

Геологическая позиция и минеральный состав кианитовых амфиболитов Чупинского парагнейсового пояса (Беломорская провинция Восточной Фенноскандии)*

Е. Ю. Акимова^{1,2}, П. Я. Азимов¹, Н. С. Серебряков³

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

² Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

Для цитирования: Акимова, Е. Ю., Азимов, П. Я., Серебряков, Н. С. (2021). Геологическая позиция и минеральный состав кианитовых амфиболитов Чупинского парагнейсового пояса (Беломорская провинция Восточной Фенноскандии). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (2), 310–330. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.207>

Проявление кианитовых амфиболитов Лягкомина (Беломорская провинция Фенноскандинавского щита) приурочено к амфиболитовой будине среди кианит-гранат-биотитовых и гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи. Основные типы пород на проявлении Лягкомина — мезо- и меланократовые гранат-кианитовые амфиболиты с крупным кианитом (более 1 см в длину) и кианит-гранатовые амфиболиты с мелким кианитом. Присутствуют также лейкократовые гранат-биотит-амфибол-плагиоклазовые породы с кианитом, меланократовые эпидот-ставролит-амфиболитовые породы, цоизитовые плагиоклазиты со ставролитом и кианитом. Вмещающие гнейсы вокруг будины метасоматически изменены: в кианитовых гнейсах исчезает кварц, а в гранат-биотитовых гнейсах появляется амфибол. Кальциевые амфиболы в кианитовых амфиболитах представлены высокоглиноземистым чермакитом, биотит — умеренноглиноземистым флогопитом, гранат относится к пироп-альмандиновому ряду с высоким содержанием гроссуляра. Плагиоклазы имеют средний и основной составы. Средние плагиоклазы распространены в кианитовых амфиболитах без ставролита и в кианитовых амфиболитах со ставролитовыми каймами, а основные — в ставролитовых амфиболитах. Многие породы характеризуются реакционными структурами, отражающими смену парагенезисов. В породах реконструирована метасоматическая зональность с последовательной сменой парагенезисов: $Hbl + Grt + Pl + Qtz \pm Bt$ (гранатовый амфиболит) $\rightarrow Hbl + Grt + Pl + Ky + Qtz \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Pl + Ky \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Pl + Ky + St \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Ky + Pl + St + Czo \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Pl + St + Czo \pm Bt \rightarrow Hbl + St + Czo + Pl \pm Bt$. В описанном ряду увеличивается глиноземистость и снижается магнизиальность главных породообразующих минералов, а также происходит общая десиликация породы. Описанная минераль-

* Работа выполнена в рамках госзадания ИГГД РАН (темы НИР FMUW-2021-0002 и FMUW-2019-0013) и поддержана РФФИ (грант № 17-05-00265).

ная зональность сформирована во время метаморфизма в результате воздействия на исходный амфиболит потока флюидов в сдвиговой зоне (т. е. в результате метаморфогенного метасоматоза). Петрологические и изотопные данные указывают, что кианитовые амфиболиты Лягкомины генетически связаны с проявлениями корунд-содержащих пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита.

Ключевые слова: Беломорская провинция, метасоматоз, кианит, ставролит, кианитсодержащие амфиболиты.

1. Введение

Кианит и ставролит — характерные минералы метапелитов, и только в редких случаях они могут возникать в богатых кальцием породах в ассоциации с роговой обманкой. О происхождении кианит- и ставролитсодержащих амфиболитов нет единого мнения. Одни авторы объясняют появление редких минеральных ассоциаций в амфиболитах необычностью РТ-параметров формирования пород — повышенными давлениями (Selverstone et al., 1984; Helms et al., 1987; Encarnacion et al., 1995), другие указывают на влияние необычного состава субстрата этих пород — главным образом, высокой глиноземистости (Purtscheller and Mogessie, 1984; Ward, 1984). Арнольд (Arnold et al., 2000) считает, что оба этих фактора одинаково важны. Высокую глиноземистость пород одни авторы связывают с дометаморфическим метасоматозом (Куумjian, 1998); другие — с метасоматозом во время метаморфизма (Hietanen, 1959; Серебряков и Аристов, 2004; Berger et al., 2010). В связи со спорностью генезиса кианитовых амфиболитов представляют интерес проявления кианитовых амфиболитов в Беломорской провинции (Володичев, 1990), наиболее крупное из которых — Лягкомина (Лутковская, 1971) — рассмотрено в настоящей статье.

2. Геологическая позиция

2.1. Беломорская провинция

Беломорская провинция представляет собой сложную покровно-складчатую структуру, расположенную в северо-восточной части Фенноскандинавского щита между Карельским и Кольским мегаблоками. Провинция сложена орто- и паропородами (гнейсами и амфиболитами) с преимущественно мезо- и неоархейским возрастом протолита (Глебовицкий, 2005). Эти породы были неоднократно метаморфизованы в архее, затем прорваны ранне- и среднепротерозойскими базитовыми интрузиями в палеопротерозое (Степанова и др., 2011), а затем, в период 1.94–1.84 млрд лет, снова метаморфизованы (Бибикова и др., 1993; 2004).

В осевой части Беломорской провинции находится Чупинский парагнейсовый пояс (рис. 1), в составе которого преобладают глиноземистые (гранат-биотитовые и кианит-гранат-биотитовые) гнейсы. Среди гнейсов в Чупинском поясе встречаются многочисленные тела амфиболитов, в том числе и редких кианит- и ставролитсодержащих (Володичев, 1990).

В большинстве своем проявления кианит- и ставролитсодержащих амфиболитов Беломорской провинции пространственно и генетически связаны с корунд- и цоизитсодержащими метасоматитами по метабазитам и кианит-гранат-биотито-

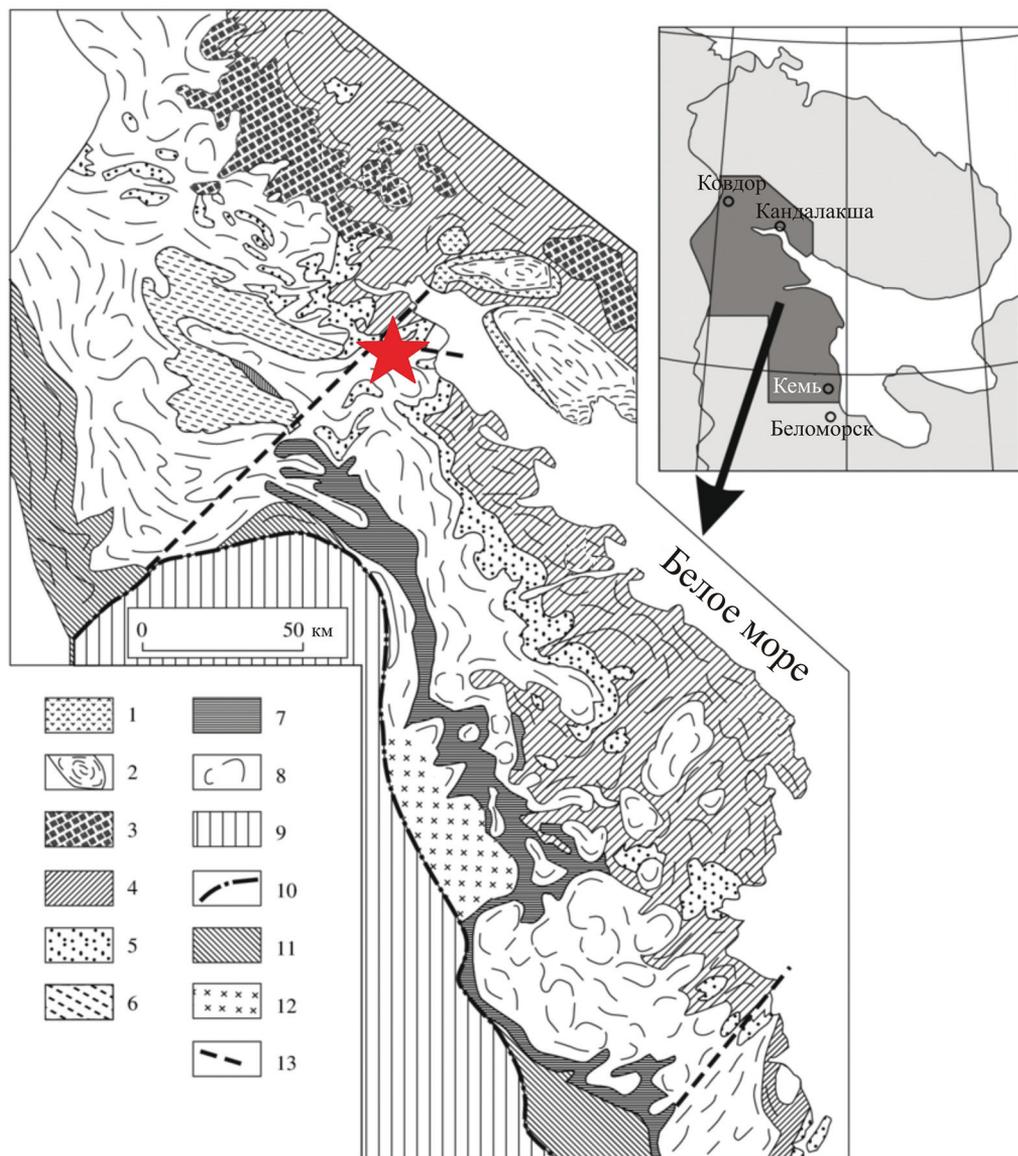


Рис. 1. Геолого-тектоническая схема положения Беломорской провинции. По (Миллер и Милькевич, 1995). На врезке показано положение пояса в пределах Карело-Кольского региона. Звездочкой указано положение проявления Лягкомина

вым гнейсам (Серебряков и Аристов, 2004). Редкий ставролит-роговообманковый парагенезис (с кианитом и без него) отмечается на большинстве проявлений корунда — Хитоостров, Дядина гора, Варацкое, Высота 128, Кулежда, Климовское, Кий-остров, Перуселька (Серебряков и Аристов, 2004; Корпечков, 2009; Bindeman and Serebryakov, 2011; Ходоревская и Варламов, 2018; и ссылки там).

