

Метаморфизм пород Кичанской структуры в составе архейского Тикшеозерского зеленокаменного пояса (Беломорский подвижный пояс, Фенноскандинавский щит)

Усольцева А. Е.¹, Балтыбаев Ш. К.^{1,2}

¹ Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, st097637@student.spbu.ru

² Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

Аннотация. Метаморфические образования Кичанской структуры Тикшеозерского зеленокаменного пояса образовались по породам дифференцированной вулканогенной серии от базальтов до риолитов с небольшими прослоями осадков и представлены различными по минеральному составу гнейсами, сланцами и амфиболитами. Термобарометрия с применением расчета мультиравновесных *PT*-диаграмм и «псевдосечений» выявила, что условия метаморфизма пород Кичанской структуры отвечают таковым амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций повышенных давлений. Выявлен регрессивный тренд метаморфизма пород от максимальных значений $T = 800^{\circ}\text{C}$ и $P = 11.5$ кбар до минимальных $T = 610^{\circ}\text{C}$ и $P = 6.5$ кбар.

Ключевые слова: Кичанская структура, Тикшеозерский зеленокаменный пояс, Беломорская провинция, термобарометрия, метаморфизм.

Metamorphism of rocks of the Kichany structure in the Archean Tiksheozero Greenstone Belt (Belomorian mobile belt, Fennoscandinavian shield)

Usoltseva A. E.¹, Baltybaev S. K.^{1,2}

¹ Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Russia, Saint Petersburg, st097637@student.spbu.ru

² Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract. Metamorphic rocks of the Kichany structure of the Tiksheozero greenstone belt were derived from rocks of a differentiated volcanogenic series from basalts to rhyolites with a small admixture of sediments and are represented by gneisses, schists and amphibolites of various mineral compositions. Thermobarometry using the calculation of multi-equilibrium *PT*-diagrams and «pseudosections» has revealed conditions of metamorphism of the rocks of the Kichany structure of amphibolite and epidote-amphibolite facies of increased pressures. A *P-T* path of retrograde metamorphism was constructed from maximum values of $T = 800^{\circ}\text{C}$ and $P = 11.5$ kbar to minimum values of $T = 610^{\circ}\text{C}$ and $P = 6.5$ kbar.

Keywords: Kichany structure, Tiksheozero greenstone belt, Belomorian mobile belt, thermobarometry, metamorphism.

Введение

Кичанская структура находится в зоне стыка Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса (рис. 1). В отношении метаморфизма породы этой структуры пока остаются малоизученными. В немногочисленных публикациях (Калинин и др., 2017; Мыскова и др., 2024) авторы ссылаются на более ранние исследования (Карта..., 1991; Беляев, Пожиленко, 1997; Баянова, 2004), в которых содержатся сведения о параметрах метаморфизма двух этапов – неоархейского ($T = 665\text{--}700^{\circ}\text{C}$, $P = 7\text{--}11$ кбар) и палеопротерозойского ($T = 575\text{--}630^{\circ}\text{C}$, $P = 5\text{--}6.5$ кбар), однако, эти цитируемые работы нельзя отнести к общедоступным. В связи с этим, актуальность работы определяется необходимостью оценки *PT*-параметров метаморфизма с использованием современных методов термобарометрии. Нами применялся метод мультиравновесной термобарометрии, который позволяет не только определить условия метаморфизма, но и оценить равновесное состояние используемых минералов.

Краткая геологическая характеристика

Согласно последним сведениям, породы Кичанской структуры в основном представляют собой зеленокаменные образования метаморфизованной дифференцированной вулканогенной серии (Мыскова и др., 2024). В ней выделяются три толщи: нижняя, средняя и верхняя.

