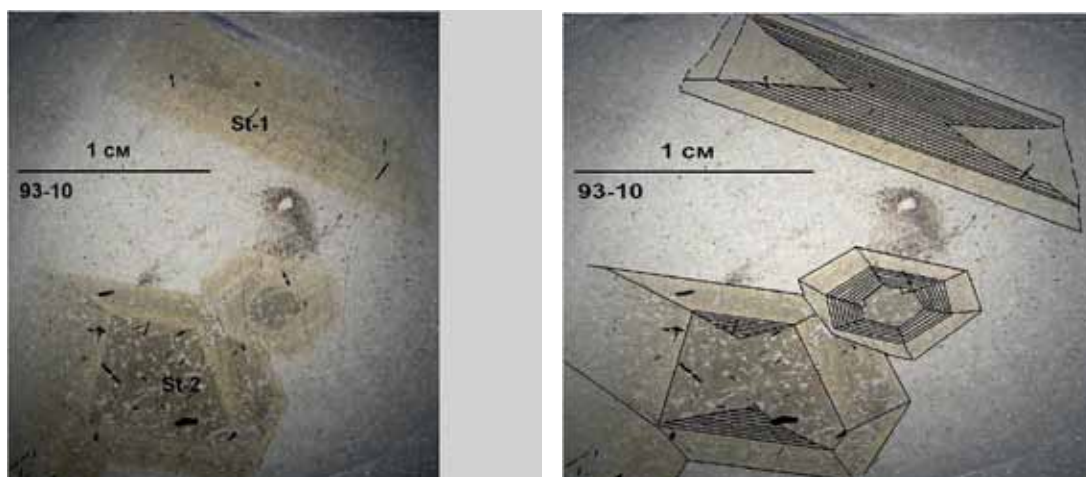
Фаза зрелого двойника: полностью развитый двойник в кристалле с разорванным ядром: раздвиг материнского кристалла и ядра двойника.



Формы границ совместного роста двойников:  
ступенчатость



Разноориентированные кристаллы с различными типами зональности и разной степенью растяжения ядра.

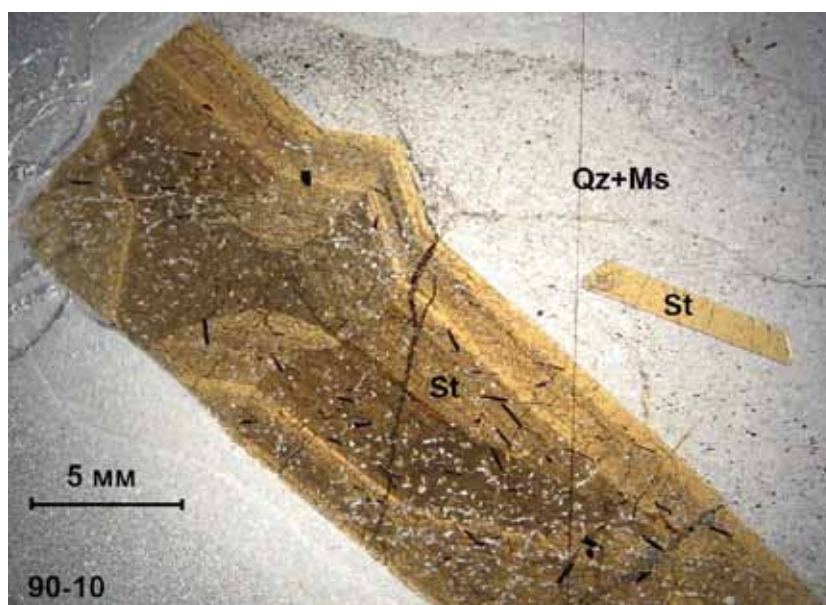


## Гипотеза роста кристаллов ставролита

- 1. Начало образования кристаллов ставролита связано с появлением в сланцах скоплений криптокристаллической смеси кварца и ставролита (ядер), которая закристаллизовалась в виде короткостолбчатых призматических псевдогексагональных агрегатов.
  - Появление этих образований (зародышей кристаллов или ядер) контролировалось зонами проницаемости сланцев, в том числе плоскостями сланцеватости и тектоническими трещинами, вдоль которых пульсировали гидротермальные растворы.
  - В зародышах после их появления произошла перекристаллизация, в результате чего в них образовались микрокристаллы ставролита. Эти кристаллики ставролита имеют простые формы пинакоида и призмы. Они плоские, пакетобразные. Пакеты трехслойные, типа сендвича, состояются из двух гексагональных пластинок ставролита с прослойкой кварца или еще одного слоя ставролита.
  - Раскристаллизация зародышей ознаменовала формирование структуры ядер кристаллов ставролита после этого начались деформации растяжения зародышей.
- 
- 2. Характер дальнейшего роста кристалла зависел от положения ядра. Судя по морфологии кристаллов, наиболее эффективное растяжение происходило в тех кристаллах, в которых с направлением растяжения совпадает ось  $c$ , по этой оси максимальное удлинение кристаллов вдоль призмы  $m$  (110) и пинакоида  $b$  (010).
  - Под действием сил деформации растяжения ядра «растягивались» в направлении сланцеватости. При этом в процессе деформации растяжения ядро удлинялось без разрыва сплошности или делилось на части, удаленные по длинной оси кристалла.
  - Растяжение ядра без разрыва сплошности, могло произойти в результате реализации деформации материала ядра по принципу миграции дислокаций решетки и трансляционного скольжения.
  - При растяжении в средней части ядра образовывалось утоньшение (талиа). Впадина между гранями первичного ядра и талией зарастала второй зоной ставролита в процессе растяжения кристалла.
  - Структурные особенности второй зоны в кристаллах показывают, что она развивалась параллельно с растяжением ядра и не всегда симметрично. В некоторых кристаллах вторая зона наблюдается только с одного края ядра. Наблюдаются даже разрывы ядра и залечивание их материалом второй зоны. Это свидетельствует о том, что вторая зона образовывалась лишь там где ядро подвергалось деформации растяжения.
  - В том случае когда сплошность ядра нарушалась, в разрыве кристалл залечивался гранями призмы и пинакоида, при этом более ранние зоны роста граней подвергались деформации растяжения, как и в первом случае, вероятно до завершения кристаллизации второй зоны кристалла, что означало окончание растяжения.

- 3. После завершения растяжения ядра и кристаллизации второй зоны все кристаллы обрастали гранями третьей зоны, т.е. приобретали современную форму. Рост кристаллов в этот период происходил по принципу наращивания граней в соответствии с потоком растворов: более интенсивно росли грани навстречу потоку растворов.
- Таким образом, ядра кристаллов ставролита обрамлены сложной системой зон, одна из которых сформирована частично растянутыми гранями призмы и пинакоида, а вторая – нормально кристаллизованными гранями всех форм.
- Важной особенностью кристаллизации ставролита является наличие трех генераций:
  - 1) ядро и две зоны;
  - 2) ядро отсутствует есть вторая и третья зоны и
  - 3) отсутствуют ядро и вторая зона, чистые кристаллы без включений.
- Первая генерация наиболее ранняя, составляет основную массу ставролита, вторая и третья генерации зарождались на стадиях роста второй и третьей зон первого рода.