Подобно корундосодержащим породам Беломорской провинции, кианитовые амфиболиты Лягкомины обладают аномальным изотопным составом кислорода

(Bindeman and Serebryakov, 2011; Bindeman et al., 2014). Возраст возникновения изотопной аномалии в цирконах из вмещающих гнейсов района Лягкомины — около 1.89 млрд лет (Скублов и др., 2017) — в пределах погрешности совпадает с возрастом корундсодержащих метасоматитов Хитоострова и возрастом изотопно-кислородной аномалии в них (Серебряков и др., 2007; Bindeman et al., 2014).

2.2. Геологическое строение окрестностей проявления Лягкомина

Проявление кианитовых амфиболитов Лягкомина расположено на небольшом острове в губе Школьная оз. Ковдозеро (рис. 2) (координаты: 66.770043° с. ш., 32.269435° в. д. в дате WGS84). Это тело линзовидной формы (будина) длиной около 100 м и в поперечнике около 20 м (рис. 3).

По берегам к северу и югу от острова обнажаются гнейсы чупинской толщи: (1) мигматизированные «ржавые» гранат-биотитовые гнейсы, часто содержащие кианит, а иногда и мусковит; (2) лейкократовые биотитовые гнейсы, также мигматизированные и местами микроклинизированные или мусковитизированные, с единичными зернами граната. Среди гнейсов чупинской толщи встречаются будины мигматизированных амфиболитов, часто с гранатом, иногда — с биотитом или клинопироксеном.

Будина, образующая остров, практически вся сложена кианитовыми амфиболитами с гранатом. По периметру она окружена интенсивно мигматизированными гранат-биотит-амфиболовыми, гранат-биотитовыми и кианит-гранат-биотитовыми гнейсами (рис. 3). Породы в составе будины и вмещающие ее гнейсы полого (под углами около 30°) падают на север, так что структура участка в целом напоминает моноклираль, но осложнена мелкими лежащими складками и широкими складками с вертикальными субмеридиональными осевыми плоскостями. Структура согласна со структурой гнейсов в береговых обнажениях.

В составе будины можно выделить несколько ведущих типов пород: гранат-кианитовые амфиболиты с крупным кианитом (более 1 см в длину), кианит-гранатовые амфиболиты со средним и мелким кианитом, эпидот-ставролитовые амфибо-

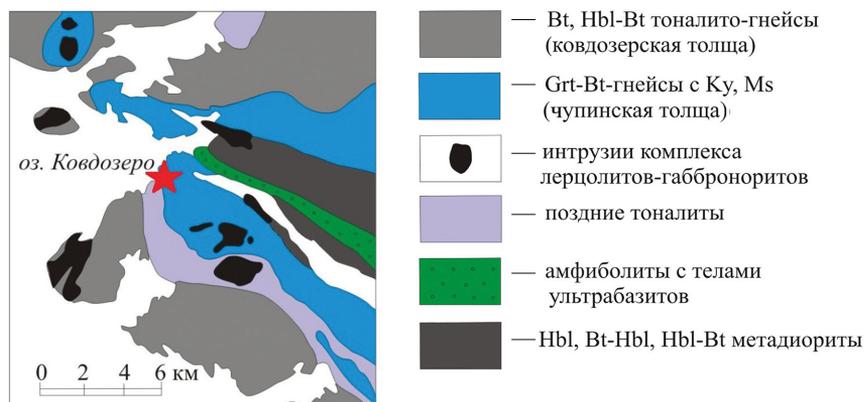


Рис. 2. Положение проявления кианитовых амфиболитов Лягкомина на геологической схеме участка Восточное Ковдозеро. По (Миллер и др., 1995) с упрощениями. Звездочкой указано положение проявления Лягкомина

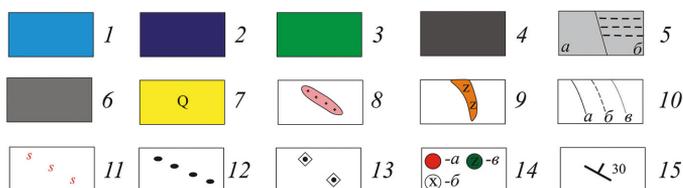
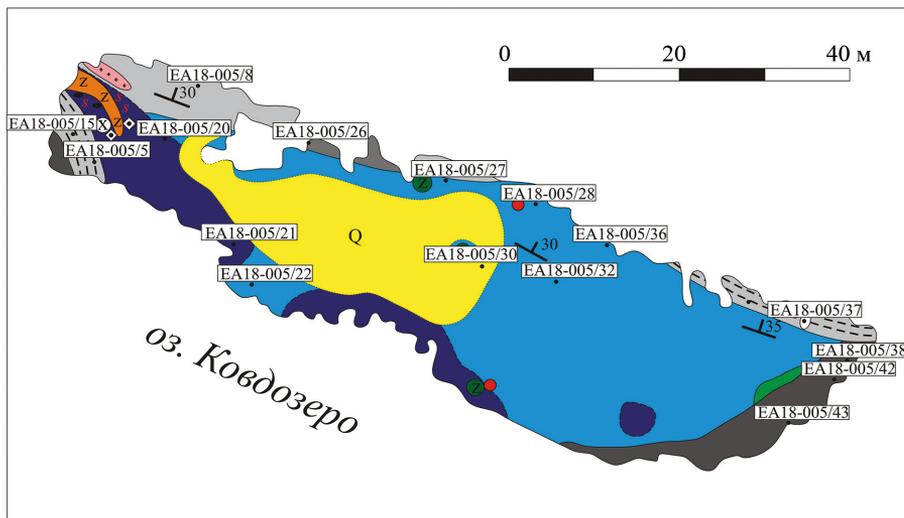


Рис. 3. Карта-схема проявления кианитовых амфиболитов Лягкомины:

1 — кианит-гранатовые амфиболиты с мелким кианитом; 2 — кианит-гранатовые амфиболиты с крупным кианитом; 3 — гранатовые амфиболиты без кианита; 4 — гранат-биотит-амфибол-плаггиоклазовые породы без кварца с крупным гранатом; 5 — гранат-биотитовые и двуслюдяные гнейсы (а — без кианита, б — с кианитом); 6 — гранат-амфиболовые гнейсы с крупным гранатом; 7 — четвертичные отложения; 8 — мигматизированные гранито-гнейсы; 9 — плаггиоклазиты с крупным клиноцоизитом; 10 — геологические границы (а — наблюдаемые, б — предполагаемые, в — граница четвертичных отложений); 11 — ставролит-клиноцоизитовые амфиболиты; 12 — бескварцевые кианит-гранат-биотит-плаггиоклазовые породы; 13 — кианит-гранатовые породы с псевдоморфозами ставролита по кианиту; 14 — точечные объекты (а — гранатиты, б — ставролитовые кианититы, в — участки развития эпидотизации и цоизитизации в амфиболитах); 15 — элементы залегания пород

литы, клиноцоизит-плаггиоклазовые породы со ставролитом и кианитом и отдельными редкими зернами кварца. В дальнейшем мы будем объединять разновидности кианит-, ставролит- и клиноцоизитсодержащих пород Лягкомины под общим названием «кианитовые амфиболиты» там, где не требуется уточнений.

Кианитсодержащие амфиболиты, преобладающие в объеме будины, сильно неоднородны: в них наблюдаются лейкократовые обособления, похожие на лейкосомы, сложенные преимущественно плаггиоклазом; иногда в них встречаются кварц, биотит, гранат, кианит. В породах часто присутствуют и меланократовые обособления, схожие с меланосомами, к которым тяготеют крупные порфиробласты кианита (рис. 4). Некоторые разновидности кианитовых амфиболитов содержат в матрице кварц, в других он сохраняется только в виде включений в гранате, а в большинстве разновидностей он отсутствует. Ставролитовые амфиболиты, объ-

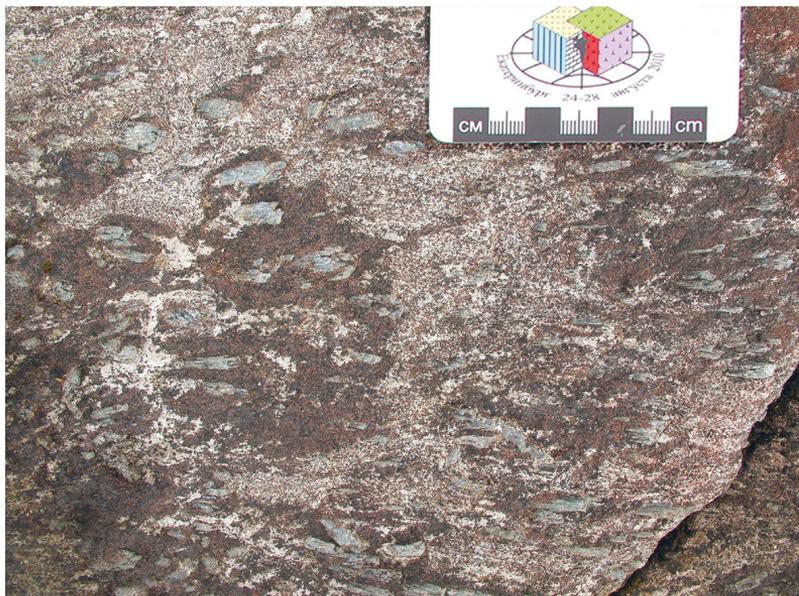


Рис. 4. Кианит-гранатовые амфиболиты с меланократовыми гранат-роговообманковыми участками и с крупным кианитом, ориентированным преимущественно по линейности

ем которых на проявлении невелик, связаны с кианит-гранатовыми постепенным переходом: в кианитсодержащих амфиболитах вокруг порфириобластов кианита формируются ставролит-плаггиоклазовые каймы, по мере разрастания которых на месте порфириобластов кианита остаются псевдоморфозы, сложенные ставролит-плаггиоклазовыми симплектитам. Во многих кианит-гранатовых амфиболитах наблюдается также замещение плаггиоклаза и отчасти кианита клиноцоизитом или эпидотом, так что в ставролитовых кианититах плаггиоклаз почти отсутствует. Лейкократовая жила, сложенная гранат-биотит-кианит-роговообманково-плаггиоклазовой породой, сечет бескварцевую кианит-гранат-биотит-плаггиоклазовую гнейсоподобную породу.