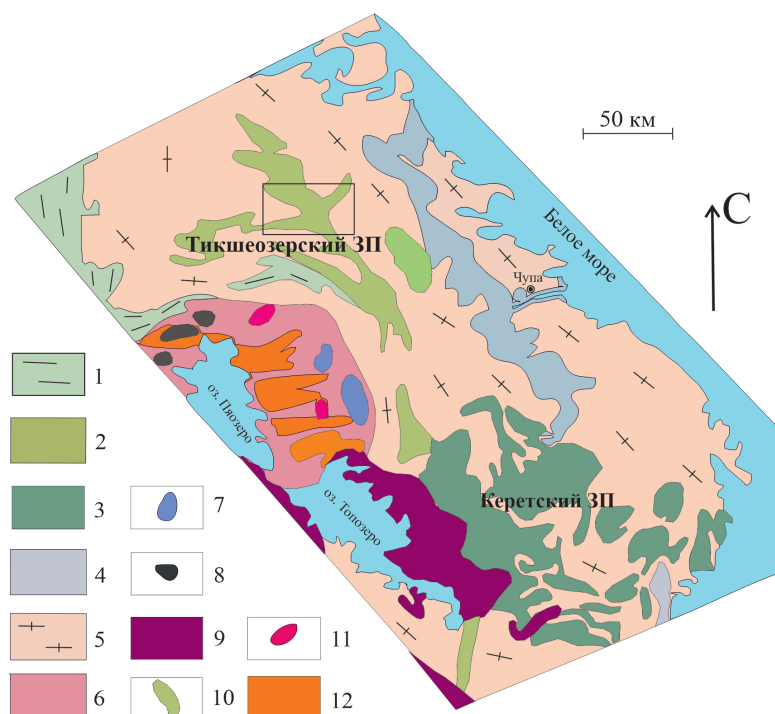


Рис. 1. Положение Кичанской структуры в Тикшеозерском зеленокаменном поясе Беломорского подвижного пояса по (Слабунов, 2008): 1 – палеопротерозойские (2.5–1.92 млрд лет) осадочные и вулканогенные образования; 2–3 – мезо- и неоархейские образования: 2 – с возрастами 2.78–2.74 млрд лет и 3 – 2.88–2.84 млрд лет (Тикшеозерский и Керетский зеленокаменные пояса, соответственно); 4 – парагнейсы с редкими прослоями амфиболитов; 5 – мезо- и неоархейские образования (тоналитогнейсы, гнейсы, амфиболиты, нерасчлененные); 6 – архейские образования Карельского кратона (нерасчлененные); 7 – щелочной комплекс (1.75–1.83 млрд лет); 8 – расслоенные перидотит-габбро-норитовые интрузии (2.44–2.36 млрд лет); 9 – интрузивные чарнокиты и метачарнокиты (~ 2.45 млрд лет); 10 – субщелочные габбро; 11 – интрузивные чарнокиты (2.66 млрд лет); 12 – санукитоиды (2.72 млрд лет) (Калинин и др., 2017). Прямоугольник – изученная часть Кичанской структуры

Fig. 1. Location of the Kichany structure in the Tiksheozersky greenstone belt of the Belomorian mobile belt according to (Slabunov, 2008): 1 – Paleoproterozoic (2.5–1.92 Ga) sedimentary and volcanic formations; 2–3 – Meso- and Neoarchean formations: 2 – 2.78–2.74 Ga old and 3 – 2.88–2.84 Ga old (Tiksheozero and Keretsky greenstone belts, respectively); 4 – paragneisses with rare amphibolite interlayers; 5 – Meso- and Neoarchean formations (tonalite-gneisses, gneisses, amphibolites undivided); 6 – Archean formations of the Karelian craton (undivided); 7 – alkaline complex (1.75–1.83 Ga); 8 – peridotite-gabbro-norite layered intrusions (2.44–2.36 Ga); 9 – intrusive charnockites and metacharnockites (~ 2.45 Ga); 10 – subalkaline gabbros; 11 – intrusive charnockites (2.66 Ga); 12 – sanukitoids (2.72 Ga) (Kalinin et al., 2017). Rectangle marks the studied area of the Kichany structure

По данным в (Милькевич и др., 2003; Мыскова и др., 2024), нижняя толща представлена чередующимися в разрезе приблизительно в одинаковых количествах гранатовыми и плагиоклазовыми амфиболитами, гнейсами и сланцами с варьирующими содержаниями биотита, граната и амфибола. Амфиболиты по химическому составу отвечают базальтам и андезибазальтам и по своей природе близки основным вулканитам океанических плато. Гнейсы и сланцы отвечают по составу дацитам и риолитам, обладающими характеристиками островодужных вулканитов. Среди кислых вулканитов в подчиненном количестве присутствуют граувакки. Средняя толща сложена также гранатовыми и плагиоклазовыми амфиболитами, первичная природа которых по геохимическим данным интерпретируется как океанические толеиты. Верхняя толща представлена гнейсами и сланцами пестрого минерального состава с большими вариациями темноцветных минералов (биотита, граната и амфибола) и редкими маломощными прослоями амфиболитов и кристаллосланцев.