### Пример зарождения кристалла 3-й генерации

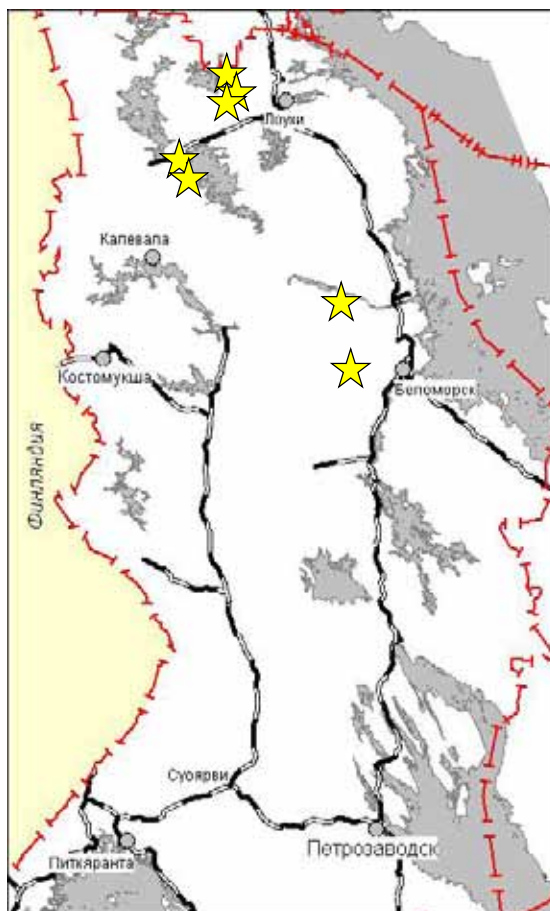


- **Выводы.**
- В истории генезиса ставролита имеется три стадии:
- 1 – стадия зарождения ядра: зародыши являются гомогенными, можно предполагать, разовый одноактный характер их образования; далее на всех стадиях роста кристалла наблюдался пульсационный характер питания растворов, что обусловило неоднородное строение кристаллов и развитие сложной зональности.
- 2- стадия растяжения ядра и кристаллизации второй зоны;
- 3 – стадия кристаллизации третьей зоны, формирование современной огранки.
- Вторая и третья стадии заканчивались замедлением скорости кристаллизации.

# Обзор результатов обогащения кианитовых руд Карелии

*Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.*

Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск





## Минералогическая характеристика кианитовых объектов Хизоваарского рудного поля

Генетический тип	Участок	Характеристика кианита				Результаты обогащения, %	
		Габитус кристаллов кианита	Преобладающий классификация кианитовых вкрапленности кианита	Классификация кианитовых вкрапленности кианита	Свободные кианита, %	Содержание кианита в концентрате	Извлечение кианита
Метаморфогенный	Северная линза	Таблитчатые и призматические	20x50	0,1-0,071	30-45	52-53	20-23
Метаморфогенно-метасоматический	Южная линза	Игольчатый, лучистый, призматический	0,5x7 0,5x7	0,16-0,1 0,1-0,071	85-95 15-25	56-57 12-27	74-77 46-34
Метасоматический	Фукситовый	Призматический	0,5x0,6	0,16-0,1	45-60	56-57	38-60
	Восточный	Призматический	0,5x0,6	0,1-0,071	30-45	26-48	18-40

Генетический тип	Участок	Тип руды	Минеральный состав					
			кианит	кварц	слюды	пирит	рутил	графит
Метаморфогенный	Северная линза	Кианит-биотитовые, графитизированные гранат-кианит-биотитовые сланцы	18-24	63-78	0.5-2	0-1	< 0.3	0.03-0.5
Метасоматический	Фукситовый	Гранат-кианит-ставролит-биотитовые сланцы	17-25	50-80	1-21	-	< 0.1	1-3
	Восточный							
Метаморфогенно-метасоматический	Южная линза	Кианитовые кварциты и сланцы	23-49	32-60	0.5-2	1-14	0.2-0.3	ед. зн



Кианит из кварцитов (Южная линза,  
Хизоваарское месторождение)



Исследования вещественного состава и технологических свойств кианитовых руд Хизоваарского месторождения (Южной линзы) проводились в разные годы институтом "Механобр", «Гипроникель», Институтом геологии Карельского НЦ РАН, Горным институтом Кольского НЦ РАН, ОМЭ СЗТУ и др. организациями.

### Требования промышленности к кианитовым концентратам в СНГ

Области применения	Содержание в пересчете на прокаленное вещество, % по массе							Остаток на сите, не >, %	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> не <	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> не >	TiO <sub>2</sub> не >	CaO не >	MgO не >	ZrO <sub>2</sub> не >	Влага, не более	0315	005
<b>Производство электрических алюминиево-кремнистых сплавов</b>	56,0	0,6	0,8	0,5					
<b>Производства огнеупоров и глинозема</b>	MgO + CaO + TiO <sub>2</sub> , не >								
а) зернистый концентрат									
I сорт	55,0	1,5	2,0						
II сорт	50,0	2,5	2,5						
б) порошок концентрат									
I сорт	57,0	1,5	2,0						
II сорт	55,0	2,5	2,5						
ТУ-48-0502-42-81 на дистен-силлиманитовый концентрат									
а) зернистый КДСЗ	54	0,7	0,8	0,2	0,4	0,8	0,5	0,5	-
б) порошок КДСП	54	0,7	0,8	0,2	0,4	0,8	0,5	-	30

### Изучение обогатимости кианитовой руды Южной линзы

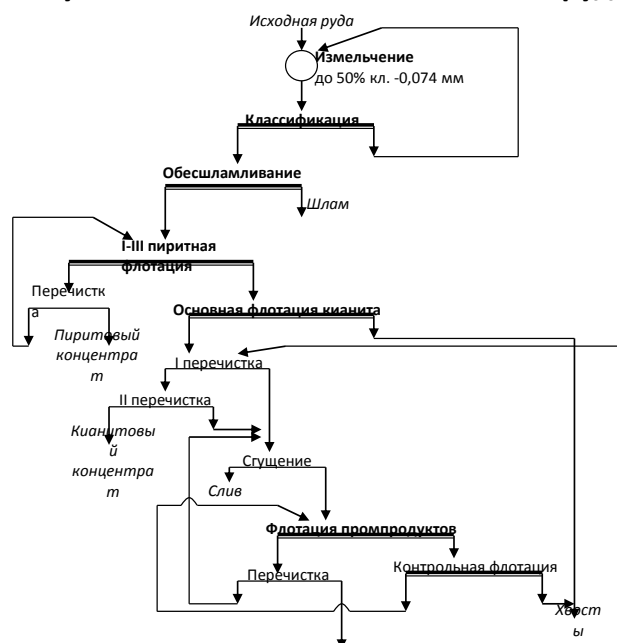
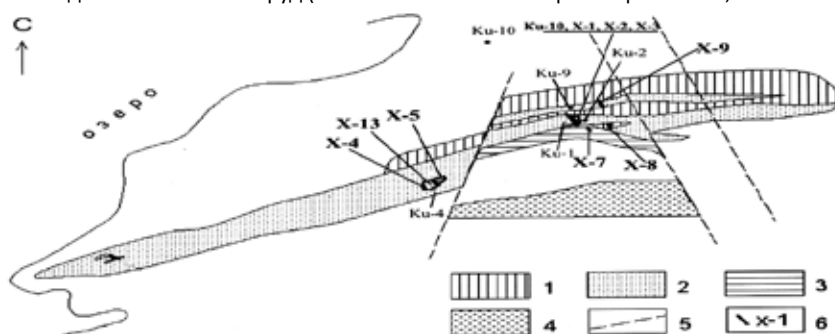


Схема обогащения кианита, разработанная институтом «Механобр»

A, % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B, % КОНЦ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	E, % КОНЦ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Механобр, 1940-41 гг</b>		
21 %	55,5 - 56	70
33 38	58 %	55-70
гравитационный к-т 49-50%		
<b>Ловчорритовая ОФ, 1941 г.</b>		
Светлые 21	55,5	79
Лучистые 34	57	82
<b>Гипроникель 1949-1950гг</b> <b>Полевская ОФ, 1950 гг</b>		
	57 - 58 %	Из 2840т получено 576,65 т кианита

**Институтом огнеупоров** получен концентрат с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 57,17% и испытан в заводских условиях в качестве высокоглиноземистых огнеупоров. Испытания показали, что кианитовые огнеупоры из кианитового концентрата содержат 48-50% глинозема и имеют повышенную шлакоустойчивость по сравнению с шамотными изделиями.