Эти породы, сходные с кианит-гранат-биотитовыми гнейсами, но не содержащие кварца, примыкают к линзе кианитовых амфиболитов в юго-западной части проявления висячем боку. Восточнее, на южном фланге линзы, кианитовые амфиболиты круто обрываются в озеро, и вмещающие их породы не обнаружены. С севера, в лежачем боку, линза обрамляется гнейсами с крупными (до 3 см) порфириобластами граната — гранат-биотит-амфиболовыми ближе к линзе, гранат-биотитовыми — дальше от нее, а еще дальше — биотитовыми гнейсами. Вблизи контакта с линзой в этих гнейсах также исчезает кварц при сохранении общего облика породы. Гнейсы с подобным крупным гранатом не встречаются больше нигде в районе Лягкомины, поэтому можно полагать, что они по происхождению также связаны с кианитовыми амфиболитами. В юго-восточной части островка среди вмещающих пород лежачего бока тоже появляются кианит-гранат-биотитовые гнейсы.

Во вмещающих будину кианитовых амфиболитов гранат-биотит-роговообманковых и гранат-биотитовых гнейсах с крупным гранатом, порфириобласты гра-

ната нередко обрамлены сигмоидальными линзами, сложенными лейкократовыми минералами, то есть являются кинематическими индикаторами сдвиговых деформаций. Ориентация линз и минеральной линейности в гнейсах указывает на сбросовый характер деформаций вдоль пологих поверхностей сланцеватости. В самих амфиболитах признаки деформаций выражены не столь отчетливо, но крупные кристаллы кианита ориентированы по линейности.

Других коренных выходов кианитовых амфиболитов (вне описываемого островка) в районе Лягкомины не найдено, но ставролит-кианит-гранатовые амфиболиты с псевдоморфозами ставролита по кианиту попадают по берегам Школьной губы в виде глыб (Серебряков и Аристов, 2004; Bindeman et al., 2014), из которых отобраны образцы NS-L-1 и NS-L-3 (таблица). Судя по непрочности этих пород, они не были перемещены далеко. Вероятно, их коренные выходы находятся на дне озера.

Таблица. Петрографические разновидности и минеральные ассоциации кианитовых амфиболитов Лягкомины

Название породы	Ассоциация	№ образцов
Кианит-гранатовый амфиболит с кварцем	Hbl + Grt + Bt + Ky + Pl + Qtz	EA18-005/8, EA18-005/9, EA18-005/24, EA18-005/26, EA18-005/28, EA18-005/29, EA18-005/36, EA18-005/38, EA18-005/39, EA18-005/41
Кианит-гранатовый амфиболит	Pl + Grt + Hbl + Ky + Qtz	EA18-005/33
Бескварцевый (измененный) гранатовый амфиболит	Grt + Bt + Hbl + Pl	EA18-005/4, EA18-005/43
Кианит-гранатовый амфиболит	Pl + Hbl + Grt + Bt + Ky	NS-L-9a, NS-L-11
Гранатовый амфиболит с кианитом и клиноцоизитом	Hbl + Pl + Grt + Bt + Ky + Czo	NS-L-8a
Биотит-амфибол-плаггиоклазовая порода с кианитом и ставролитом	Pl + Hbl + Bt + Ky + St	EA18-004/3
Гранат-биотитовый амфиболит с кианитом и ставролитом	Pl + Grt + Bt + Hbl + Ky + St	EA18-005/20
Клиноцоизит-гранатовый амфиболит с кианитом и ставролитом	Pl + Hbl + Grt + St + Czo + Ky	EA18-005/30, EA18-005/32, EA18-005/33, EA18-005/34, EA18-005/35
Биотит-амфибол-плаггиоклазовая порода с кианитом и ставролитом	Pl + Hbl + Bt + Ky + St + Czo	EA18-004/4, EA18-004/5, EA18-004/6
Амфиболит с псевдоморфозами St по Ky	Grt + Bt + Hbl + Pl + Ky + St + Czo	EA18-005/1, EA18-005/2, EA18-005/17, NS-L-1
Ставролит-кианит-гранатовый амфиболит	Grt + Bt + Hbl + Pl + Ky + St + Czo	NS-L-3
Ставролит-клиноцоизит-гранатовый амфиболит	Grt + Hbl + Pl + St + Czo	EA18-005/15, EA18-005/16

3. Петрография кианитовых амфиболитов

Неоднородность кианитовых амфиболитов Лягкомины проявляется в непостоянстве минерального состава и изменчивости структур и текстур. В первую очередь в глаза бросаются переходы от лейко- к меланократовым породам и вариации зернистости — от мелко- до крупнозернистых. В частности, размер зерен кианита в них меняется от первых миллиметров до нескольких сантиметров в поперечнике (рис. 5). Для кианитовых амфиболитов Лягкомины характерны пятнистые, полосчатые, линзовидные, прожилковые текстуры. Минеральные парагенезисы также очень изменчивы и разнообразны, иногда на расстоянии в первые сантиметры. Основные петрографические разновидности, выявленные среди изученных кианитовых амфиболитов, перечислены в таблице.

Роговая обманка — главный минерал кианитовых амфиболитов, практически во всех породах ее более 50%. Гранат также присутствует практически во всех разновидностях пород, в частности — во всех кианитовых амфиболитах (до 20%), но отсутствует в ставролитовых (без кианита) разновидностях амфиболитов (или сохраняется в незначительных количествах в виде реликтов). Он образует порфиробласты (до 5 мм) или мелкие зерна (меньше 1 мм). Количество биотита в породах непостоянно: от 0 до 10–15%. Порой биотит сильно (иногда полностью) хлоритизирован. Кианит присутствует в значительных количествах, но по породе распределен неравномерно. Размер зерен кианита меняется от долей миллиметра до 5–7 см, цвет в породе — голубой. Наиболее крупные порфиробласты кианита имеют футляровидную форму и содержат многочисленные включения мелкого граната, амфибола, биотита и плагиоклаза (рис. 5). Ставролит в амфиболитах Лягкомины (рис. 6) преимущественно мелкий, часто не виден макроскопически. Обычно он образует симплектитовые сростания с плагиоклазом вокруг зерен кианита. Клино-

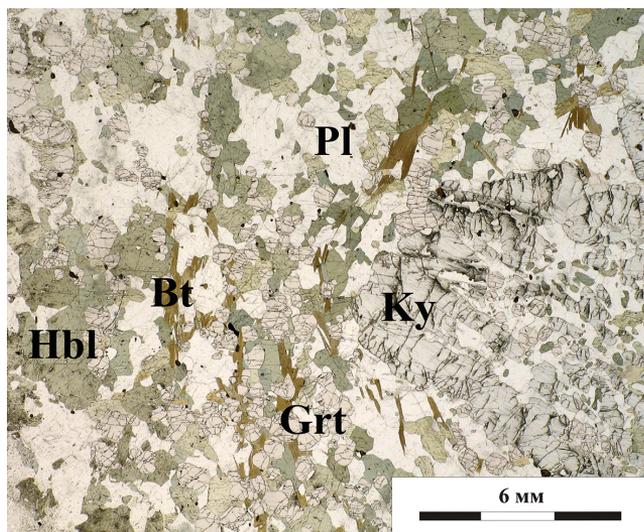


Рис. 5. Микрофотография кианит-биотит-гранатового амфиболита с крупным пойкилобластическим кианитом. Фото в проходящем свете, без анализатора

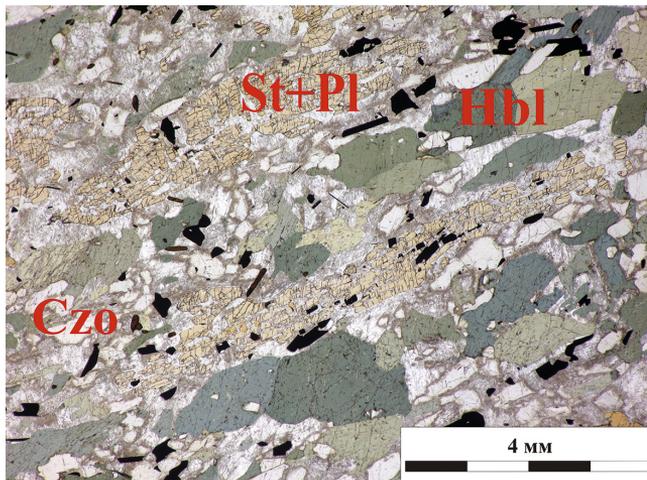


Рис. 6. Микрофотография клиноцизит-ставролитового амфиболита. Фото в проходящем свете, без анализатора

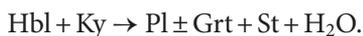
цизит (сероватый или белесый) и эпидот (желтовато- или фиштакково-зеленый) попадают эпизодически, их количества непостоянны и доходят до 10–15 %. Часто они развиваются по плагиоклазу. Иногда скопления мелких включений клиноцизита наблюдаются в крупных кристаллах кианита.