Методика и материал исследования

Построение фазовых диаграмм производилось с помощью программы MAGEMin (Riel et al., 2022) с базой данных минералов (Green et al., 2016). Оценки *PT*-параметров образования метаморфических минеральных парагенезисов методом мультиравновесной термобарометрии выполнялись

с помощью программы winTWQ v.2.64 (Berman, 1991; Berman et al., 2007). В расчетах применялась база термодинамических данных JUN92 (Berman, 1991) для минералов из метаморфических пород базитового состава (изученные основные и средние вулканы далее условно называются метабазитами), и база DEC06 (Berman, Aranovich, 1996; Berman et al., 2007) для минералов в метапелитах (изученные метаморфизованные вулканогенно-осадочные породы и вулканы кислого и среднего состава далее условно называются метапелитами).

Метаморфизованные породы исследуемого участка представлены главным образом различными по минеральному составу гнейсами, сланцами и амфиболитами. Реже встречаются гранитоиды и нерасчлененный комплекс габбро-норит-лерцолитов, однако детальные исследования этих типов пород не проводились.

Метабазиты представлены преимущественно гранатовыми амфиболитами и плагиоклаз-биотит-амфиболовыми сланцами. Текстуры пород сланцеватые, редко массивные (рис. 2 а), структуры нематобластовые (рис. 2 б) с сочетанием лепидонематобластовых и пойкилопорфириобластовых структур. Первые характеризуются присутствием удлиненно-призматических кристаллов

