

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ СИЛЛИМАНИТА – БАЗА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ОГНЕУПОРОВ, СИЛУМИНА И АЛЮМИНИЯ

В. А. Коротеев, В. Н. Огородников, Ю. А. Поленов*,
А. Н. Савичев, Д. В. Коротеев

Глиноземистое сырье (бокситы, корунд, наждак и др.) может быть получено из очень большого числа минералов и пород (пиррофиллит, каолинит, гиббсит, диаспор, полиморфы Al_2SiO_5). В настоящее время практически только гидраты алюминия из бокситов и алунит (сульфат алюминия) используются в качестве руды для получения алюминия. Алумосиликаты пока употребляются для получения силумина, одновременно разрабатываются дешевые методы получения из них алюминия. Силумин – это сплав кремния и алюминия. Он имеет низкую плотность ($2.4\text{--}2.7\text{ г/см}^3$), высокую удельную прочность и хорошие литейные свойства. Содержание кремния в разных его марках колеблется от 4.5–6.0 до 20–22 мас. %. Введение в небольших количествах Mn, Ni, Ti, Cu, Mg меняет физические характеристики сплавов, что позволяет использовать их в различных отраслях промышленности. 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 раз-

витых стран. По составу они подразделяются на мулито-кремнеземистые, муллитовые и муллитокорундовые с огнеупорностью 1750–1850, 1800–1900 и 1850–1950°C. Их получают из минералов группы силлиманита.

Минералы группы силлиманита 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. т (табл. 1). Если его производить по 3.5 млн. т 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. т. Реализация программы позволит ликвидировать дефицит глинозема и сделать алюминиевое производство России независимым от импорта. Из табл. 1 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 алюмокремниевого метасоматоза [11,15].

ПРОМЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ГЛИНОЗЕМИСТОГО СЫРЬЯ
(ФОРМАЦИЯ БОКСИТОВ)

Докембрийские месторождения бокситов отличаются высоким содержанием Al_2O_3 в руде преимущественно благодаря большой примеси каолина. При метаморфизме качество руды, по-видимому, ухудшается, так как кианит и силлиманит образу-

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

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

* Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

ются за счет каолинита, кварца и гидратов алюминия, вследствие чего в метаморфизованной породе содержание Al_2O_3 должно быть ниже, чем в гидроокислах алюминия первоначального боксита. Метаморфизованные бокситы известны во всех фациях метаморфизма (эпидот-амфиболитовая – месторождение наждака на Урале, амфиболитовая – корундово-кианитовое месторождение Якутии, гранулитовая – корундово-силлиманитовые месторождения Южной Австралии). Метаморфизованная латеритная кора выветривания, приуроченная к основанию верхнепротерозойской патомской серии в Северо-Байкальском и Патомском нагорьях, впервые установленная В. К. Головенком, прослеживается от зоны силлиманита через зоны кианита, ставролита, граната, биотита, хлорита, вплоть до неметаморфизованного состояния [3, 6]. В зонах слабого метаморфизма в составе глиноземистых формаций широко распространены пиррофиллитовые сланцы, которые могут иметь самостоятельное значение как месторождения пиррофиллита [15].

ОРТОМЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГЛИНОЗЕМИСТОГО СЫРЬЯ

Формация регионально-метаморфических кианитовых и силлиманитовых сланцев, не связанная с корами выветривания, рассматривается в типе ортометаморфических месторождений, так как до метаморфических преобразований, выражающихся в кристаллизации кианита и силлиманита, эти сланцы не представляли промышленного интереса, ввиду сравнительно низкого содержания Al_2O_3 , который содержится в них не в гидратной форме, а в виде алюмосиликатных минералов. В отличие от метаморфизованных бокситов и латеритов, горизонты регионально-метаморфических, кианитовых и силлиманитовых сланцев в тонком переслаивании с кварцитами и слюдяно-кварцевыми сланцами обнаруживаются почти по всему разрезу флишеидных толщ [6]. Подавляющее большинство месторождений глиноземистого сырья, связанных с глиноземистыми сланцами флишеидного характера, независимо от их возраста, залегают в породах, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации. В пределах пород беломорского блока (Карелия) известно только одно относительно крупное месторождение кианитовых сланцев – Хизоварское. В подвижных поясах обрамления Сибирской платформы, в разновозрастных структурно-фациальных зонах обычно присутствуют протягивающиеся на значительные расстояния свиты глиноземистых пород. Так, например, для Северо-Байкальского и Патомского нагорий в пределах мамской кристаллической полосы глиноземистая формация представлена кианитовыми (силлиманитовыми) сланцами. Кроме того, глиноземистые кристаллические слан-

цы с кианитом и силлиманитом присутствуют и в других областях (Украина, Урал, Кокчетавская глыба, В. Казахстан и др.) развития докембрийских образований [1, 2, 7, 9, 10, 15].