В кианитовых амфиболитах присутствуют различные минералы титана: рутил, ильменит, титанит, титаномагнетит. Последний образует ламели в зернах ильменита в ставролитовых амфиболитах. Ильменит же часто образует ламели в рутиле кианитовых амфиболитов. В породах может присутствовать апатит, иногда в довольно значительных количествах (до первых процентов). Обычные акцессорные минералы — циркон и алланит.

В западной части острова встречены полосчатые эпидот-ставролитовые амфиболиты — довольно меланократовые породы с макроскопически видимыми ставролитом и эпидотом, но без кианита. Количество плагиоклаза в этих породах также невелико. Гранат не виден макроскопически, но его реликты установлены в шлифах. Ставролит образует скелетные кристаллы, сростающиеся с плагиоклазом, что указывает на возможность их образования за счет разрастания ставролит-плагиоклазовых симплектитов. Еще одна специфическая порода, развитая среди кианитовых амфиболитов западной части острова, — лейкократовая гранат-биотит-роговообманково-плагиоклазовая порода с редким кианитом. В этой же части будины отмечены небольшие линзочки ставролитовых кианитов ярко-голубого цвета.

В целом минеральный состав кианитовых амфиболитов и сопутствующих им пород указывает на их обогащение глиноземом и титаном по сравнению с вмещающими породами.

В шлифах часто отмечаются реакционные взаимоотношения между минералами. Формирование плагиоклаз-ставролитовых кайм вокруг кианита (рис. 7) можно описать минеральной реакцией:



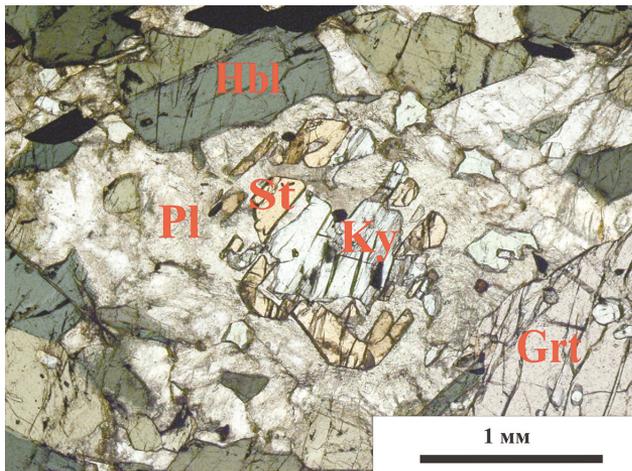


Рис. 7. Микрофотография кристалла кианита, окруженного плагиоклаз-ставролитовой каймой. Фото в проходящем свете, без анализатора

Иногда зерна ставролита тоже частично растворяются и замещаются плагиоклазом. Плагиоклаз, в свою очередь, может исчезать, замещаясь клиноцоизитом или тонкозернистым слюдястым агрегатом, слишком мелким, чтобы надежно установить его состав даже с помощью микронзондового анализа. Ильменит местами отделен от граната и ставролита тонкой каймой плагиоклаза. Из других реакционных структур отметим плагиоклаз-роговообманковые симплектиты по гранату и хлоритизацию биотита. Признаком реакционных соотношений является также отсутствие кварца в матрице породы при сохранении его в виде включений в гранате.

На основании соотношения пород с описанными парагенезисами и реакционных структур в породах можно реконструировать закономерную последовательность смены парагенезисов, образующих пространственно-временную минеральную зональность: $Hbl + Grt + Pl + Qtz \pm Bt$ (гранатовый амфиболит) $\rightarrow Hbl + Grt + Pl + Ky + Qtz \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Pl + Ky \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Pl + Ky + St \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Ky + Pl + St + Czo \pm Bt \rightarrow Hbl + Grt + Pl + St + Czo \pm Bt \rightarrow Hbl + St + Czo + Pl \pm Bt$.

4. Составы минералов

Составы минералов кианит- и ставролитсодержащих амфиболитов определены методом ЭЗМА на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с ЭДС AzTec Energy 350 и комплектом стандартных образцов в РЦ СПбГУ «Геомодель» (аналитики — В. В. Шиловских и Н. С. Власенко) и на растровом электронном микроскопе JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) с комплектом стандартных образцов в ИГГД РАН (аналитик — О. Л. Галанкина). Расчет составов амфиболов по микронзондовым анализам выполнен в программах Amphibole Classification Excel Spreadsheet (версия ACES 9-3) (Locock, 2014) и WinAmphcal (Yavuz, 2007), расчет остальных минералов — в программе Minal 3 (автор — Д. В. Доливо-Добровольский). Использованные символы минералов

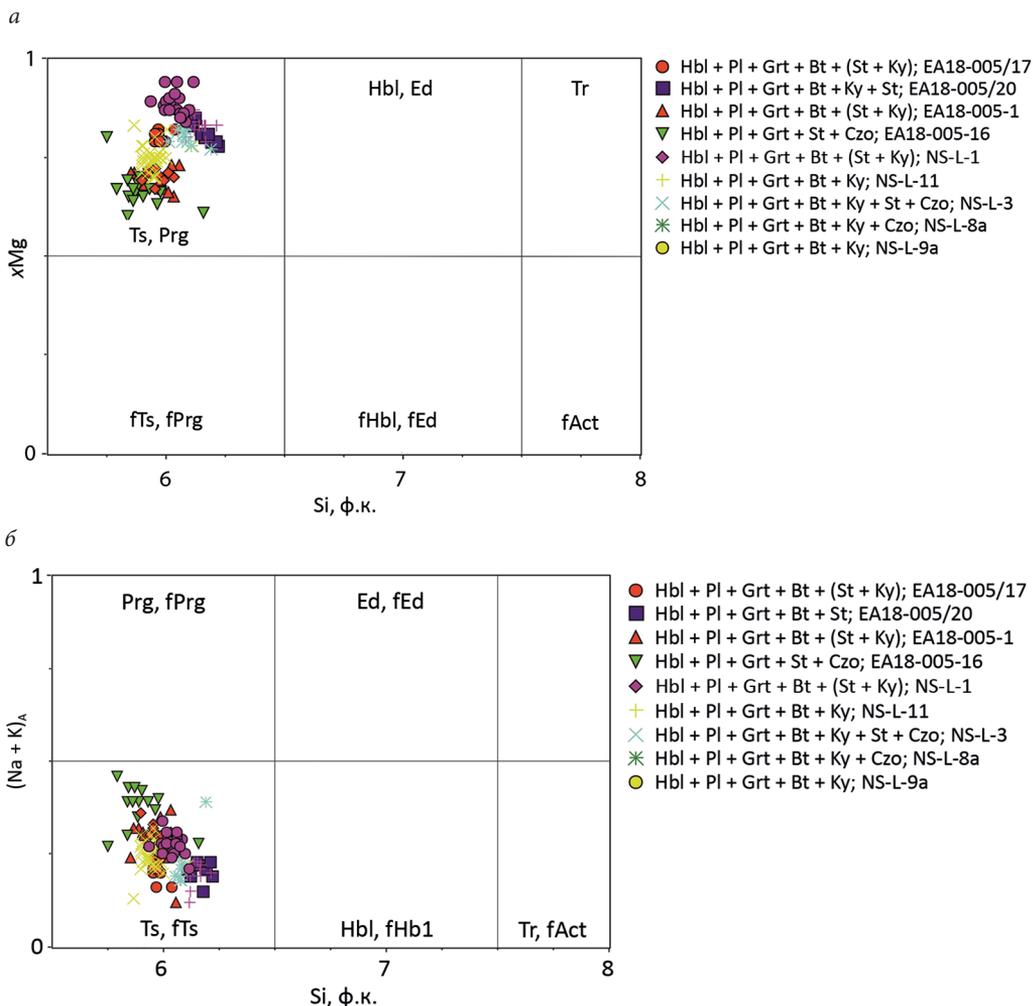


Рис. 8. Составы роговых обманок из кианит-гранатовых амфиболитов Лягкомыны на классификационных диаграммах. По (Leake et al., 1997)

взяты из статьи (Kretz, 1983). Таблицы с составами минералов в оксидной форме, а также формульные коэффициенты, рассчитанные по зарядам и по катионам, приведены в Приложении 1¹.

Роговые обманки (Са — амфиболы) из кианитовых амфиболитов, согласно классификациям (Leake et al., 1997; Leake et al., 2004; Hawthorne et al., 2012), относятся преимущественно к чермакитовым амфиболам с необычно высокой глиноземистостью (^{IV}Al от 1.78 до 2.25 ф. к. (формульных коэффициентов), ^{VI}Al от 0.65 до 1.16 ф. к.), низким содержанием Si (вплоть до Si < 6 ф. к.) и довольно высокой магниальностью ($x_{Mg} = 0.67-0.94$) (рис. 8, *a*). Из-за дефицита ^BCa (1.56–1.84 ф. к.) даже при довольно большом количестве щелочей (до 0.64 ф. к. Na + K) в их составе содержание катио-

¹ Приложение 1 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/6364/7480>. Приложение дано в авторской редакции.

нов в позиции невысоко: $A \leq 0.5$ ф. к. (рис. 8, б). Роговые обманки содержат значимое количество расчетного Fe^{3+} — до 1.57 ф. к. В описанном ряду сменяющихся минеральных ассоциаций от гранатовых амфиболитов к ставролитсодержащим породам магнезиальность роговых обманок снижается, а глиноземистость растет.