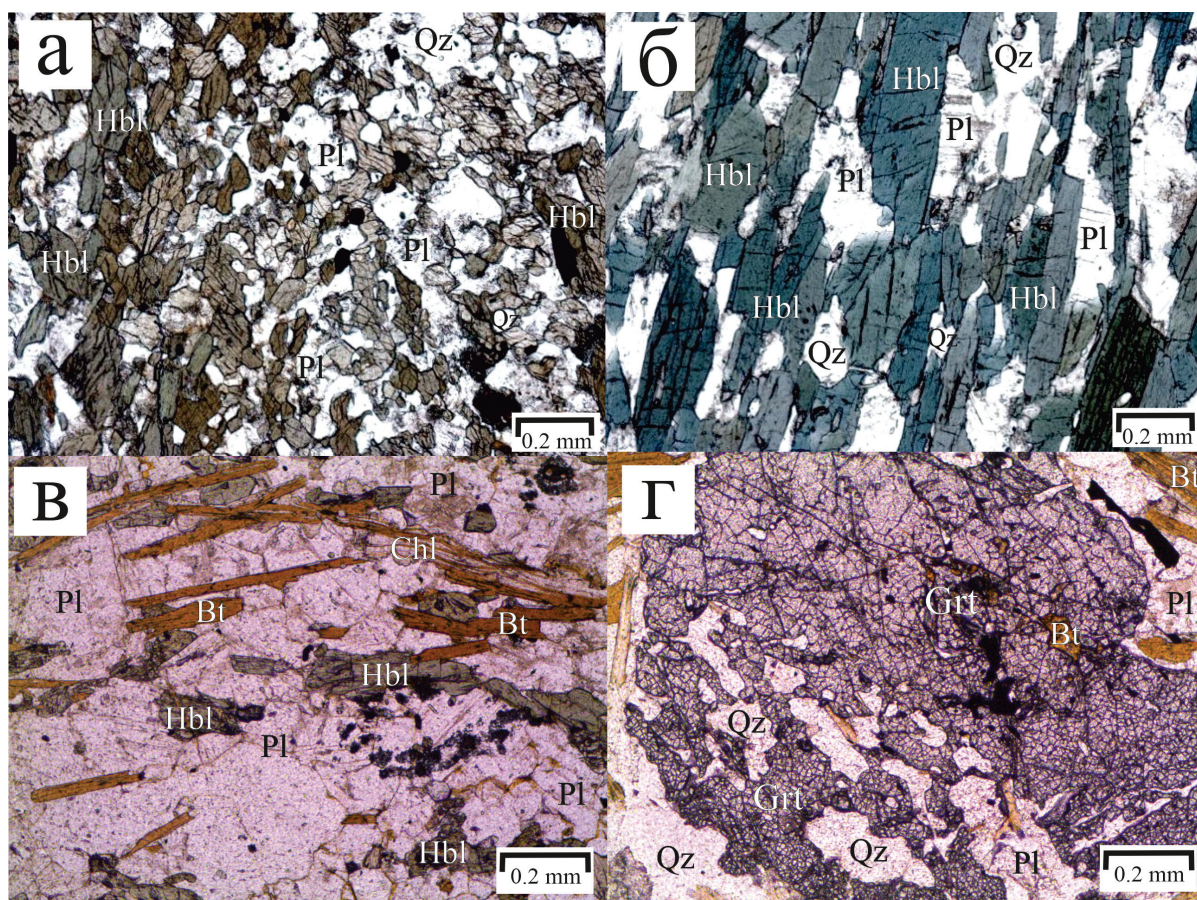


Рис. 2. Петрографические особенности пород Кичанской структуры: а – амфиболит с массивной текстурой; б – амфиболит с нематобластовой структурой; в – нематолепидобластовая структура в гранат-амфибол-биотитовом гнейсе; г – порфириобласт граната с минеральными включениями, в основной ткани кианит-гранат-биотитового гнейса. Список сокращений минералов (включая рис. 3, 4): Hbl – роговая обманка, Bt – биотит, Ms – мусковит, Amp – амфибол, Qz – кварц, Ep – эпидот, Dio – диопсид, Grt – гранат, Pl – плагиоклаз, Ilm – ильменит, Rt – рутил, Ttn – титанит, Liq – расплав, Ky – кианит, Omph – омфацит, Gl – глаукофан

Fig. 2. Petrographic features of rocks of the Kichany structure: а – amphibolite with a massive structure; б – amphibolite with a nematoblastic texture; в – nematolepidoblastic texture in garnet-amphibole-biotite gneiss; г – garnet porphyroblast containing inclusions of minerals in the main tissue of kyanite-garnet-biotite gneiss. The list of abbreviations of minerals (including fig. 3, 4): Hbl – hornblende, Bt – biotite, Ms – muscovite, Amp – amphibole, Qz – quartz, Ep – epidote, Dio – Diopside, Grt – garnet, Pl – plagioclase, Ilm – Ilmenite, Rt – rutile, Ttn – titanite, Liq – melt, Ky – kyanite, Omph – omphacite, Gl – glaucophane

амфибола с подчиненным количеством биотита, а вторые – присутствием крупных идиоморфных кристаллов граната с включениями других минералов (кварца, рутила, карбоната, рудных минералов). По размерности минералов породы разномасштабные (от мелко- до крупномасштабных). Породы подвержены интенсивным вторичным преобразованиям – окварцеванию, карбонатизации, серицитизации. В некоторых случаях амфиболиты содержат до 25 % новообразованного кварца, в прожилках развиваются карбонатные прослои. Также отмечается серицитизация плагиоклаза.

Основными минералами метабазитов являются амфибол, плагиоклаз, гранат, биотит, эпидот и кварц. В качестве акцессорных минералов встречаются титанит, рутил и рудные минералы, представленные преимущественно пиритом, пирротинном и магнетитом.

По химическому составу гранат соответствуетgrossуляр-альмандиновому ряду с содержаниемgrossуляра от 16 до 40 %, а биотит представлен антит-флогопитом с магнезиальностью (xMg) – 0.44–0.66. Амфибол соответствует преимущественно магнезиальной роговой обманке, однако также присутствуют в равной степени паргасит и чермакит. Состав плагиоклазов в метабазитах варьирует от An_{16} до An_{70} , при этом наиболее характерными являются средние и основные – андезины и лабрадоры.

Составы минералов (рис. 3 а, б, г) в метабазитах имеют ряд особенностей, отличающих их от минералов в метапелитах. Кристаллы граната зональные, содержание Са увеличивается к краю