Институтом геологии КарНЦ РАН, начиная с 1975г., на стадиях ревизионо-опробовательских работ, оценены все разновидности кианитовых руд (в том числе и сильно пиритизированные, относимые к забалансовым)



Условные обозначения: 1 – биотит-кианитовый гнейс; 2 – мелкозернистый кварц-кианитовый сланец; 3 – мелкозернистый двуслюдяно-кианитовый гнейс; 4 – гранатовый амфиболит; 5 – тектонические нарушения; 6 – точки отбора проб

#### Характеристика пород Южной линзы по карьерам

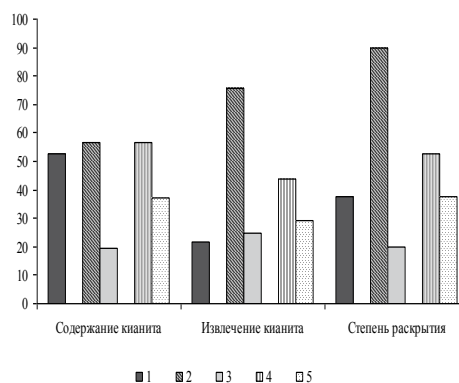
Карьер	Номер пробы	Интервал опробования, м	Содержание $Al_2O_3$ в руде	Хар-ка кианита	Характерные особенности породы
Восточный	X-1	15	14,68	Игольчатый	Охристая, пиритизированная
	X-2	8	28,84	Лучистый	Слюдистая, массивная
	X-3	5	18,61	Игольчатый	Существенно пиритизированная
Центральный	X-4	8	32,30	Радиально-лучистый	Высокопрочная
	X-5	6	18,36	Игольчатый	Пиритизированная, массивная
	X-13	4	28,41	Смешанный	Пиритизированная, массивная
Западный	X-6	15	17,70	Игольчатый	Массивная, слабо пиритизированная

средний размер зерен кианита в руде	- 3,3 мм
преобладающий размер зерен кианита	0,5-7 мм
класс раскрытия кианита	0.16-0,1 мм
относительное содержание кианита в свободных зернах	85-95%

Технологическая схема обогащения включала обесшламливание измельченного материала по классу 20 мкм, сульфидную флотацию в голове процесса и флотацию кианита из хвостов сульфидной флотации с одной контрольной и четырьмя перечистками кианита

#### Результаты обогащения кианитовых руд Хизоваарского рудного поля по единой схеме

Генетический тип руды	Номер пробы	Содержание $Al_2O_3$ в руде, %	Характеристика концентрата, %	
			Выход	Содержание $Al_2O_3$
Метаморфический	X-10	24,00	10,58	53,59
	X-11	24,00	9,25	52,47
Метаморфогенно-метасоматический	X-1	14,68	19,56	56,69
	X-2	28,84	38,96	55,89
	X-3	18,61	24,22	56,90
	X-4	32,30	42,79	56,93
	X-5	18,36	25,02	56,49
	X-6	17,07	23,01	56,21
	X-7	20,40	12,50	26,67
	X-8	9,02	25,27	12,38
Метасоматический	X-9	16,08	21,99	56,55
	В-1	22,23	20,9	57,40
	X-12	17,35	18,70	56,21
	Ф-1	16,10	11,5	26,1
	Ф-2	20,72	18,10	48,18
	Ф-3	14,96	29,54	36,51



Генетический тип руды:  
 1 – метаморфогенный;  
 2 – метаморфогенно-метасоматический;  
 3 – метаморфогенно-метасоматический графитизированный;  
 4 – метасоматический неизмененный;  
 5 – метасоматический графитизированный.

**В совместных работах Института геологии КарНЦ РАН с институтом ВИАМ** при выяснении пригодности кианитового концентрата для изготовления керамических форм при точном литье по выплавляемым моделям в период 1987-1990 гг. выполнены исследования по определению необходимой глубины обогащения кианита с наработкой опытной партии кианитового концентрата на базе **ОМЭ СЗТУ, Красное Село**.

Характеристика концентратов различной степени обогащения

Оксиды,	Руда	Содержание, % по массе				Опытная партия ИГ КарНЦ РАН весом 10кг
		Количество перешликов концентрата				
		1	2	3	4	
SiO <sub>2</sub>	59,22	48,44	46,28	43,12	37,20	40,28
TiO <sub>2</sub>	0,77	1,08	1,08	1,04	0,98	1,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,42	48,45	51,59	54,66	60,02	57,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,79	0,37	0,22	0,35	0,23	0,12
FeO	0,79	0	0,10	0	0	0
MnO	0,006	0,03	0,04	0,06	0,01	0,01
MgO	0,1	0,2	0,1	0,40	0	0,1
CaO	0,70	0,41	0,35	0,56	0,63	0,35
Na <sub>2</sub> O	0,30	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03
K <sub>2</sub> O	0,19	0,07	0,06	0,11	0,10	0,06
H <sub>2</sub> O	0,19	0,10	0,05	0,12	0,20	0,05
ппп	2,72	0,2	0,1	0,39	0,60	0,10
Сумма	100,12	100,41	99,87	99,87	98,75	99,73
S	2,45	0,2	0,16	0,18	0,1	0,03
SiO <sub>2</sub> св	48,54	20,00	15,00	10,00	1,5	7,50

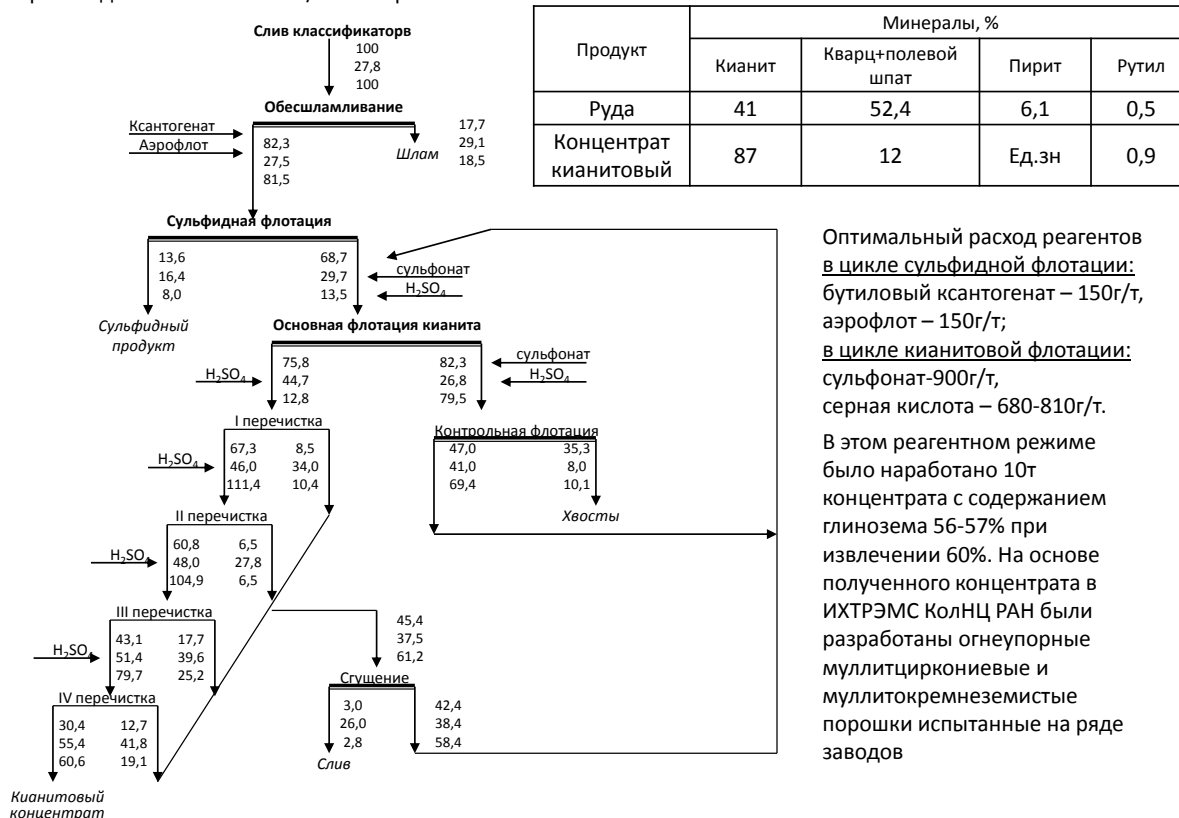
Кианитовый концентрат из ОМЭ

оксиды	руда	концентрат
SiO <sub>2</sub>	64,38	40,28
TiO <sub>2</sub>	0,99	1,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,46	57,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,71	0,12
MnO	0,03	0,004
MgO	0,001	0,10
CaO	0,06	0,35
Na <sub>2</sub> O	0,13	0,03
K <sub>2</sub> O	0,02	0,06
H <sub>2</sub> O	0,24	0,05
ппп	0,11	0,10
S	0,18	0,04
SiO <sub>2</sub> св		7,50