Биотит в кианитовых амфиболитах преимущественно магнезиальный ($x_{Mg} = 0.61-0.87$) и умеренноглиноземистый ($^{VI}Al = 0.18-0.44$) (рис. 9, а), несмотря на избыток глинозема в породе и сосуществование с высокоглиноземистыми минералами (кианитом, ставролитом, клиноцоизитом, анортитом и богатыми глиноземом амфиболами). Содержание Na невелико (≤ 0.12 ф. к.). Ti в биотитах довольно высокий (≤ 0.17 ф. к.). Магнезиальность биотита снижается вместе со снижением магнезиальности роговых обманок. В этом же ряду растет титанистость биотита. Содержание Al в биотите существенно не меняется.

Плагиоклазы из кианитовых амфиболитов по составу явно разделяются на две группы: средние (An_{29-52}) и основные (An_{85-97}) (рис. 9, б). Средние плагиоклазы распространены в кианитовых амфиболитах без ставролита и в кианитовых амфиболитах со ставролитовыми каймами, а основные плагиоклазы — в ставролитовых амфиболитах.

Гранаты преимущественно альмандиновые, но довольно богаты Mg и Ca ($Alm_{51-67}Prp_{16-35}Grs_{10-21}$) (рис. 9, в). Их кристаллы обладают слабой или отчетливой обратной зональностью (доля пиропы и гроссуляра снижается от центра к краю зерен) (рис. 10, а, б). Доля гроссуляра в гранате увеличивается от 10 % в кианитовых амфиболитах без ставролита до 20 % в ставролитсодержащих кианитовых амфиболитах.

Ставролит существенно более магнезиальный ($x_{Mg} = 38-42\%$), чем типичные ставролиты метapelитов (Федькин, 1975). Содержание Zn (~ 0.05 ф. к.) и Ti (от 0.05 до 0.1 ф. к.) в ставролите незначительно. Расчетное значение Fe^{3+} варьирует незначительно — от 0.40 до 0.79 ф. к. Al меняется от 8.61 до 8.94 ф. к.

Клиноцоизит — эпидот умеренножелезистый (содержание Fe^{3+} от 0.2 до 0.56 ф. к.).

Апатит в кианитовых амфиболитах представлен промежуточными составами ряда фторapatит — гидроксилapatит с расчетным содержанием OH^- 0.1–0.69 ф. к. Содержание Cl^- не превышает 0.04 ф. к. Во вмещающих кианит-гранат-биотитовых гнейсах также присутствует F-apatит, но он беднее гидроксиллом (0–0.21 ф. к.).

Ведущие особенности минерального состава кианитовых амфиболитов:

- наличие многочисленных глиноземистых минералов, отражающих высокую глиноземистость породы;
- ассоциация умеренноглиноземистого биотита с высокоглиноземистыми минералами;
- появление в ставролитовых амфиболитах основного плагиоклаза (битовнит — анортит), который в кианитовых амфиболитах практически отсутствует;
- нетипичный для амфиболитов состав роговой обманки, выделяющейся высокой глиноземистостью и магнезиальностью, присутствием существенного количества Na в позиции B;
- необычный состав ставролитов (их высокая магнезиальность).

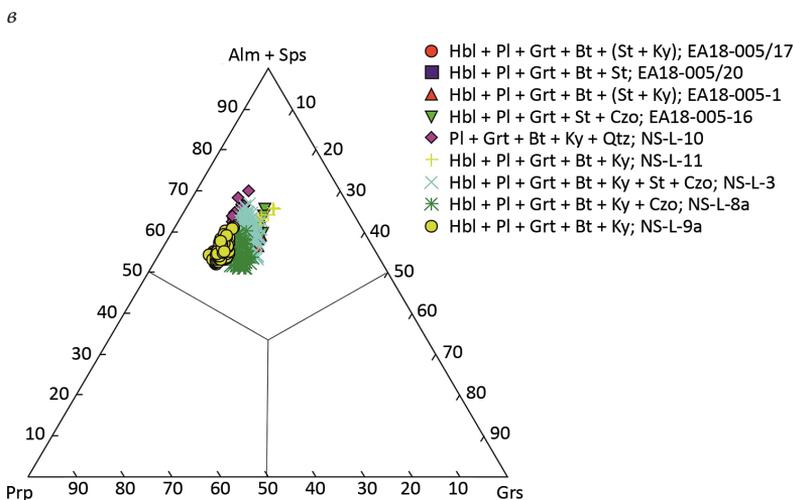
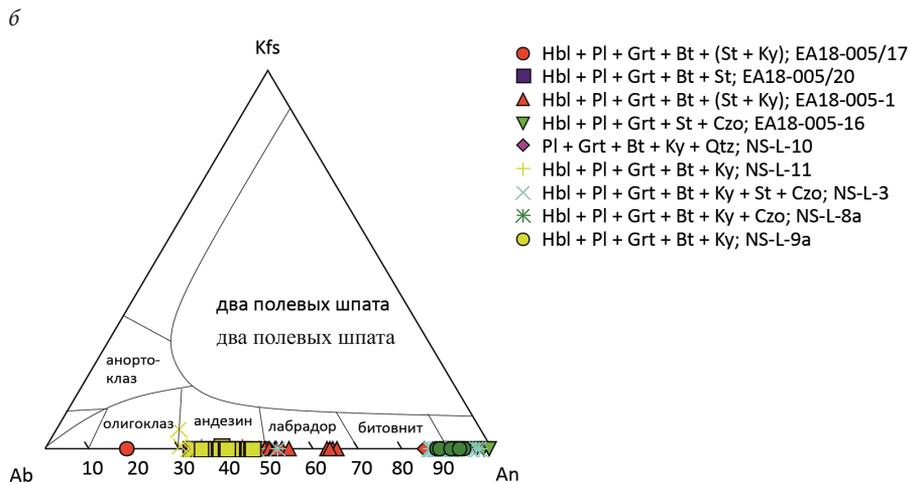
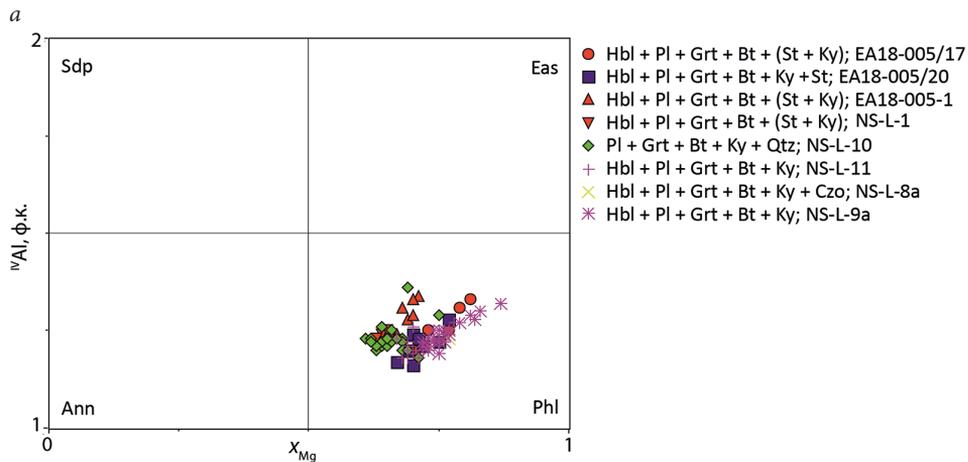
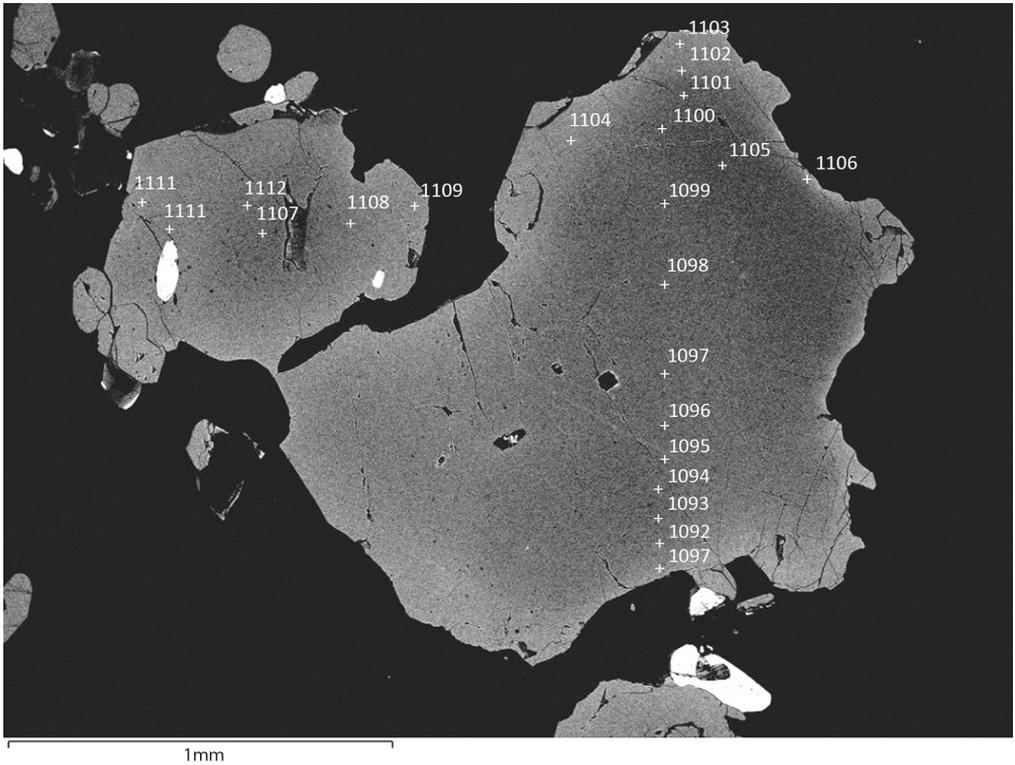