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГЛИНОЗЕМИСТОГО СЫРЬЯ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПРИ ПРОЦЕССАХ АЛЮМОКРЕМНИЕВОГО МЕТАСОМАТОЗА (КИСЛОТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ)

Первые сведения о метасоматическом образовании кианита принадлежат Дж. Стаки, изучавшему кианитовые месторождения Северной Каролины (США). Он описывал замещение кианитом (с кварцем) пегматитов и окружающих их сланцев в приконтактной зоне гранито-гнейсов. В настоящее время создана стройная теория возникновения $Kf + (Kf + Sil + And)$ ассоциаций, образующих значительные концентрации глиноземистого сырья в стадию кислотного выщелачивания при постмагматическом метасоматозе. Наиболее типичными силлиманит-кварцевыми месторождениями этого типа являются Кяхтинское и Китойское в Восточном Саяне. Метасоматические силлиманитовые кварциты в виде линз залегают в толще силлиманит-биотитовых гнейсов [10, 17].

На Урале широко развиты месторождения кианитовых кварцитов, реже силлиманитовых кварцитов, залегающих в шовных зонах, секущих силлиманит(кианит)содержащие гнейсы Адамовского, Кочкарского, Мурзинско-Адуйского, Уфалейского, Сысертского метаморфических комплексов [5, 8, 9, 11–14, 16].

Кроме того, на метаморфогенных и метаморфогенно-метасоматических месторождениях обычно наблюдаются кварцевые жилы выполнения, имеющие в зальбандах андалузит, кианит или силлиманит, зачастую в парагенезисе с мусковитом [1, 10–12]. Концентрации высокоглиноземистых минералов в этих зонах представляют лишь минералогический интерес, промышленных концентраций не образуют.

Кейвские кианитовые месторождения по своим масштабам и запасам превосходят месторождения глиноземистого сырья все других типов. Изучение кейвских кианитовых месторождений позволило установить их полиметаморфический генезис, обусловленный длительностью и сложностью геологической истории формирования восточной части Балтийского щита.

На современном эрозионном срезе степень метаморфизма пород кольско-беломорского (верхнеархейского) комплекса варьирует от амфиболитовой до гранулитовой фации, фиксируя полиметаморфические преобразования. Термодинамические условия и петрологические особенности раннеархейского метаморфизма определяют его принад-

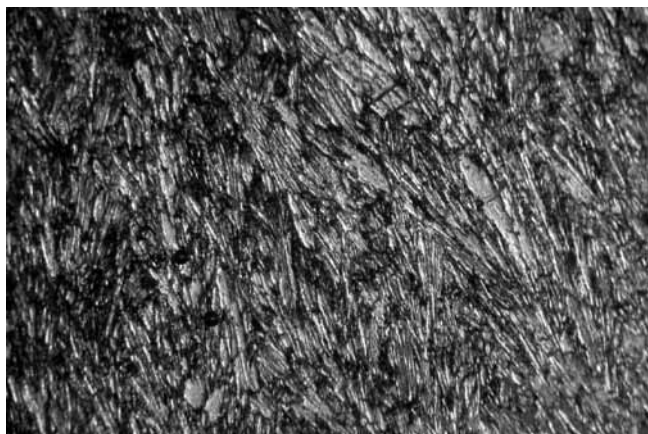


Рис. 1. Сноповидно-лучистый тип кианита.
Шлиф Кей-12, с анализатором, $\times 40$. Кейвская свита
(Кольский п-ов)

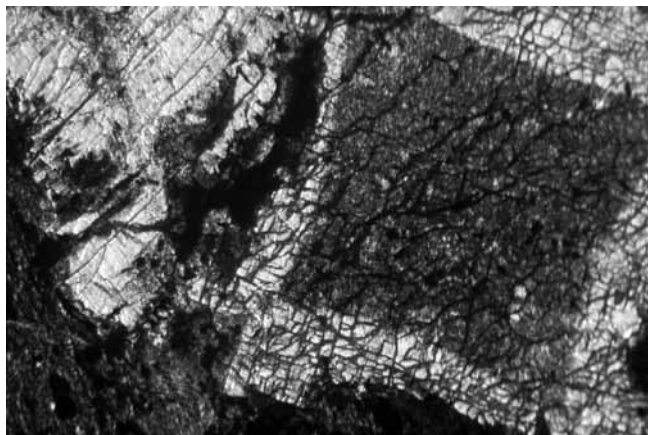


Рис. 2. Развитие кианита по хиастилиту.
Шлиф Кей-19, с анализатором, $\times 40$. Кейвская свита,
Кольский п-ов

лежность к наиболее глубинным фациальным сериям андалузит-силлиманитового типа, а позднего (карельского) метаморфизма в условиях кианит-силлиманитового типа [4].