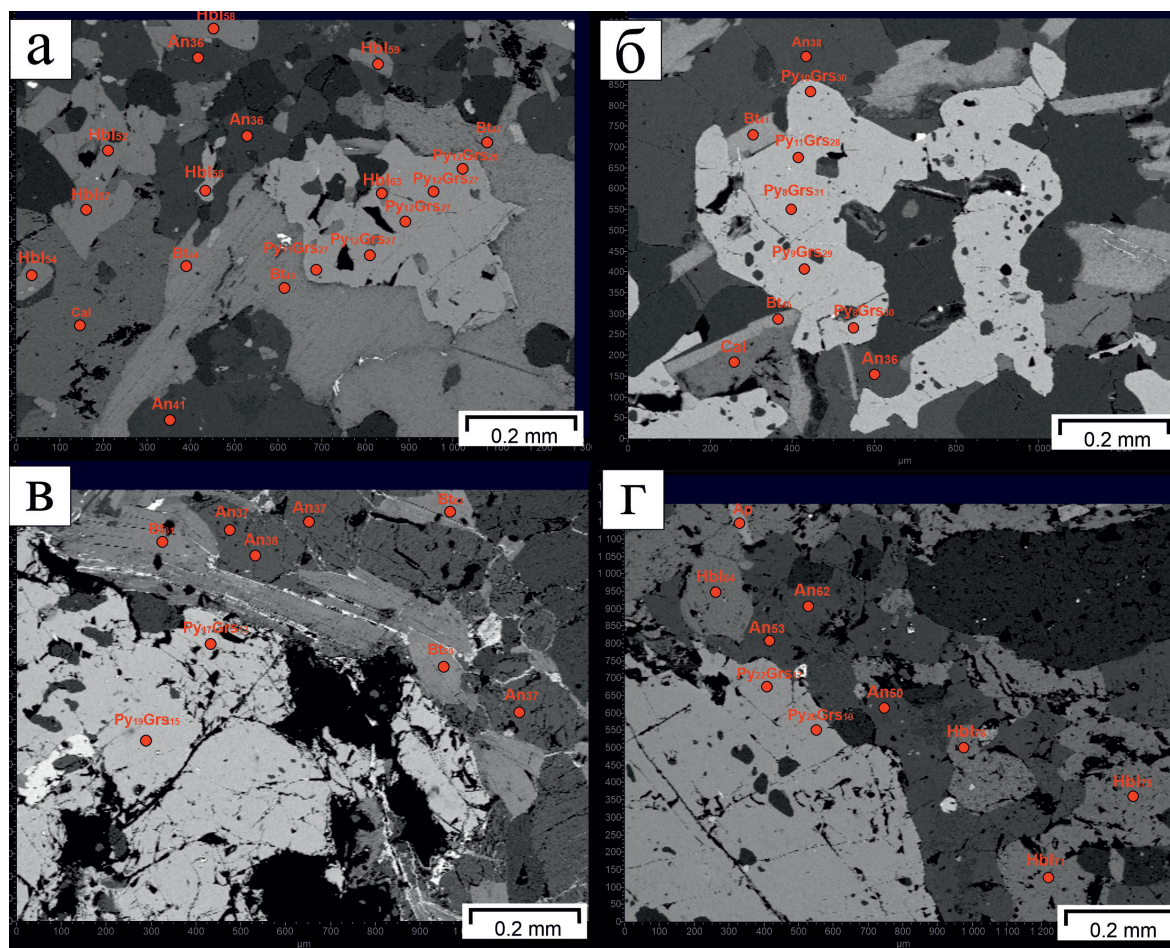


Рис. 3. Микрофотографии минералов, сделанные в режиме обратно отражённых электронов на растровом электронном микроскопе: а – гранат-биотит-плагиоклазовый амфиболит (обр. 1125); б – гранат-амфибол-биотитовый сланец (обр. 1005-6); в – кианит-гранат-биотитовый гнейс (обр. 5875-2); г – биотит-гранат-амфиболовый сланец (обр. 5896-4)

Fig. 3. Back-scattered electron images of minerals taken with a scanning electron microscope: a – garnet-biotite-plagioclase amphibolite (sample 1125); б – garnet-amphibole-biotite schist (sample 1005-6); в – kyanite-garnet-biotite gneiss (sample 5875-2); г – biotite-garnet-amphibole schist (sample 5896-4)

зерна, в отличие от граната в гнейсах, в котором зональность обратная. Отмечается увеличение содержание Mg в гранате, если он граничит с биотитом. Магнезиальность биотита увеличивается, если биотит граничит с амфиболом. Плагиоклаз, в целом, несколько более основной, чем плагиоклаз в метапелитах.

Метапелиты представлены лейкократовыми гранат-биотитовыми, кианит-гранат-биотитовыми, гранат-микроклин-двуслюдяными гнейсами и более меланократовыми амфибол-гранат-биотитовыми гнейсами с полосчатой или гнейсовидной текстурой. Структуры пород лепидогранобластовые, пойкилопорфировластовые, нематолепидогранобластовые (рис. 2 в, г). Породы преимущественно мелко-среднезернистые, карбонатизация не проявлена.