Рис. 9. Диаграмма составов минералов кианит-гранатовых амфиболитов и вмещающих пород: а — биотита, б — плагиоклаза, в — граната

а



б

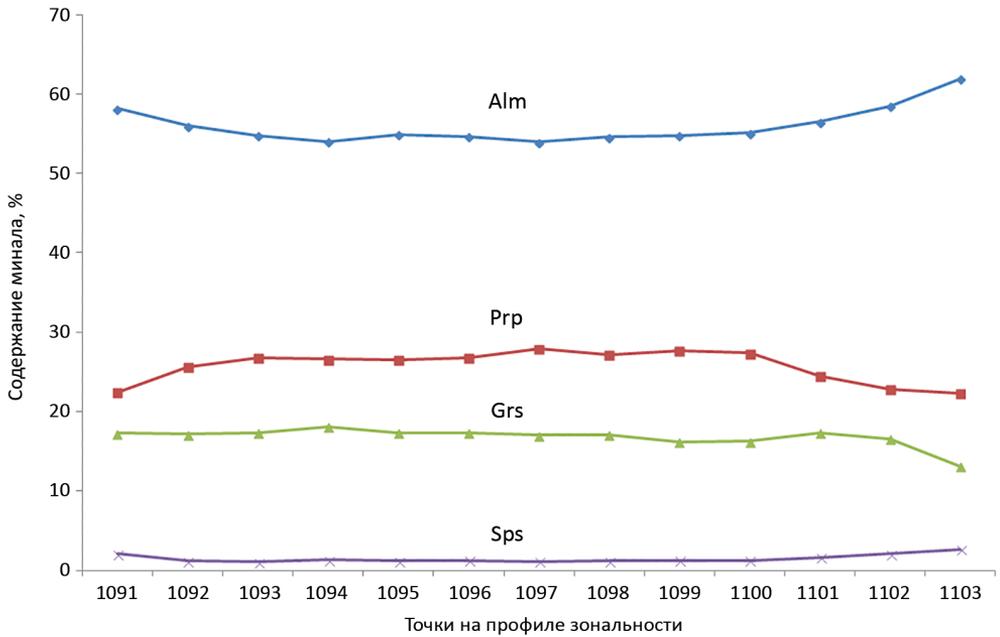


Рис. 10. Химическая зональность в гранате: а — иллюстрация зональности в зерне граната из кианит-гранатовых амфиболитов на BSE-изображении; б — профили зональности граната

В ряду сменяющихся минеральных ассоциаций от кианитсодержащих к клиноцоизит- и ставролитсодержащим породам снижается магнезиальность и титанность роговых обманок, в них возрастает содержание Fe^{3+} , глиноземистость (главным образом, в виде ^{VI}Al) и сумма щелочей $(Na + K)_A$. Глиноземистость биотита, а также содержание Mg и расчетного Fe^{3+} в ставролите при этом остаются практически постоянными.

В целом наблюдается направленное увеличение глиноземистости роговых обманок и плагиоклазов и снижение магнезиальности роговых обманок и биотитов в ряду сменяющихся минеральных ассоциаций.

5. Обсуждение результатов

Полученные данные по строению тела кианитовых амфиболитов и составам минералов позволяют нам сделать некоторые выводы о генетической природе данных образований. В литературе предложено несколько возможных сценариев формирования кианитовых амфиболитов.

Так, породы с такими редкими парагенезисами могли образоваться при метаморфизме высоких давлений (Selverstone et al., 1984; Helms et al., 1987; Encarnacion et al., 1995). Появление в породах реакционных структур можно объяснить временной эволюцией РТ-параметров. Однако данная модель никак не объясняет необычность химического состава кианитовых амфиболитов, тем более что среди чупинских гнейсов вокруг линзы кианитовых амфиболитов расположены тела обыкновенных амфиболитов с гранатом и без него, не содержащих кианита и испытавших те же метаморфические преобразования, что и кианитовые амфиболиты.

Согласно данным Лутковской (1971), кианитовые амфиболиты по химическому составу не отвечают магматическому протолиту: по сравнению с обычными гранатовыми амфиболитами без кианита гранат-кианитовые амфиболиты существенно обогащены глиноземом и менее магнезиальны (детальнее мы рассмотрим эволюцию химического состава кианитовых амфиболитов в следующих публикациях). В некоторых из анализов содержание кремнезема менее 41 вес.%. Поэтому можно предположить, что субстратом для кианитовых амфиболитов явились обычные гранатовые амфиболиты без кианита, которые были метасоматически изменены до регионального метаморфизма или в его ходе.

Изменение состава пород до метаморфизма могло бы произойти в результате химического выветривания в приповерхностных условиях или при гидротермальной переработке. Этому противоречит приуроченность проявлений кианитовых амфиболитов к синметаморфическим сдвиговым зонам, направленное изменение химического состава метаморфических минералов и присутствие реакционных взаимоотношений между ними, таких как замещение кианита ставролитом, а ставролита — плагиоклазом, замещение плагиоклаза клиноцоизитом, растворение кварца в матрице породы с сохранением его внутри зерен граната и т. д. Важно, что эти реакционные структуры маркируют переходы между зонами и отражают реакции замещения одних минералов другими, протекающие на границах зон.

Более вероятно изменение состава пород во время метаморфизма за счет воздействия на породу флюидных потоков в сдвиговых зонах — метаморфогенный метасоматоз (Бушмин, 1978). Кроме указанных выше признаков в пользу этого

свидетельствуют изменение лейкосом (исчезновение в них кварца), появление крупных порфиробластов граната в зоне изменения гнейсов на контакте с будиной кианитовых амфиболитов, а также жил кианитовых амфиболитов в измененных гнейсах. Появление роговой обманки в гранатowych гнейсах и увеличение ее количества по направлению к будине кианитовых гнейсов также можно рассматривать как элемент метасоматической зональности. Крупные зерна граната в гнейсах указывают на интенсивный массоперенос в системе, возможный в условиях флюидного потока (адвективный массоперенос).

В ряду сменяющихся минеральных ассоциаций наблюдается направленное увеличение глиноземистости и снижение магнезиальности главных породообразующих минералов, а также общая десиликация породы. Последняя подтверждается уменьшением содержания кремнезема в минералах (амфиболах, плагиоклазах) одновременно с ростом глиноземистости, а также упомянутым исчезновением кварца — как в матрице амфиболитов, так и в измененных лейкосомах, а также в гнейсах на контакте с кианитовыми амфиболитами.

Учитывая присутствие кианитовых амфиболитов в заметной части проявлений корундсодержащих пород Беломорской провинции, сходство минеральных парагенезисов и составов минералов пород проявления Лягкомина и кианитовых амфиболитов из проявлений корундовых пород, тенденцию десиликации и роста глиноземистости в породах проявления Лягкомина и опираясь на имеющиеся данные по изотопному составу кислорода, мы можем утверждать, что кианитовые амфиболиты Лягкомина генетически связаны с проявлениями корундсодержащих пород Беломорской провинции, несмотря на отсутствие в проявлении Лягкомина собственно корундсодержащих пород. Поскольку корундсодержащие породы, интерпретируемые как метасоматиты (Серебряков и Аристов, 2004), богаче алюминием и беднее кремнием, чем кианитовые амфиболиты, последние можно рассматривать как передовые зоны метасоматической колонки при формировании корундсодержащих пород. На проявлении Лягкомина объем кианитовых амфиболитов значительно больше, чем на проявлениях корундовых пород, так что минеральную зональность пород проявления Лягкомина можно рассматривать как фрагмент метасоматической зональности при формировании корундсодержащих метасоматитов по амфиболитам. В передовых зонах в амфиболитах появляется кианит и исчезает кварц, в промежуточных зонах появляется ставролит в парагенезисе с роговой обманкой и клиноцоизитом. Дальнейшая десиликация в ходе того же процесса должна приводить к формированию корунда.

Интересно, что кианитовые амфиболиты Лягкомина, как и корундсодержащие породы многих проявлений Беломорской провинции, тесно ассоциируют с плагиоклазитами. Генезис плагиоклазитов не ясен, возможно, это переработанные (десилицированные) лейкосомы.

В Беломорской провинции кианитовые и ставролитовые амфиболиты известны также в зоне ее сочленения с Карельским кратоном (Московченко и Турченко, 1975; Бушмин, 1978; Бушмин и др., 2005; Балаганский и др., 2011), но там, в отличие от описываемого случая, такие породы связаны с накоплением алюминия при кислотном выщелачивании амфиболитов. В тыловых зонах метасоматических колонок этого выщелачивания, в отличие от кианитовых и ставролитовых амфиболитов осевой части Беломорской провинции, формируются ставролитовые и кианитовые кварциты.

Авторы благодарны А. Б. Кольцову (СПбГУ) за ценные замечания, Д. В. Доливо-Добровольскому (ИГГД РАН) за помощь в работе с классификационными программами для амфиболов. Замечания анонимных рецензентов позволили существенно улучшить текст статьи.