Допустимые пределы колебания в составе кианитового концентрата, используемого в литье

Оксиды	Концентрат кианитовый
SiO <sub>2</sub>	37,8-44,1
TiO <sub>2</sub>	0,05-1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53-62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05-0,8
MgO	0,05-0,4
CaO	0,05-0,2
SiO <sub>2</sub> св	1,5-15

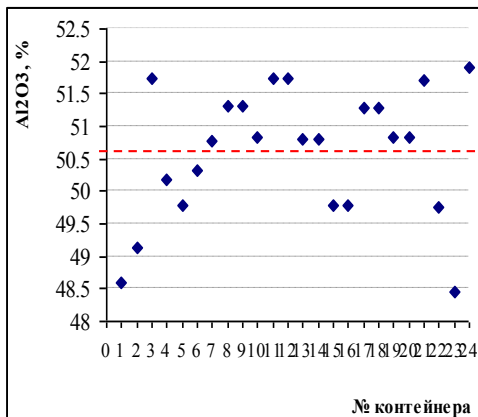
**Важным этапом явились испытания** обогатимости смешанной руды, которые проведены по договору о содружестве между Карельским и Кольским НЦ РАН на опытно-промышленной установке Горного института производительностью 500 кг/час на пробе весом 40 т.



**В 1997 г. норвежская компания Elkem** по договору с ООО «ИМК» провела испытания (в Minpro Strassa) кианита Хизоваарского месторождения, чтобы определить рыночный уровень продукта. По технологии трехстадийной флотации (сульфидов, слюды и кианита), был получен концентрат с содержанием 60 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 37,1 % SiO<sub>2</sub>, 0,27 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO, 1,4 % TiO<sub>2</sub>, 0,05 % S. Испытания на огнеупоры, давшие положительный результат, проведены в испытательной лаборатории материалов норвежской компании Elkem.

**В 1998 г. ООО «ИМК»** на опытной установке ОАО "Апатит" были проведены испытания флотационной технологии получения кианитового концентрата из руды отобранной на центральном карьере Южной Линзы. Целью этих испытаний была наработка опытной партии кианитового концентрата для укрупненных технологических исследований по получению противопопригарных покрытий. В результате было наработано 23 тонны кианитового концентрата, упакованного в контейнеры.

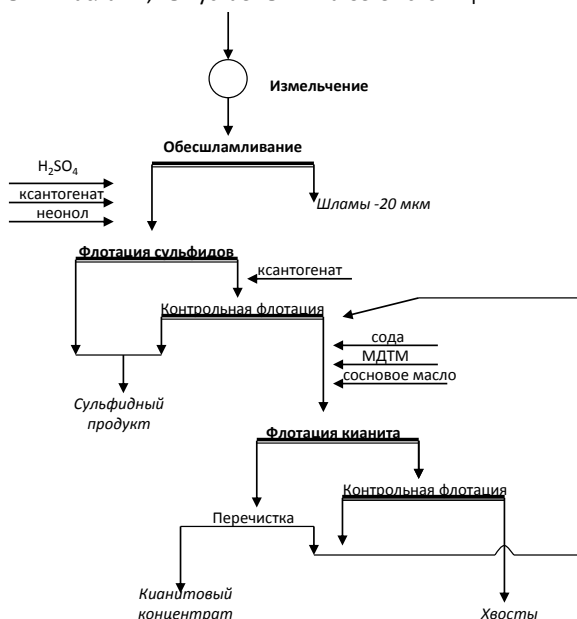
Химический и минеральный составы опытной партии кианитового концентрата



Класс крупности, мм	Выход %	Содержание минералов, % по массе								
		кианит	кварц	рутил	апатит	пирит	Р.о.	слюда	гранат	эги рин
+0,2	0,31	77,5	11,41	1,2	0,44	2,87	ед	1,29	2,65	1,92
0,2-0,16	3,4	91,20	4,20	0,63	0,42	1,14	0,30	0,61	0,84	0,25
0,16-0,1	17,08	91,50	4,0	1,60	1,4	0,3	0,40	0,30	0,4	Ед
0,1-0,071	24,9	87,16	4,35	4,35	1,50	0,15	0,77	0,91	-	0,4
0,071-0,05	27,04	78,90	12,60	4,50	2,40	0,2	0,8	0,3	ед	ед
-0,05	27,23	80,00	10,00	7,0	1,00	1,00	1	0,3	ед	ед
<b>Итого</b>	<b>100</b>	<b>82,97</b>	<b>9,07</b>	<b>4,50</b>	<b>1,55</b>	<b>1,06</b>	<b>0,33</b>	<b>0,465</b>	<b>0,1</b>	<b>0,11</b>

Технологическое загрязнение кианитового концентрата минералами, не принадлежащими данному комплексу пород – апатит, ромбический амфибол, эгирин. Конечный концентрат был микронизирован до крупности, исключающей его доочистку механическими методами обогащения (флотация, гравитация, сепарация и др.)

**В 2001 году ИГ КарНЦ РАН**, учитывая экономическую целесообразность применения при промышленном выпуске кианитового концентрата реагентов местного производства, в соответствии с Республиканской целевой программой «Освоение недр и развитие горнопромышленного комплекса Республики Карелия на 2000-2010 гг» проведены экспериментальные исследования по совершенствованию реагентного режима флотации кианита. Был выполнен комплекс лабораторных технологических исследований по изучению возможности флотации кианита талловыми маслами, выпускаемыми на Сегежском ЦБК.



С целью повышения экологической чистоты обогатительного передела в технологии кианитового производства, уточнен реагентный режим флотации сульфидов. Рекомендованный ранее токсичный реагент аэрофлот заменен оксиэтилированным алкилфенолом (реагент неонол).

Новая реагентная рецептура позволила сократить количество перечистных операций флотации кианита и получить кианитовые концентраты, содержащие 53,7-60,2%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при сквозном извлечении 42,1-61,9%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**В 2007 году по заказу ОАО «Гранит»** в ИГ выполнены исследования по испытанию комплексной технологии получения кианитового, сульфидного и кварцевого концентратов из кианитовых руд Хизоваарского месторождения является. При этом ранее разработанный реагентный режим с использованием местных реагентов уточнен при укрупненных испытаниях в замкнутом цикле. Проба отобрана в центральном карьере (аналог пробы X-13).