В метапелитах основными минералами являются плагиоклаз, кварц, гранат, биотит, калиевый полевой шпат, кианит, мусковит. Акцессорные и второстепенные минералы представлены апатитом, турмалином, эпидотом, рутилом, цирконом и ильменитом. Состав плагиоклазов меняется от An_4 до An_{44} . Гранат – гроссуляр-альмандинового ряда, однако, в отличие от гранат в метабазитах, с более широкими вариациями содержания кальция (Grs 7–34 %). Группа биотита ($xMg = 0.23–0.62$) представлена как аннитом, так и флогопитом. Мусковит содержит незначительную примесь натрия, железа и магния.

Моделирование минералообразования и *PT*-условия метаморфизма

Расчет фазовой *PT*-диаграммы произведен в программе MAGEMin (Reil et al., 2022) для состава гранат-биотит-плагиоклаз-амфиболового сланца (рис. 4).

Моделируемый гранат имеет широкое поле устойчивости, охватывающее практически все расчетное *PT*-пространство, однако наибольшее его количество отмечается с ростом давления. Так, начиная с 400 °С, гранат устойчив при давлении не менее 3.2 кбар. При повышении температуры критическое значение давления также растет, и уже при $T = 700$ °С минимальное давление для возникновения граната равно 7 кбар. При повышении температуры, начиная примерно с 750 °С и выше, начинается образование расплава.

Химический состав граната в интервале 650–750 °С и 6.5–9.5 кбар преимущественно альмандин-гроссуляровый, однако при уменьшении температуры и давления состав он становится менее пироповым, за счет чего увеличивается содержание спессартина.

Состав амфибола в интервале нахождения точек соответствует преимущественно паргаситу.

Гранат и амфибол совместно встречаются в диапазоне $T = 450–850$ °С и $P = 5–12$ кбар, однако при низких температурах и высоких давлениях вместо амфибола появляются клинопироксен и глаукофан, а при низких давлениях исчезает гранат. Эти особенности смены минеральных парагенезисов дают возможность ограничить *PT*-поля образования реально наблюдаемых в породах минералов.

Поле устойчивости минерального парагенезиса $Pl + Amp + Bt + Grt$ имеет довольно широкий диапазон: $T = 450–750$ °С и $P = 5–11$ кбар. Поле этого парагенезиса по давлению снизу ограничивается линией устойчивости граната, справа – с ростом температуры – возникновением расплава. В низкотемпературной части амфибол обычно замещается такими фазами, как эпидот, клинопироксен и т. п.

На фазовой диаграмме приведены (рис. 4) значения выявленных *PT*-параметров для других образцов метабазитов и метапелитов. Как следует из приведенных данных, на основе использования множества минеральных реакций (мультиравновесий) TWQ выявляется разброс значений: для метабазитов – в пределах $T = 610–800$ °С и $P = 7.5–11.5$ кбар, а для метапелитов – в пределах $T = 610–680$ °С и $P = 6.5–8.5$ кбар.

Отметим, что выявленные *PT*-параметры метаморфизма соответствуют полю устойчивости граната, что согласуется с петрографическими данными.

Как указывалось выше, при рассмотрении выполненных расчетов в программе MAGEMin, начиная примерно от 750–800 °С и выше, в моделируемых породах среднего и основного состава появляется расплав. Поскольку в породах Кичанской структуры отсутствуют признаки анатектического плавления, то температуру ~ 750 °С можно рассматривать как максимально возможную