Литература

- Балаганский, В. В., Алексеев, Н. Л., Хухма, Х., Азимов, П. Я., Левский, Л. К., Пинькова, Л. О. (2011). Происхождение базальных сланцев сумия и возраст метавулканитов лопия на границе архея и протерозоя в Кукасозерской структуре, Северо-Карельская зона карелид, Балтийский щит. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 19 (4), 3–20.
- Бибикова, Е. В., Богданова, С. В., Глебовицкий, В. А. и др. (2004). Этапы эволюции Беломорского подвижного пояса по данным U-Pb циркононой геохронологии (ионный микрозонд NORDSIM). *Петрология*, 12 (3), 227–244.
- Бибикова, Е. В., Шёльд, Т., Богданова, С. В., Другова, Г. М., Лобач-Жученко, С. Б. (1993). Геохронология беломорид: интерпретация многостадийной геологической истории. *Геохимия*, 10, 1393–1411.
- Бушмин, С. А. (1978). Метасоматиты месторождения Хизоваара (Северная Карелия). *Известия АН СССР. Серия геологическая*, 7, 127–138.
- Бушмин, С. А., Азимов, П. Я., Лебедева, Ю. М., Морозов, М. В. (2005). Минеральная зональность метасоматических пород в метаморфическом комплексе амфиболитовой фации высоких давлений (Винчинская структура, западный фланг Беломорского подвижного пояса). В: *Беломорский подвижный пояс и его аналоги. Материалы конференции*. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 125–129.
- Володичев, О. И. (1990). *Беломорский комплекс Карелии. Геология и петрология*. Ленинград: Наука.
- Глебовицкий, В. А. (ред.) (2005). *Ранний докембрий Балтийского щита*. Санкт-Петербург: Наука.
- Корпечков, Д. И. (2009). Климовское корундовое проявление, Северная Карелия: некоторые петрографические особенности. В: *Материалы XX Рос. конф. молодых ученых, посвящ. памяти чл.-кор. АН СССР К. О. Кратца*. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 94–97.
- Лутковская, Т. А. (1971). К вопросу образования кианита на месторождении Лягкомина. В: *Минералогия и геохимия докембрия Карелии*. Ленинград: Наука, 68–78.
- Миллер, Ю. В., Львов, А. Б., Мыскова, Т. А., Милькевич, Р. И. (1995). Позиция раннепротерозойских друзитов в покровно-складчатой структуре Беломорского подвижного пояса. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*, 4 (28), 63–71.
- Миллер, Ю. В., Милькевич, Р. И. (1995). Покровно-складчатая структура Беломорской зоны и ее соотношение с Карельской гранит-зеленокаменной областью. *Геотектоника*, 6, 80–93.
- Московченко, Н. И., Турченко, С. И. (1975). *Метаморфизм кианит-силлиманитового типа и сульфидное оруденение*. Ленинград: Наука.
- Серебряков, Н. С., Аристов, В. С. (2004). Условия локализации проявлений коллекционного корунда в породах чупинской толщи беломорского комплекса Северной Карелии. *Изв. вузов. Геология и разведка*, 4, 36–42.
- Серебряков, Н. С., Астафьев, Б. Ю., Воинова, О. А., Пресняков, С. Л. (2007). Первое локальное Th-U-Pb датирование циркона метасоматитов Беломорского подвижного пояса. *Доклады Академии наук*, 413 (3), 388–392.
- Скублов, С. Г., Азимов, П. Я., Ли, С. Х., Глебовский, В. А., Мельник, А. Е. (2017). Полиметаморфизм чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (Фенноскандия) по данным изотопно-геохимического (U-Pb, REE, O) исследования циркона. *Геохимия*, (1), 3–16.
- Степанова, А. В., Степанов, В. С., Слабунов, А. И. (2011). Достижения и проблемы в изучении основного магматизма Беломорской провинции Фенноскандинавского щита. В: *Геология Карелии от архея до наших дней*. Институт геологии КарНЦ РАН, 79–90.
- Федькин, В. В. (1975). *Ставролит*. Москва: Наука.
- Ходоревская, Л. И., Варламов, Д. А. (2018). Высокотемпературный метасоматоз в Кийостровском базит-ультрабазитовом расслоенном массиве Беломорского пояса. *Геохимия*, (6), 541–558.

- Arnold, J., Powell, R. and Sandiford, M. (2000). Amphibolites with staurolite and other aluminous minerals: calculated mineral equilibria in NCFMASH. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (1), 23–40. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00236.x>
- Berger, J., Femenias, O., Ohnenstetter, D., Plissart, G. and Mercier, J.-C. C. (2010). Origin and tectonic significance of corundum-kyanite-sapphirine amphibolites from the Variscan French Massif Central. *Journal of Metamorphic Geology*, 28 (3), 341–360. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00866.x>
- Bindeman, I. N. and Serebryakov, N. S. (2011). Geology, Petrology and O and H isotope geochemistry of remarkably ^{18}O -depleted Paleoproterozoic rocks of the Belomorian Belt, Karelia, Russia, attributed to global glaciation 2.4 Ga. *Earth and Planetary Science Letters*, 306 (3–4), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.031>
- Bindeman, I. N., Serebryakov, N. S., Schmitt, A. K., Vazquez, J. A., Guan, Y., Azimov, P. Ya., Astafiev, B. Yu., Palandri, J. and Dobrzhinetskaya, L. (2014). Field and microanalytical isotopic investigation of ultradepleted in ^{18}O Paleoproterozoic “Slushball Earth” rocks from Karelia, Russia. *Geosphere*, 10 (2), 308–339. <https://doi.org/10.1130/GES00952.1>
- Encarnación, J. P., Essene, E. J., Mukasa, S. B. and Hall, C. H. (1995). High-Pressure and -Temperature Subophiolitic Kyanite-Garnet Amphibolites Generated during Initiation of Mid-Tertiary Subduction, Palawan, Philippines. *Journal of Petrology*, 36 (6), 1481–1503. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.petrology.a037262>
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C. and Welch, M. D. (2012). Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97 (11–12), 2031–2048. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4276>
- Helms, T. S., McSween, H. Y., Laolka, T. C. and Jarosewich, F. E. (1987). Petrology of a Georgia Blue Ridge amphibolite unit with hornblende-gedrite-kyanite-staurolite. *American Mineralogist*, 72 (11–12), 1086–1096.
- Hietanen, A. (1959). Kyanite-garnet gedrite near Orofino, Idaho. *American Mineralogist*, 44 (5–6), 539–564.
- Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68 (1–2), 277–279.
- Kuyumjian, R. M. (1998). Kyanite-staurolite ortho-amphibolite from the Chapada region, Goias, central Brazil. *Mineralogical Magazine*, 62 (4), 501–507. <https://doi.org/10.1017/002646198547873>
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G. (1997). Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61 (405), 295–310. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Birch, W. D., Burke, E. A. J., Ferraris, G., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Schumacher, J. C., Stephenson, N. C. N. and Whittaker, E. J. W. (2004). Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *Mineralogical Magazine*, 68 (1), 209–215. <https://doi.org/10.1180/0026461046810182>
- Locock, A. J. (2014). An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*, 62, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.09.011>
- Purtscheller, F. and Mogessie, A. (1984). Staurolite in garnet amphibolites from Sölden, Ötztal old crystalline basement, Austria. *Mineralogy and Petrology*, 32 (4), 223–233.
- Selverstone, J., Spear, F. S., Franz, G. and Morteani, G. (1984). High-pressure metamorphism in the SW Tauern Window, Austria: P-T paths from hornblende-kyanite-staurolite schists. *Journal of Petrology*, 25 (2), 501–531.
- Yavuz, F. (2007). WinAmphcal: A Windows program for the IMA-04 amphibole classification. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006GC001391>
- Ward, C. M. (1984). Magnesium staurolite and green chromian staurolite from Fiordland, New Zealand. *American Mineralogist*, 69 (5–6), 531–540.

Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.
Статья рекомендована в печать 26 февраля 2021 г.

Контактная информация:

Акимова Екатерина Юрьевна — e.akimova@spbu.ru

Азимов Павел Яковлевич — pavel.azimov@mail.ru

Серебряков Николай Станиславович — niksebr@yandex.ru

Geological position and mineral composition of kyanite amphibolites of the Chupinskiy paragneiss belt (Belomorian province of Eastern Fennoscandia)*

E. Yu. Akimova^{1,2}, P. Ya. Azimov¹, N. S. Serebryakov³

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences, 2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetnyi per., Moscow, 119017, Russian Federation

For citation: Akimova, E. Yu., Azimov, P. Ya., Serebryakov, N. S. (2021). Geological position and mineral composition of kyanite amphibolites of the Chupinskiy paragneiss belt (Belomorian province of Eastern Fennoscandia). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (2), 310–330. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.207> (In Russian)

The Lyagkomina occurrence of kyanite amphibolites (the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield) is confined to an amphibolite boudin among kyanite-garnet-biotite and garnet-biotite gneisses of the Chupa Sequence. The main rock types at the Lyagkomina occurrence are meso- and melanocratic garnet-kyanite amphibolites with large kyanite (more than 1 cm in length) and kyanite-garnet amphibolites with small kyanite. There are also leucocratic garnet-biotite-amphibole-plagioclase rocks with kyanite, melanocratic epidote-staurolite-amphibole rocks, zoisite plagioclases with staurolite and kyanite. The country gneisses around the boudin were metasomatically altered: quartz disappears in kyanite gneisses, and amphibole appears in garnet-biotite gneisses. Calcic amphiboles in the kyanite amphibolites are represented by high-alumina tschermakite; biotite — by intermediate-alumina phlogopite; garnet belongs to the pyrope-almandine series with a high grossular content. Plagioclases have an intermediate and basic composition. Intermediate plagioclases are common in kyanite amphibolites without staurolite and in kyanite amphibolites with staurolite rims, while the basic plagioclases are found in staurolite amphibolites. Many rocks are characterized by reaction structures, representing the change of the mineral assemblages. Metasomatic zoning has been reconstructed in the occurrence with a regular sequence of the mineral assemblages: Hbl + Grt + Pl + Qtz ± Bt (garnet amphibolite) → Hbl + Grt + Pl + Ky + Qtz ± Bt → Hbl + Grt + Pl + Ky ± Bt → Hbl + Grt + Pl + Ky + St ± Bt → Hbl + Grt + Ky + Pl + St + Czo ± Bt → Hbl + Grt + Pl + St + Czo ± Bt → Hbl + St + Czo + Pl ± Bt. In the described series, the alumina content increases and the Mg content of the main rock-forming minerals decreases, and desilication of the rock occurs. The described mineral zoning was formed during metamorphism as a result of the reaction between the initial amphibolite and fluid flow in the shear zone (i. e., at synmetamorphic metasomatism). Petrological and isotope data indicate that the Lyagkomina kyanite amphibolites are genetically related to the occurrences of corundum-bearing rocks in the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield.