Продуктивный пласт кианитовых руд со средним содержанием кианита 40–45% приурочен к южному крылу Кейвского синклинория и протягивается на расстояние около 400 км при мощности от 15 до 80 м. Протерозойский этап метаморфизма формирует волокнисто-игольчатые, конкреционные, порфиробластические кианитовые руды. Наряду с ними наблюдается образование параморфических руд за счет первичного андалузита (хиастилита). Важно отметить, что в регрессивную стадию при кислотном выщелачивании образовывались кварц-кианитовые жилы [15].

Отличительной чертой кианитовых *волокнисто-игольчатых* руд является выделение кианита в сланцах в форме тонких волокон или игольчатых призм, которые собраны в веретеновидные, сноповидно-или радиально-лучистые порфиробластические

агрегаты (рис. 1). Минеральный состав кианитовых руд данного типа обладает значительным постоянством. Главными минералами руд являются кварц и кианит, реже существенная роль принадлежит также мусковиту. Кианит рассматриваемого типа руд обладает графито-черной или серой окраской, за счет включений углеродистого вещества. Вместе с углеродистым веществом ассоциируется рутил. Второстепенными минералами являются углеродистое вещество, ставролит, плагиоклаз, пирротин. Минералами-примесями служат рутил, ильменит, пирит, халькопирит, магнетит, апатит, циркон [1].

Конкреционные руды представляют собой породы темно-серого цвета с узловатым сложением вследствие присутствия округлых или эллипсоидальных конкреционных стяжений кианита, заключенных в тонкозернистую слюдиисто-кварцевую основную ткань породы. Кианит в крупноконкреционных рудах выделяется главным образом в виде крупных, 3–5 см в поперечнике, округлых стяжений, сложенных агрегатом ветвящихся тонких кристаллов, растущих из общего центра. В составе минералов основной ткани руд, кроме преобладающих кварца и мусковита, а также сульфидов, присутствуют в переменных количествах плагиоклаз, ставролит и все другие обычные второстепенные и акцессорные минералы кианитовых сланцев.

Характерной особенностью кианитовых руд *параморфического типа* служит выделение кианита в виде параморфических агрегатов по хиастилиту, в связи с чем в главной своей массе кианит свободен от включений углеродистого вещества и обладает бледно-розовой или белой окраской. Кианитовые параморфические агрегаты отчетливо выделяются на фоне темно-серой или черной основной слюдяно-кварцевой ткани породы. В крупнопараморфических рудах всегда присутствует кианит не только в виде параморфоз, но и в виде конкреционных, реже волокнистых агрегатов. Кианит выделяется в виде сплошных агрегатов пластинчатых кристаллов, сохраняющих форму и некоторые особенности строения (узоры роста и распределения включений углеродистого вещества) псевдоквадратных призм хиастилита, по которому возникли кианитовые параморфозы (рис. 2). В кианите параморфических агрегатов рутил практически отсутствует [1].

Порфиробластические кианитовые руды отличаются рядом существенных особенностей, связанных с их генезисом. Прежде всего, их распространение ограничено узкими, но протяженными зонами контактов кианитовых сланцев с интрузивными телами метабазитов, локализованными в протяженных надвиговых шовных зонах. Далее, в них практически отсутствует углеродистое вещество (выгорание при термальном воздействии магматического тела), благодаря чему кианиты и руды имеют светлый цвет.

Кианит присутствует в пониженном количестве по сравнению с исходными кианитовыми сланцами, за счет которых возникают порфиробластические руды. Его содержание обычно не превышает 25–30 вес. %. В процессе метаморфогенно-метасоматического преобразования исходных кианитовых сланцев кианит, испытывая собирательную перекристаллизацию, образует сложные порфиробластические агрегаты крупных кристаллов, нередко звездчатой формы, или одиночные крупные порфиробласты (идиобласты) и их сростки. Размер идиобласт достигает 25 см в длину при 2–3 см в поперечнике. Перекристаллизация кианита осуществляется при процессах окварцевания и мусковитизации, с преобразованием кианитовых сланцев в кианитовые кварциты и кварц-мусковит-кианитовые метасоматиты. В типичных порфиробластических кианитовых кварцитах появляется рутил до 1%, короткостолбчатого габитуса, черного цвета, размером до 1–2 мм по длинной оси.