#### Минеральный состав исходной пробы, % по массе

Кианит	Кварц	Пирит	Пирротин	Слюда	Рутил	Андалузит
38,63	47,83	4,31	0,03	5,8	1,17	0,03

#### Технологические показатели обогащения

Продукт	Кианитовый концентрат	
	Выход, %	Содержание $Al_2O_3$ , %
Черновой кианитовый концентрат	47,44	40,72
Товарный кианитовый концентрат	28,53	57,34
Кварц предварительной стадии обогащения	43,95	5,27
Сульфидный продукт	6,66	2,71
Шлам	19,79	31,38
Исходная руда	100	25,05

#### Качественная характеристика кварцевого продукта

Оксиды	Кварцевый продукт до операций очистки	Кварц предварительной стадии обогащения
$SiO_2$	97,10	98,5
$TiO_2$	<0,01	0,01
$Al_2O_3$	1,98	0,65
$Fe_2O_3$	0,19	0,16
MnO	0,003	-
MgO	0,35	-
CaO	0,35	сл
$Na_2O$	0,08	0,10
$K_2O$	0,16	0,22
$H_2O$	0,14	0,05
ппп	не обн.	0,08
$\Sigma$	100,36	99,69
S	0,02	-

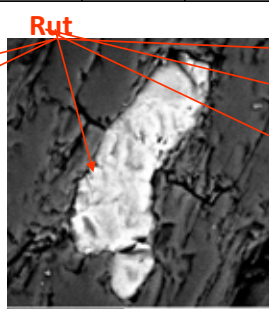
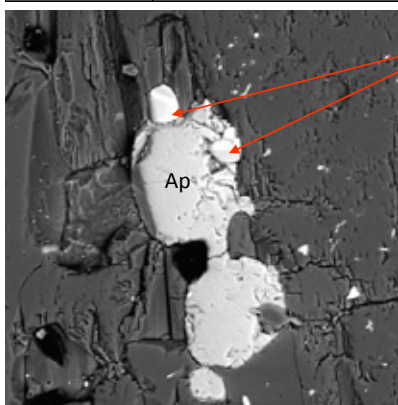
#### Химический состав флотационного кианитового концентрата

Оксиды	Содержание, % по массе
$SiO_2$	38,26
$TiO_2$	1,84
$Al_2O_3$	57,34
$Fe_2O_3$	0,90
MnO	0,014
MgO	0,22
CaO	0,60
$Na_2O$	0,11
$K_2O$	0,05
$H_2O$	0,19
Ппп	0,92
сумма	100,44

Поиск альтернативных технологий обогащения положительных результатов не дал

#### Эксперименты ИГ КарНЦ РАН по удалению рутила

Оксиды % по массе		$Al_2O_3$	$SiO_2$	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	FeO	$Na_2O$	$K_2O$
Кианитовый концентрат	товарный	57,10	37,80	<b>1,46</b>	0,61	0,28	0,04	0,03
	предельнообогащенный	60,02	37,50	<b>1,20</b>	0,40	0,03	0,05	0,04

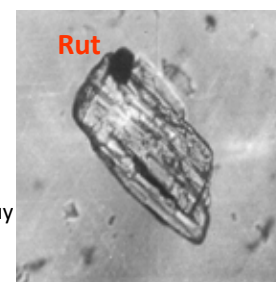


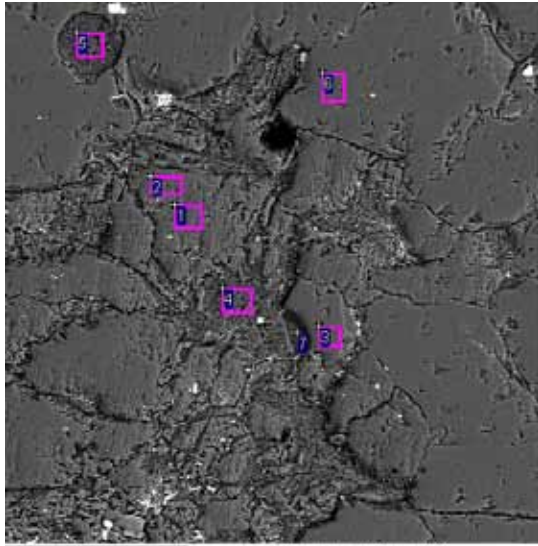
Селективное разделение рутила и кианита из-за близости их адсорбционных и флотационных свойств по отношению к ряду оксигидрильных собирателей - наиболее сложная задача в технологии обогащения кианитосодержащих руд. с

Проведены исследования по очистке кианита от рутила различными методами направленного воздействия. При акустическом воздействии происходит частичное раскрытие зерен кианита с высвобождением наиболее крупных включений рутила, расположенных вдоль трещин спайности.

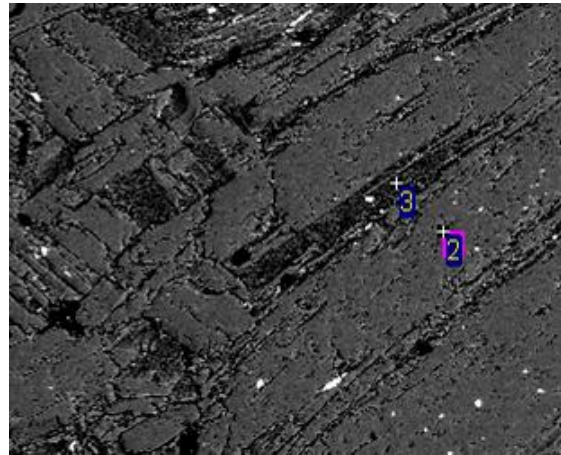
**В 1995 г** группой специалистов Института геологии КарНЦ РАН совместно с персоналом фирмы "Partek Industrial Minerals" (Финляндия) проведены испытания по удалению рутила на оборудовании и с реагентной рецептурой, используемой на предприятиях фирмы. В качестве реагента-собирателя селективного по отношению к рутилу испытаны три реагентные рецептуры, представляющие смесь следующих реагентов:

Рецепт 1.	Hotinor SM-15-200 г/т, Flotisor SM-35-400 г/т, Flotisor FS-2-150 г/т
Рецепт 2.	Hostaphat MDAH-400 г/т, Hostapur SAS-30-20 г/т
Рецепт 3.	Ное F2875-130 г/т, Hostaphat MDAH-40 г/т





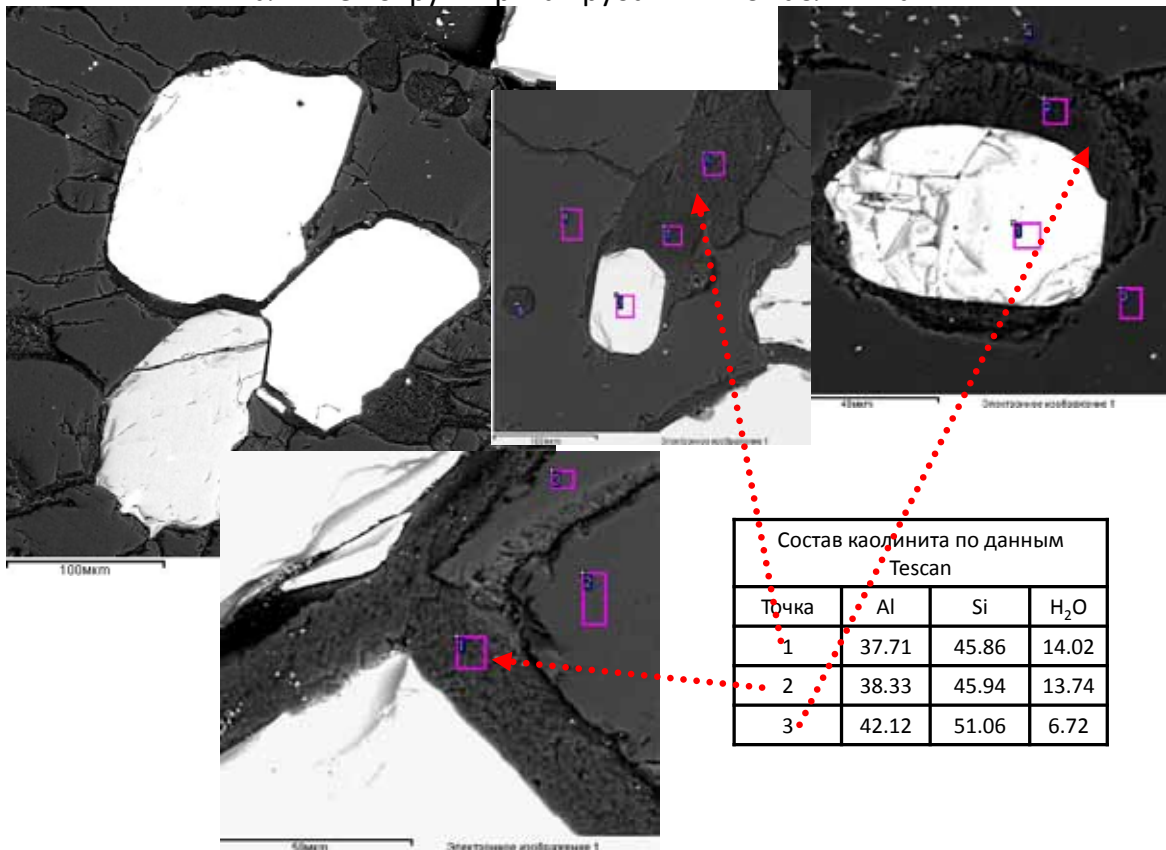
Изучение особенностей состава кианита в руде с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (микроанализатор INCA ENERGY 350), показало, что кроме неимененного кианита в руде присутствует и метасоматически измененный, со следами каолинизации.