Keywords: Belomorian province, metasomatism, kyanite, staurolite, amphibolites, corundum-bearing rocks.

* Study was carried out with State Task Project of the IPGG RAS (NIR FMUW-2021-0002 and FMUW-2019-0013) and supported with RFBR (grant No. 17-05-00265).

References

- Arnold, J., Powell, R. and Sandiford, M. (2000). Amphibolites with staurolite and other aluminous minerals: calculated mineral equilibria in NCFMASH. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (1), 23–40. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00236.x>
- Balagansky, V. V., Alexeev, N. L., Huhma, H., Azimov, P. Ya., Levsky, L. K. and Pin'kova, L. O. (2011). Provenance of the Sumian basal schists and age of the Lopian metavolcanic rocks at the Archean-Proterozoic boundary in the Kukasozero structure, North-Karelian zone of the Karelides, Baltic Shield. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 19 (4), 369–384. (In Russian)
- Berger, J., Femenias, O., Ohnenstetter, D., Plissart, G. and Mercier, J.-C. C. (2010). Origin and tectonic significance of corundum-kyanite-sapphirine amphibolites from the Variscan French Massif Central. *Journal of Metamorphic Geology*, 28 (3), 341–360. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00866.x>
- Bibikova, E. V., Bogdanova, S. V., Glebovitsky, V. A., Claesson, S. and Skiöld, T. (2004). Evolution of the Belomorian belt: NORDSIM U-Pb Zircon dating of the chupa paragneisses, magmatism, and metamorphic stages. *Petrology*, 12 (3), 195–210.
- Bibikova, Ye. V., Shel'd, T., Bogdanova, S. V., Drugova, G. M. and Lobach-Zhuchenko, S. B. (1993). Geochronology of Belomorides: Interpretation of the Multistage Geological History. *Geokhimiia*, 10, 1393–1411. (In Russian)
- Bindeman, I. N. and Serebryakov, N. S. (2011). Geology, Petrology and O and H isotope geochemistry of remarkably ^{18}O -depleted Paleoproterozoic rocks of the Belomorian Belt, Karelia, Russia, attributed to global glaciation 2.4 Ga. *Earth and Planetary Science Letters*, 306 (3–4), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.031>
- Bindeman, I. N., Serebryakov, N. S., Schmitt, A. K., Vazquez, J. A., Guan, Y., Azimov, P. Ya., Astafiev, B. Yu., Palandri, J. and Dobrzhinetskaya, L. (2014). Field and microanalytical isotopic investigation of ultradepleted in ^{18}O Paleoproterozoic “Slushball Earth” rocks from Karelia, Russia. *Geosphere*, 10 (2), 308–339. <https://doi.org/10.1130/GES00952.1>
- Bushmin, S. A. (1978). Metasomatites of the Khizovaara deposit (North Karelia). *Izvestiia AN SSSR, Seriiia geologicheskaiia*, (7), 127–138. (In Russian)
- Bushmin, S. A., Azimov, P. Ya., Lebedeva, Yu. M. and Morozov, M. V. (2005). Mineral zoning of metasomatic rocks in the metamorphic complex of the high-pressure amphibolite facies (Vinchinskaya structure, western flank of the Belomorian mobile belt). In: *Belomorian mobile belt and its analogues. Conference materials*. Petrozavodsk: Institute of geology KarSC RAS Publ., 125–129. (In Russian)
- Encarnación, J. P., Essene, E. J., Mukasa, S. B. and Hall, C. H. (1995). High-Pressure and -Temperature Sub-ophiolitic Kyanite-Garnet Amphibolites Generated during Initiation of Mid-Tertiary Subduction, Palawan, Philippines. *Journal of Petrology*, 36 (6), 1481–1503. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.petrology.a037262>
- Fed'kin, V. V. (1975). *Staurolite*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Glebovitsky, V. A. (ed.) (2005). *Early Precambrian of the Baltic Shield*. St. Petersburg: Nauka Publ. (In Russian)
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C. and Welch, M. D. (2012). Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97 (11–12), 2031–2048. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4276>
- Helms, T. S., McSween, H. Y., Laolka, T. C. and Jarosewich, F. E. (1987). Petrology of a Georgia Blue Ridge amphibolite unit with hornblende-gedrite-kyanite-staurolite. *American Mineralogist*, 72, 1086–1096.
- Hietanen, A. (1959). Kyanite-Garnet Gedrite near Orofino, Idaho. *American Mineralogist*, 44, 539–564.
- Khodorevskaya, L. I. and Varlamov, D. A. (2018). High-Temperature Metasomatism of the Layered Mafic-Ultramafic Massif in Kiy Island, Belomorian Mobile Belt. *Geochemistry International*, 56 (6), 535–553. <https://doi.org/10.1134/S001670291806006X>
- Korpechkov, D. I. (2009). Klimovskoe corundum occurrence, North Karelia: some petrographic features. In: *Materials XX Russian conf. of young scientists, dedicated to memory Corresponding Member USSR Academy of Sciences K. O. Kratts*. Petrozavodsk: Institute of Geology, KarRC RAS Publ., 94–97. (In Russian)
- Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68, 277–279.
- Kuyumjian, R. M. (1998). Kyanite-staurolite ortho-amphibolite from the Chapada region, Goias, central Brazil. *Mineralogical Magazine*, 62, 501–507. <https://doi.org/10.1017/002646198547873>
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W. V., Nickel, E. H.,

- Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G. (1997). Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61 (405), 295–310. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Birch, W. D., Burke, E. A. J., Ferraris, G., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Schumacher, J. C., Stephenson, N. C. N. and Whittaker, E. J. W. (2004). Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *Mineralogical Magazine*, 68 (1), 209–215. <https://doi.org/10.1180/0026461046810182>
- Locock, A. J. (2014). An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*, 62, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.09.011>
- Lutkovskaya, T. A. (1971). On the issue of kyanite formation at the Lyagkomina deposit. *Mineralogy and geochemistry of the Precambrian of Karelia*. Leningrad: Nauka Publ., 68–78. (In Russian)
- Miller, Y. V. and Milkevich, R. I. (1995). Fold-nappe structure of the Belomorian zone and its relation to the Karelian granite-greenstone region. *Geotectonics*, 6, 359–370.
- Miller, Y. V., Lvov, A. B., Myskova, T. A. and Mil'kevich, R. I. (1995). Position of Early Proterozoic druzites in the fold-nappe structure of the Belomorian mobile belt. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology, Geography*, 4 (28), 63–71. (In Russian)
- Moskovchenko, N. I. and Turchenko, S. I. (1975). *Metamorphism of kyanite-sillimanite type and sulfide mineralization*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Purtscheller, F. and Mogessie, A. (1984). Staurolite in garnet amphibolites from Sölden, Ötztal old crystalline basement, Austria. *Mineralogy and Petrology*, 32, 223–233.
- Silverstone, J., Spear, F. S., Franz, G. and Morteani, G. (1984). High-pressure metamorphism in the SW Tauern Window, Austria: P-T paths from hornblende-kyanite-staurolite schists. *Journal of Petrology*, 25, 501–531.
- Serebryakov, N. S. and Aristov, V. S. (2004). Conditions of localization of occurrences of collectible corundum in the rocks of the Chupa sequence of the Belomorian complex of North Karelia. *Izv. universities. Geology and exploration*, 4, 36–42. (In Russian)
- Serebryakov, N. S., Astaf'ev, B. Y., Voinova, O. A. and Presnyakov, S. L. (2007). First Th-U-Pb single zircon dating of metasomatites from the Belomorian mobile belt. *Doklady Earth Sciences*, 413 (3), 388–392. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07030154>
- Skublov, S. G., Azimov, P. Y., Glebovitskii, V. A. and Melnik, A. E. (2017). Polymetamorphism of the Chupa Sequence of the Belomorian mobile belt (Fennoscandia): Evidence from the isotope-geochemical (U-Pb, REE, O) study of zircon. *Geochemistry International*, 55 (1), 47–59. <https://doi.org/10.1134/S0016702917010098>
- Stepanova, A. V., Stepanov, V. S. and Slabunov, A. I. (2011). Achievements and problems in the study of the main magmatism of the Belomorian province of the Fennoscandian shield. *Geology of Karelia from the Archean to the present day*. Institute of Geology, KarRC RAS, 79–90. (In Russian)
- Volodichev, O. I. (1990). *Belomorian complex of Karelia. Geology and petrology*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Ward, C. M. (1984). Magnesium staurolite and green chromian staurolite from Fiordland, New Zealand. *American Mineralogist*, 69, 531–540.
- Yavuz, F. (2007). WinAmphcal: A Windows program for the IMA-04 amphibole classification. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006GC001391>

Received: January 9, 2020

Accepted: February 26, 2021

Contact information:

Ekaterina Yu. Akimova — e.akimova@spbu.ru

Pavel Ya. Azimov — pavel.azimov@mail.ru

Nikolay S. Serebryakov — nikserebr@yandex.ru