Алюмокремниевый метасоматоз, развитый вдоль тектонических надвиговых структур, проявлен в виде окварцевания, с которым связано также новообразование, перекристаллизация кианита в виде сноповидно-лучистых агрегатов волокнистых кристаллов белого цвета, практически не содержащих углеродистого вещества. Характерно, что рост перекристаллизованного кианита осуществляется преимущественно в направлении, нормальном к плоскостям расщепления. К трещинам отрыва и скалывания в шовных зонах приурочено образование кварцево-кианитовых и кварцевых жил с кианитовыми оторочками. В зальбандах кварцевых жил образуются почти мономинеральные кианитовые оторочки, мощность которых достигает в некоторых случаях 1–2 м, составляя обычно нескольких десятков сантиметров (рис. 3).

Метаморфические комплексы Урала имеют в своей основе гнейсово-амфиболитовые блоки докембрийского возраста, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации. В толщах, сложенных первично осадочными породами, развиты парагенезисы андалузит-силлиманитовой или кианит-силлиманитовой серий, но масштабы распространения высокоглиноземистых пород значительно уступают Кольскому полуострову. Поэтому месторождений силлиманита (кианита) метаморфогенного типа на Урале не зафиксировано. Но широкое развитие шовных зон в обрамлении гнейсовых блоков привело к образованию протяженных зон кварцитов, в том числе, и кианитовых. Месторождения кианита, изученные еще в довоенные годы [8], относятся к типу кианитовых кварцитов, среди которых встречаются секущие кварцевые жилы, содержащие в зальбандах силлиманит, андалузит, кианит [12, 13].

Сравнение Уральских кианитов (пробы БР, БС, КУ, КТ, СВЛ) с кианитом свиты Кейв (пробы КЕЙ)

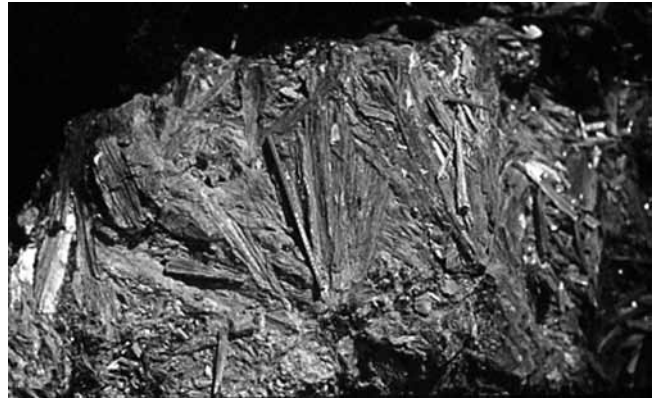


Рис. 3. Голубой кианит в оторочке кварцевой жилы (кейвская свита, Кольский п-ов).

методами математической статистики и факторного анализа показал их сходство по минеральным включениям и примесям, по химсоставу, содержанию редких и редкоземельных элементов (рис. 4).

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-Юльевской россыпи преобладает порфиробластический кианит, достаточно чистый (БС-1), к тому же он в значительной мере уже обогащен (рис. 5).

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. т 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