Точка	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	H <sub>2</sub> O
1	63.46	36.54			
2	<b>42.74</b>	<b>49.65</b>			<b>7.31</b>
3		100.00			
4	<b>36.09</b>	<b>45.12</b>	<b>0.36</b>	<b>1.23</b>	<b>13.79</b>
5	<b>38.95</b>	<b>46.75</b>		<b>0.54</b>	<b>12.24</b>
6		100.00			
7		100.00			

Точка	Al	Si	H <sub>2</sub> O
2	63.21	36.09	
3	<b>39.60</b>	<b>47.38</b>	<b>12.85</b>

Наличие вокруг пирита «рубашки» из каолинита

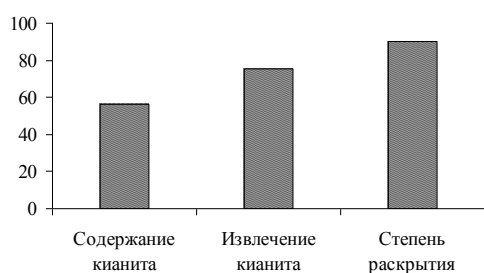


Состав каолинита по данным Tescan			
Точка	Al	Si	H <sub>2</sub> O
1	37.71	45.86	14.02
2	38.33	45.94	13.74
3	42.12	51.06	6.72

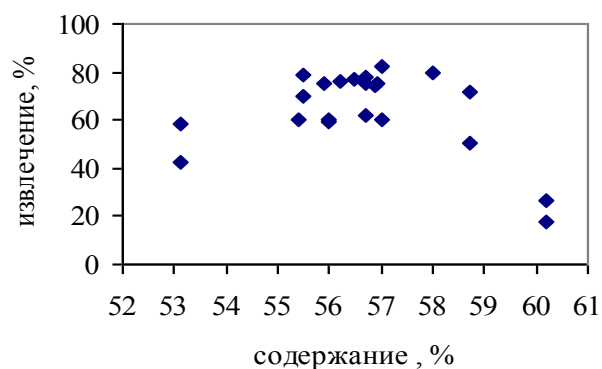
### Показатели обогащения по типам руды

Тип руды	Содержание $Al_2O_3$	Извлечение $Al_2O_3$
Пиритизированная	53,1	42,1 - 58,4
Игольчатый тип	56,7-58	61,9 - 78,3
Радиально-лучистая разновидность	60,2	18,1 - 26,6

Средние показатели обогащения

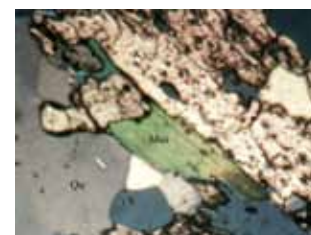
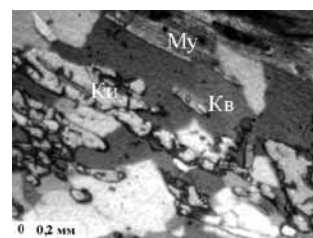
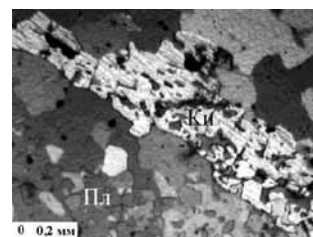


Характеристика концентрата  
(по данным многолетних исследований)



### Восточная Хизоваара

Участок	Разновидности руд	Среднее содержание минералов, % по массе								
		мусковит	кварц	плагиоклаз	кианит	биотит	сульфиды	турмалин	рутил	пр
Юго-восточный	Кварц - мусковитовый кварцит	20,1	52,6	13,4	7,2	1,7	4,0	0,2	0,4	0,4
	в том числе:									
	в центральной залежи	21,7	51,8	11,7	8,0	1,6	4,2	0,2	0,4	0,4
	в приконтактных зонах и на флангах	17,0	54,1	16,7	5,6	1,8	3,6	0,3	0,4	0,5
Северо-западный	Кварц-мусковитовый сланец	22,20	58,60	8,1	5,3	0,15	2,5	2,65	0,2	0,3



#### Свободный баланс результатов обогащения мусковитового цикла

Продукты обогащения	Технологические показатели, % по массе		
	Выход	Содержание мусковита	Извлечение мусковита
Мусковитовый концентрат	18,17	98,2	84,96
Кианитовый продукт	4,14	ед	-
Кварцевый продукт	64,62	0,62	1,91
Шлам (-0,1мм)	13,07	21,09	13,13
Исходная руда	100	21,00	100



## Гнейсы Чупинской свиты

### Минеральный состав

Минералы	Слюдозеро		Район Чупы		
	Запарная губа	Керн скв. 2	Малиновая Варакка, 11 горизонт	Сев берег оз.Варацкого	Тедино
Гранат	11,7	14,2	19,5	18,3	16,3
Кианит	10,8	12,8	8,6	12,8	9,0
Кварц	23,9	23,88	37,7	29,1	29,2
Плагиоклаз	30,30	33,3	10,0	17,3	16,8
Биотит	22,2	11,9	23,9	21,2	28,0
Рутил	0,5	0,5	0,3	0,8	0,1

### Химический состав кианита гнейсов Чупинской свиты

Оксиды	Слюдозеро		Район Чупы		
	Запарная губа	Керн скв. 2	Малиновая Варакка, 11 горизонт	Сев берег оз.Варацкого	Тедино
SiO <sub>2</sub>	37,0	36,63	37,05	37,97	37,97
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,025	0,35	0,98	0,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>60,86</b>	<b>62,84</b>	<b>60,78</b>	<b>59,52</b>	<b>60,48</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,93	0,132	0,65	0,27	0,20
FeO	0,24	-	0,14	0,36	0,12
MnO	0,002	0,002	0,01	0,01	0,01
MgO	0,50	-	0,14	0,16	0,07
CaO	0,42	0,11	0,40	0,06	0,02
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,03	0,24	0,09	0,07
K <sub>2</sub> O	0,09	0,06	0,11	0,13	0,10
H <sub>2</sub> O	0,12	0,03	0,16	0,26	0,32
п.п.п.	0,39	0,23	0,24	0,16	0,03
Сумма	99,78	100,09	100,27	99,97	99,50

### Технологические показатели обогащения гнейсов Чупинской свиты

Наименование продуктов	Слюдозеро		Район Чупы		
	Запарная губа	Керн скв. 2	Малиновая Варакка, 11 горизонт	Сев берег оз.Варацкого	Тедино
Кианитовый концентрат	12,6	13,7	10,3	13,2	9,9
Кварц-полевошпатовый продукт	50,6	30,0	42,7	45,4	42,9
Биотит	16,0	3,1	18,0	15,0	20,3
Гранат	12,9	25,7	20,1	18,6	17,0
Хвосты сепарации	1,0	3,4	1,6	0,6	0,9
шлам	6,9	5,4	7,3	8,2	9,0
исходная руда	100	100	100	100	100

## Кианит-гранатовые гнейсы Беломорского и Лоухского районов

### Минеральный состав гранатосодержащих гнейсов Беломорского и Лоухского районов

минералы	Содержание, % по массе			
	Тербеостров	Уни Ярви	Высота 181	Западная Плотина
Кианит	5,61	5,6	11-23	6,1
Гранат	21,38	10,6	13-30	10,8
Кварц	50,32	52,1	31-50	52,2
Полевой шпат	7,48		0,2-21	5,2
Амфибол	1,76		-	-
Биотит	12,86	31,4	0,1-6,6	25,4

Вещественный состав гнейсов и парагнейсов Чупинской свиты и Беломорского Шуерецкого кустов представлен смесью минеральных компонентов, содержание которых колеблется в широких пределах. Породообразующими являются кварц, биотит, амфибол, кианит, гранат, полевой шпат, поэтому уже на начальном этапе изучения они рассматривались как комплексные.