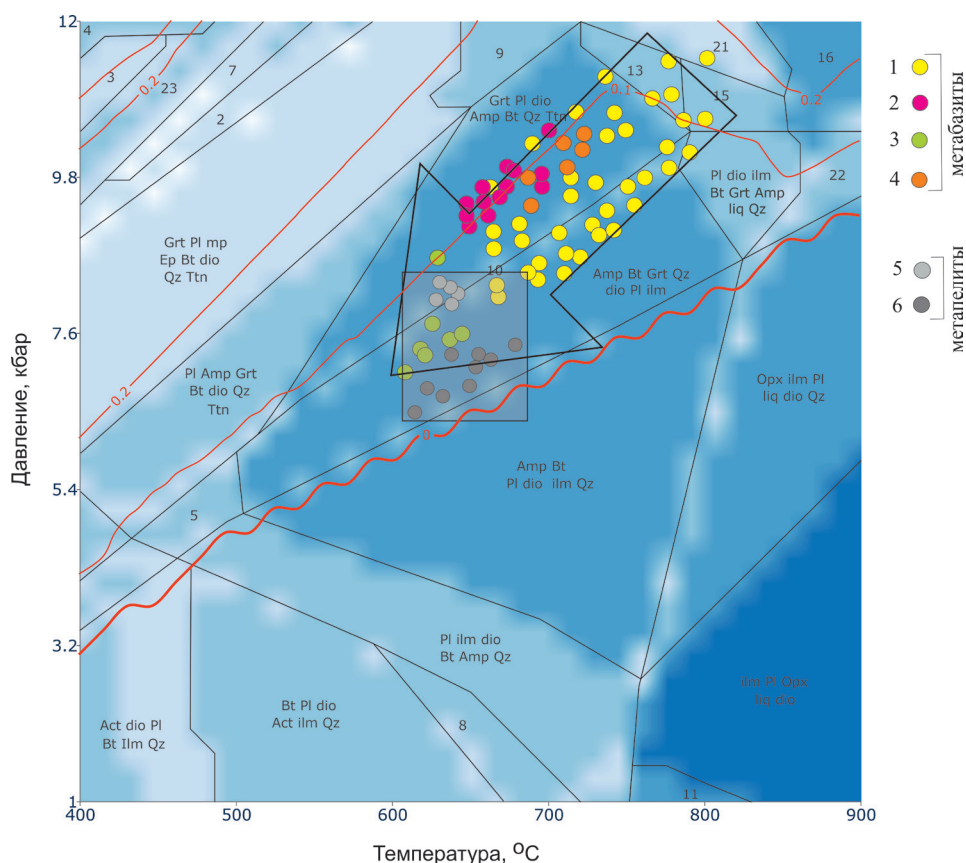


Рис. 4. Расчетная *PT*-диаграмма для гранат-биотит-плагиоклаз-амфиболового сланца с наложенными точками *PT*-параметров изученных метабазитов и метапелитов, рассчитанные в программе winTWQ: 1 – гранат-амфибол-биотитовый сланец (1005-6); 2 – биотит-гранат-амфиболовый сланец (5896-4); 3 – биотит-амфибол-гранатовый сланец (5880-4); 4 – гранат-биотит-плагиоклазовый амфиболит (1125); 5 – гранат-микроклин-двуслюдной гнейс (1112); 6 – кианит-гранат-биотитовый гнейс (5875-2). Список фаз в пронумерованных полях: 2 – Grt Amp Ep Dio Bt Pl Qz Rt; 3 – Grt Omph Gl Ep Bt Ms Qz Ky Rt; 4 – Ms Gl Ep Omph Grt Qz Ky Rt; 5 – Bt Ilm Pl Grt Dio Amp Qz; 7 – Pl Amp Bt Grt Omph Ep Qz Rt; 8 – Pl Dio Bt Ilm Amp Qz; 9 – Grt Ep Bt Amp Pl Dio Qz Ttn; 11 – Pl Dio Opx Ilm Liq H₂O; 13 – Bt Dio Amp Pl Grt Liq Qz Ttn; 15 – Grt Pl Dio Amp Liq Bt Qz Rt; 16 – Grt Pl Dio Liq Qz Rt; 21 – Liq Bt Pl Grt Dio Amp Qz Rt; 22 – Ilm Liq Dio Pl Opx Grt Qz; 23 – Ep Omph Bt Grt Amp Pl Qz Ky Rt. Красными линиями показаны мольные доли граната, серым прямоугольником показана область метапелитов

Fig. 4. Calculated *PT*-diagram for garnet-biotite-plagioclase-amphibole schist with superimposed points of *PT*-parameters of other metabasites and metapelites calculated in the winTWQ program: 1 – garnet-amphibole-biotite schist (1005-6); 2 – biotite-garnet-amphibole schist (5896-4); 3 – biotite-amphibole-garnet schist (5880-4); 4 – garnet-biotite-plagioclase amphibolite (1125); 5 – garnet-microcline-bicuspid gneiss (1112); 6 – kyanite-garnet-biotite gneiss (5875-2). List of phases in the numbered fields: 2 – Grt Amp Ep Dio Bt Pl Qz Rt; 3 – Grt Omph Gl Ep Bt Ms Qz Ky Rt; 4 – Ms Gl Ep Omph Grt Qz Ky Rt; 5 – Bt Ilm Pl Grt Dio Amp Qz; 7 – Pl Amp Bt Grt Omph Ep Qz Rt; 8 – Pl Dio Bt Ilm Amp Qz; 9 – Grt Ep Bt Amp Pl Dio Qz Ttn; 11 – Pl Dio Opx Ilm Liq H₂O; 13 – Bt Dio Amp Pl Grt Liq Qz Ttn; 15 – Grt Pl Dio Amp Liq Bt Qz Rt; 16 – Grt Pl Dio Liq Qz Rt; 21 – Liq Bt Pl Grt Dio Amp Qz Rt; 22 – Ilm Liq Dio Pl Opx Grt Qz; 23 – Ep Omph Bt Grt Amp Pl Qz Ky Rt. Red lines show the molar part of the garnet, the gray rectangle shows the area of metapelites