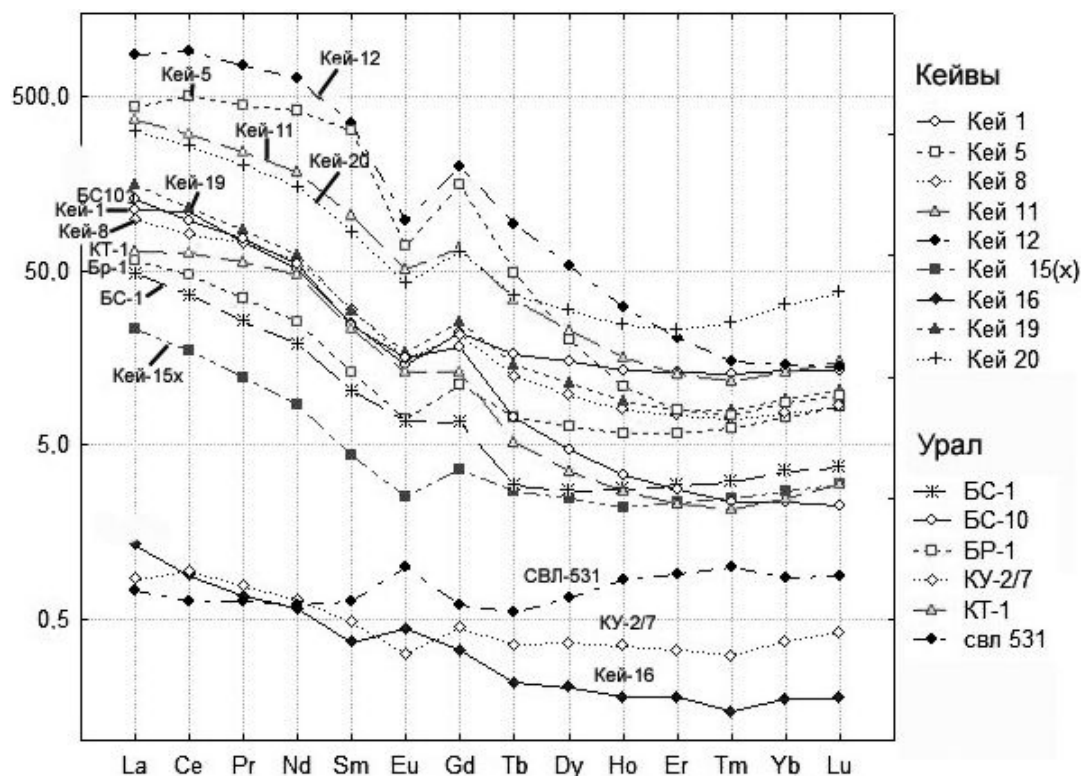


Рис. 4. Распределение редких земель, нормированных по хондриту, в кианитах месторождений Кольского полуострова (кейвская свита) и Урала.

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 ор-

ганизовать обжиговое, огнеупорное, керамическое, силикатное, алюминиевое, стекольное и другие предприятия.

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, силиката и алюминия"

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 320 с.
2. Великославинский Д.А., Казаков А.Н., Соколов Ю.М. Мамский комплекс Северо-Байкальского нагорья. Геология, метаморфизм, пегматиты. Л.: Наука, 1963. 227 с.
3. Великославинский Д.А., Петров Б.В. Стратиграфия и метаморфическая зональность верхнего докембрия области сочленения Северо-Байкальского и Патомского нагорий // Геология и геохронология докембрия. М.: Изд-во АН СССР, 1964. С. 126–132.



Рис. 5. Концентрат порфиробластического кианита из техногенной россыпи (Андреево-Юльевская россыпь, Кочкарский комплекс, Ю. Урал).

4. *Глебовицкий В.А.* Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. Л.: Наука, 1973. 128 с.
5. *Глушкова Г.А.* Кислотное выщелачивание с образованием силлиманита на примере Сысертско-Ильменогорского гнейсового комплекса. // *Метаморфизм горных пород*. Свердловск: СГИ, 1970. С. 40–42.
6. *Головенко В.К.* Высокоглиноземистые формации докембрия. Л.: Наука, 1977. 205 с.
7. *Добрецов Н.Л.* Специфика раннедокембрийского метаморфизма и ранняя история Земли // *Метаморфизм раннего докембрия*. Апатиты: ИГ Кол. ф-л АН СССР, 1980. С. 19–31.
8. *Игумнов А.Н., Кожевников К.Е.* Уральские месторождения дистена (кианит). Тр. ВИМС. Вып. 90. 1935. 80 с.
9. *Кейльман Г.А.* Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М.: Недра, 1974. 200 с.
10. *Кориковский С.П.* Метаморфизм, гранитизация и постмагматические процессы в докембрии Удокано-Становой зоны. М.: Недра, 1967. 298 с.
11. *Огородников В.Н.* Алюмокремниевые метасоматиты Кочкарского и Адамовского метаморфических комплексов. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: СГИ, 1975. 31 с.
12. *Огородников В.Н.* Закономерности размещения и условия образования кварцево-жильных хрусталеносных и золоторудных месторождений Урала. Автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург: СГИ, 1993. 28 с.
13. *Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А.* Минералогия шовных зон Урала. Ч.1. Кочкарский рудный район (Южный Урал). Екатеринбург: УГГА, 2004. 216 с.
14. *Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А.* Минералогия шовных зон Урала. Ч.3. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, УГГУ, 2007. 187 с.
15. *Основы металлогении метаморфических поясов докембрия*. Л.: Наука, 1984. 340 с.
16. *Рапопорт М.С.* Кианитовые алюмокварциты восточного склона Среднего Урала и роль кислотного выщелачивания в их образовании // *Метаморфизм горных пород*. Свердловск: СГИ, 1970. С. 43–45.
17. *Хлестов В.В.* Генетические особенности Кяхтинского и Китойского силлиманитовых месторождений. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИМ СО АН СССР, 1964. 20 с.