Так по данным предварительной оценки **только в Удинском месторождении** содержится:

- кианита – 1600 т.т.,
- граната – 4800 т.т.,
- биотита – 12000 т.т.



# КЛЮЧ ОТ КИАНИТОВОЙ КЛАДОВОЙ

ПРОЕКТ

Его предстоит найти сотрудникам Кольского научного центра

Зоя КАБЫШ, Апатиты

Минерал кианит, которым Кольский край богат как никакой другой регион мира, может стать экономически выгодной альтернативой бокситам как источнику алюминия. Запасы бокситов в нашей стране стремительно уменьшаются, качество руды снижается, а месторождения кианитов еще не початы. Именно этому перспективному направлению работы посвящен один из разделов фундаментальных исследований президиума РАН. Иными словами, задача государственной важности. Готовы ли выполнить ее ученые и промышленники? Речь об этом шла на Всероссийском совещании «Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала» в Геологическом институте КНЦ РАН.

Кианитовые запасы разведаны у нас давно, еще в 50-60-е годы прошлого века. Двадцать месторождений поставлены на государственный баланс и забыты до времени. Сейчас, когда отечественная промышленность ощутила недостаток собственных бокситов и стала завозить их из Гвинеи, Греции и Югославии, причем отдавать за это 60 процентов производимого алюминия, вопрос о кианитах встал ребром. И Мурманская область играет тут ведущую роль. Шутка ли сказать: из 650 миллионов тонн разведанных запасов российского кианита свыше 90 процентов находится на возвышенности Большие Кейвы, что на востоке Кольского полуострова.

Есть такие месторождения в Карелии и на Урале. Представители геологических институтов из этих регионов и собрались в Апатитах, чтобы обсудить результаты исследований. Возглавил совещание директор Института геологии и геохимии Уральского отделения РАН академик Виктор Коротеев.

- Наша задача - доказать правительству и отечественному бизнесу, что гораздо выгоднее вырабатывать алюминий из своего кианита, чем ввозить бокситы или строить заводы в Гвинее, - подчеркнул Виктор Алексеевич. - От нас сегодня ждут партий руды для промышленных испытаний - хотя бы 50 тысяч тонн! Необходим пилотный проект скорейшего обеспечения уральских заводов кианитовым сырьем, только тогда дело сдвинется с мертвой точки. А венцом ему станет геолого-экономическое обоснование целесообразности разработки кианитовых месторождений.

Надо сказать, в Карелии и на Урале в этом направлении продвинулись несколько дальше, чем в Мурманской области. Там уже получены обоснования перспективности освоения некоторых месторождений, проведены испытания на возможность применения сырья в огнеупорной, автомобильной и авиационной промышленности. Кольских ученых в детальной прора-

ботке таких планов останавливала удаленность Больших Кейв от дорог и металлургических заводов. Ну и самое главное - невостребованность сырья. С одной стороны, промышленности не нужно столько противопригарных покрытий, керамики и силумина, которые можно произвести из кейвских кианитов по существующим технологиям. С другой стороны, требуется много алюминия, но эффективной технологии его получения из кианитов пока нет.

- Мы должны заняться более детальными минералогическими исследованиями по сравнению с теми, что были сделаны нашими предшественниками, - подчеркнул директор Геологического института КНЦ РАН Юрий Войтеховский. - И разработкой технологии получения из кейвских кианитов алюминия.

Такая задача заполярной науке по плечу, необходимость ее решения уже заставила объединить усилия четырех институтов Кольского научного центра: к геологам активно подключились горняки, химики-технологи и экономисты. Предстоит найти вариант не только комплексной переработки кейвских руд (они содержат, в частности, ставролит - новый вид металлургического сырья, кварц, селенистый пирротин, золото, редкие металлы), но и доступа к этой кладовой. Ведь апатитские геологи едут до Больших Кейв на тягачах 200 километров, утопая в Марьинских болотах.

- Если вспомнить о существовании в 50 километрах от Кейв бывшего военного поселка Гремеха - готового порта, откуда руду можно переправлять морем хоть в Мурманск, хоть в Архангельск, а дальше железной дорогой куда угодно, то эта проблема решаема, - считает Юрий Войтеховский.

Огромную кладовую Больших Кейв пора открывать, убеждены ученые. Им отведен год, чтобы доказать, что это не научная фантастика. Академик Коротеев и его коллеги считают реальной перспективу освоения кианитовых месторождений России.

## ОАО «Кианит» запускает обогатительную фабрику

*Появятся ли в газетах будущего такие заголовки зависит от государства.*

Первое, что делает современный человек, когда хочет узнать какую-то новую для себя информацию, запускает Интернет-браузер и открывает сайт поисковой системы. Так, собственно, поступил и автор этих строк перед тем, как отправиться в геологический институт КНЦ РАН на Всероссийское совещание, посвящённое проблемам освоения кианитовых месторождений. Правда, заполонившие Всемирную паутину оккультисты и шаманы всё-таки сделали своё чёрное дело: единственное, что удалось почерпнуть из самых верхних строчек ответа «Яндекса» на поисковый запрос, – «кианит притягивает людей, рождённых под знаком Стрельца и Близнеца».

Если бы кто-то поставил себе цель надёжно посрамить излишне самоуверенных астрологов, такому человеку достаточно было бы просто узнать даты рождения участников, съехавших на совещание в Геологическом институте со всей страны от Северо-Запада до Урала, потому что количество Стрельцов и Близнецов среди них наверняка близко к среднестатистическому, но нет на территории страны людей, которых кианит притягивал бы к себе сильнее. Именно они посвящают этому минералу тысячи страниц научных исследований, именно они знают про этот камень всё, именно они убеждены: кианит способен принести России новые технологии и многомиллиардные (в долларовом эквиваленте) финансовые обороты.

Кианит – это минерал с высоким содержанием алюминия, больше половины мировых запасов которого находится в России, а 95 % российских запасов – на территории Кольско-

го полуострова. Его исследования, начавшиеся в тридцатых годах прошлого века, ведутся вот уже почти сто лет. Всё это время учёные пытаются найти способ обогащения руды, который позволил бы получить из неё концентрат с высоким содержанием

ворит Юрий Войтеховский, директор Геологического института КНЦ РАН. – Алюминиевые заводы до сих пор используют бокситовую руду, запасы которой в России истощены. Крупнейший холдинг «Русал» приобрёл в собственность бокситовые месторождения в тропиках и возит сырьё оттуда, но и их ресурс рано или поздно будет исчерпан. Запасы Кольского

промытой породы. Но на нашей стороне – несравнимый с уральским запас минерала. К тому же сейчас идёт процесс закрытия военно-морской базы подводных лодок в Грехихе, откуда до месторождения Большие Кейвы всего-то пятьдесят километров. Инфраструктура, жильё, причалы, линии электропередач там уже есть. Чем отдавать всё это на разграбление вандалам (а так, увы, участь закрытых военных городков), не проще ли построить в Грехихе обогатительную фабрику и отправлять оттуда готовый концентрат морем? По сравнению с прибылью, который мог бы принести такой проект, затраты на него – воистину сущие копейки.