при метаморфизме этих пород. Непосредственные оценки большинства *PT*-параметров метаморфизма по составам сосуществующих минералов, а также минеральные парагенезисы в породах не противоречат такому предположению.

Закключение

Термобарометрия с применением расчета мультиравновесных *PT*-диаграмм и «псевдосечений» выявила условия метаморфизма пород Кичанской структуры амфиболитовой и эпидот-

амфиболитовой фаций повышенных давлений и фиксирует регрессивный тренд метаморфизма с максимальными значениями $T = 800^{\circ}\text{C}$, $P = 11.5$ кбар и минимальными значениями $T = 610^{\circ}\text{C}$, $P = 6.5$ кбар.

Благодарности

Авторы весьма признательны О. Л. Галанкиной (ИГГД РАН, Санкт-Петербург) за помощь с получением локальных составов минералов и анонимному рецензенту за тщательную рецензию и благожелательные комментарии и замечания.

Авторы благодарят Т. А. Мыскову (ИГГД РАН, Санкт-Петербург) за обсуждение полученных данных и некоторые предоставленные материалы по изученной структуре.

Работа была выполнена в рамках темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0002) Минобрнауки России.

Литература

1. Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб. Изд-во: Наука, 2004. 174 с.
2. Беляев О. А., Пожиленко В. И. Структурно-метаморфическая эволюция Беломорского подвижного пояса (Енский сегмент) // Беломорский мобильный пояс: геология, геодинамика, геохронология: Тез. докл. междунар. совещ. Петрозаводск. Изд-во: КарНЦ РАН, 1997. 17 с.
3. Калинин А. А., Астафьев Б. Ю., Воинова О. А., Баянова Т. Б., Хиллер В. В. Геологическое строение и перспективы рудоносности Кичанской структуры Тикшеозерского зеленокаменного пояса (Северная Карелия) // Литосфера. 2017. Т. 17, № 3. С. 102–126.
4. Карта минеральных фаций метаморфических пород восточной части Балтийского щита / Ред. В. А. Глебовицкий. 1991. СПб. Изд-во: ВСЕГЕИ. 1 л.
5. Милькевич Р. И., Миллер Ю. В., Глебовицкий В. А., Богомолов Е. М., Гусева В. Ф. Толеитовый и известково-щелочной магматизм в северной части Тикшеозерского зеленокаменного пояса: геохимические признаки субдукционной обстановки // Геохимия. 2003. С. 1262–1274.
6. Мыскова Т. А., Никонова А. С., Никонов К. А., Житникова И. А., Львов П. А. Кичанская структура Архейского Тикшеозерского зеленокаменного пояса Фенноскандинавского щита в свете новых геохимических и геохронологических данных // Геохимия. 2024. Т. 69, № 9. С. 81–106.
7. Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск. Изд-во: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.
8. Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // Canad. Mineral. 1991. V. 32. P. 833–855.
9. Berman R. G., Aranovich L. Ya., Rancourt D. G., Mercier D. G. Reversed phase equilibrium constraints on the stability of Mg–Fe–Al biotite // American Mineralogist. 2007. V. 92, No. 1. P. 139–150.
10. Berman R. G., Aranovich L. Y. Optimized standard state and solution properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and Ilmenite in the system $\text{FeO–MgO–CaO–Al}_2\text{O}_3\text{–TiO}_2\text{–SiO}_2$ // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. V. 126. P. 1–24.
11. Green E. C. R., White R. W., Diener J. F. A., Powell R., Holland T. J. B., Palin R. M. Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks // Journal of Metamorphic Geology. 2016. V. 34. P. 845–869, <https://doi.org/10.1111/jmg.12211>.
12. Riel N., Kaus B. J. P., Green E. C. R., Berlie N. MAGEMin, an Efficient Gibbs Energy Minimizer: Application to Igneous Systems // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. V. 23. 2022. <https://doi.org/10.1029/2022GC010427>.