– По сути, проект такого масштаба может потянуть либо государство, либо солидный частный инвестор вроде крупного металлургического холдинга, – говорит Юрий Войтеховский. – Но алюминиевые магнаты пока отмахиваются от кианита: для того чтобы перейти на этот вид руды, потребуются изменение технологического процесса и капитальная перестройка производства. Им, как видно, проще возить бокситовую руду из Новой Гвинеи. Значит, теоретически поддержка может исходить только от государства.

Губернатор Мурманской области Дмитрий Дмитриенко о потенциальных возможностях кианитовой «копилки» Кольского полуострова знает: ему об этом докладывали на специальной презентации. По итогам совещания 15 ноября учёные намерены попытаться пробить стену непонимания и на российской уровне, сформулировав свои предложения о строительстве кианитово-обогатительной фабрики в Грехихе к федеральному правительству.

*Текст и фото  
Михаила Елисеева*



*Директор Геологического института КНЦ РАН Юрий Войтеховский и директор Института геологии и геохимии Уральского отделения РАН Виктор Коротеев*

оксида алюминия. И результаты, в общем, есть: на сегодняшний день этот показатель в различных лабораториях составляет до 55 %. Он полностью удовлетворяет требованиям промышленности для производства огнеупорных материалов и активно в ней используется. Ещё одно применение кианитовый концентрат находит в производстве силумина, используемого в автомобильной и авиационной промышленности. Но это – капля в море по сравнению с перспективами его применения.

– Кианит – отличное сырьё для выпуска алюминия, – го-

полуострова могли бы стать «копилкой», сопоставимой по своим масштабам с залежами апатитовой и медно-никелевой руд. Это был бы огромный стимул для экономики региона: сотни миллиардов тонн руды, из которой можно получить сотни миллионов тонн алюминия.

Злые языки, правда, утверждают, что залежи кианита на Кольском полуострове весьма труднодоступны по сравнению хотя бы с уральскими месторождениями. На Урале с этим проще: там кианит извлекают из отработки золотопромышленности, то есть, по сути, из уже измельчённой и

# Время большого алюминия

## Апатиты. Ученые обсудили перспективные месторождения

15 ноября в Геологическом институте КНЦ РАН прошло Всероссийское совещание "Проблемы освоения квантовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала". Как и многие мероприятия 2010 года, его посвятили 80-летию Кольского научного центра.

Ольга Щербакова

Совещание было небольшим по составу, но очень концентрированным - сразу три академика РАН участвовали в его работе: Виктор Коротеев, директор Института геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Владимир Калинин, председатель КНЦ РАН и директор Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, а также Феликс Митрофанов, советник Геологического института КНЦ РАН.

Тема, которую обсуждали ученые, даже не завтрашний, а послезавтрашний день российской промышленности и эко-

номии, как говорит директор Геологического института профессор Юрий Войтеховский. Ведь квантовые месторождения, а они есть на Кольском полуострове, в Карелии, на Урале - это полезные ископаемые стратегического значения, они - гарантия экономической безопасности страны по алюминию.

Сейчас Россия занимает второе место в мире по производству алюминия. Исходная руда - тыхвинские бокситы. Но в производстве используется только 40 процентов отечественного сырья, остальное возит из-за границы - Гвинея, бывшей Югославии, Греции. За импорт сырья Россия отдает поставщикам 90 процентов производимого алюминия.

Запасы бокситов в нашей стране быстро уменьшаются, качество сырья ухудшается, а 650 миллионов тонн кванта лежат нетронутыми. 90 процентов из них составляют разведанные запасы в Больших Кейвах на востоке Кольского полуострова. Более 20 месторождений официально поставлены на государственный баланс. Их начали изучать еще до войны, а закончили в 50-х годах XX века.



Будущие кванты обсуждают профессор Юрий Войтеховский и академики РАН Виктор Коротеев и Владимир Калинин.

Фото из архива КНЦ РАН.

Парадокс заключается в том, что, имея качественное глиноземное сырье - кванты, Россия покупает его за границей в виде бокситов. Причина тому - якобы отсутствие технологии извлечения алюминия из бокситов. Как говорят исследователи, это более "упорная" руда, перерабатывать ее намного труднее, чем бокситы или нефелины. Правда, в ИХТРЭМС КНЦ РАН определены перспективы по разработке технологии наместились, но чтобы развивать их в масштабах, интересных для промышленности, нужны немалые деньги.

Как говорит Юрий Войтеховский, все это напоминает немного другую ситуацию, когда молодой Советский республике не на что было поехать в Марокко фосфориты, зато на Кольском полуострове нашли огромные запасы "упорной" тогда апатита. И ведь построили руд-

ники, обогажительные фабрики, создали технологии - и получили свои фосфорные удобрения!

Оказалось, что кванты - комплексные переработки руд от современных промышленных мена и люди меняются. И отношение к запасам сырья, к их расходованию тоже должно измениться.

Участники совещания пришли к выводу, что информации собрано много, получены интересные результаты исследований. Ученые обсудили перспективы дальнейшей работы и приняли решение - стучаться в государственные и частные структуры, чтобы найти необходимые средства для продолжения исследований, очень нужных всей стране и Мурманской области.

# ФОТОРЕПОРТАЖ













## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА . . . . .	3
МИНЕРАЛЫ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КИАНИТОВЫХ СЛАНЦАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ Н. ШУУРУРТА, Б. КЕЙВЫ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ . . . . .	4
Войтеховский Ю.Л., Нерадовский Ю.Н., Савченко Е.Э.	
КАРБОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КИАНИТА . . . . .	8
Гришин Н.Н., Белогурова О.А., Иванова А.Г., Нерадовский Ю.Н. Войтеховский Ю.Л., Калининков В.Т.	
УРАЛЬСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КИАНИТА – ПЕРСПЕКТИВНАЯ БАЗА ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ОГНЕУПОРОВ, СИЛУМИНА И АЛЮМИНИЯ . . . . .	15
Коротеев В. А., Огородников В. Н., Поленов Ю. А.*, Сазонов В. Н., Савичев А. Н., Коротеев Д. В.	
ЛИТЕЙНАЯ ОДИССЕЯ. . . . .	23
Мотов Д.Л.	
НАХОДКА ЦИНКСОДЕРЖАЩЕГО СТАВРОЛИТА В КЕЙВАХ . . . . .	26
Нерадовский Ю.Н, Войтеховский Ю.Л., Савченко Е.Э.	
МОРФОЛОГИЯ И ЗОНАЛЬНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ СТАВРОЛИТА ИЗ СТАВРОЛИТОВЫХ СЛАНЦЕВ КЕЙВ . . . . .	29
Нерадовский Ю.Н., Войтеховский Ю.Л., Карпов С.М.	
ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ОБОГАЩЕНИЯ КИАНИТОВЫХ РУД КАРЕЛИИ . . . . .	35
Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.	
КИАНИТЫ КАРЕЛИИ: ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РУДНОГО ПОТЕНЦИАЛА . . . . .	46
Щипцов В.В., Гаранжа А.В.	
ПРЕЗЕНТАЦИИ . . . . .	54
ПРЕССА . . . . .	177
ФОТОРЕПОРТАЖ . . . . .	181

*Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала.  
Материалы Всероссийского совещания, посвящённого 80-летию Кольского НЦ РАН.*

*Апатиты, 15 ноября 2010 г.*

*Рекомендовано к печати Учёным советом Геологического института КНЦ РАН  
и Советом Кольского отделения РМО*

*Научное некоммерческое издание*

*Отпечатано в ООО К&М  
184209 г. Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 17а  
тел./факс (815 55) 77329*

*Тираж 100 экз.*

