

УДК 552.13

СТАДИЙНОСТЬ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫХ ЖИЛ И ОКОЛОЖИЛЬНЫХ ОРЕОЛОВ В РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ КОМПЛЕКСАХ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ

© 2023 г. И. С. Волков^а, *, В. М. Козловский^а

^а Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*e-mail: ivanvolkov19@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.11.2022 г.

После доработки 16.03.2023 г.

Принята к публикации 25.04.2023 г.

На островах и побережье Белого моря в Северной Карелии в толще архейских гнейсов широко распространены тела раннепротерозойских метаморфизованных габброидов. К этим телам метабазитов, а также к их контактам с гнейсами приурочены карбонатно-силикатные жилы с сульфидной Fe-Си минерализацией вплоть до рудопроявлений. Главными жильными минералами являются полевые шпаты, кварц, карбонаты и хлорит. Стадийность жилобразования соответствует переходу от ранних кварц-плагиоклазовых к поздним кварц-карбонатным ассоциациям с хлоритом и сульфидами. Ранняя (высокотемпературная) стадия фиксируется по околожилным амфиболитовым ореолам, где температурные оценки методом TWQ составляют около 550–650°C. Этой стадии соответствует кварц-плагиоклазовая ассоциация краевых зон жил. Переход к поздней стадии с формированием жильных кварц-карбонатных ассоциаций ($\pm$ биотит) происходил при температуре 540°C и ниже, судя по кальцит-доломитовым ассоциациям. Дальнейшее развитие кварц-хлорит-карбонатной и сульфидных ассоциаций в жилах и околожилных амфиболитах соответствует снижению температуры до 350°C и ниже, согласно хлоритовым термометрам. Жилообразование и околожилную амфиболитизацию предположительно связывают с воздействием метаморфических флюидов на наиболее позднем ретроградном этапе метаморфизма в раннем протерозое.

Ключевые слова: метабазиты, карбонатно-силикатные жилы, амфиболитовые ореолы, хлорит, кальцит, доломит–анкерит, Беломорский подвижный пояс

DOI: 10.31857/S0869590323050072, **EDN:** AXVWBP

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы генезиса гидротермальных жил в метаморфических толщах во многом связаны с природой минералообразующих флюидов, обеспечивающих разномасштабное перераспределение вещества и, как следствие, возникновение многокомпонентных и многофазных минеральных ассоциаций, в том числе приводящих к концентрированию цветных и благородных металлов. Другим аспектом жилообразования являются особенности развития деформаций в неоднородных метаморфических толщах. Кварцевые и карбонатно-силикатные жилы характерны для различных по составу и происхождению метаморфических комплексов (Marsala et al., 2013). Жильные тела хорошо идентифицируются среди вмещающих пород, так как обычно имеют контрастный по отношению к ним состав. Жилы могут отражать различные события геодинамической активности в истории развития того или иного региона (Bons et al., 2012).

Характерными примерами жильных тел в метаморфических толщах могут служить кварцевые и карбонатно-силикатные жилы Гренвильского орогена Северо-Американской платформы (Loi-dolt, 1970), южных и юго-восточных районов Индийского щита (Sankar, Prasad, 2012; Raj, Kumar, 2015, 2018), а также жилы Свеконорвежской провинции Балтийского (Фенноскандинавского) щита (Alm, Sundblad, 1994; Alm et al., 2003; Cook et al., 2011). По минеральному составу среди них выделяются преимущественно кварц-полевошпатовые, карбонат-кварц-полевошпатовые и кварцевые жилы. Жилы генетически могут быть связаны либо с plutonicким магматизмом (Sankar, Prasad, 2012; Raj, Kumar, 2015, 2018), либо с отделением флюидов при региональном метаморфизме (Alm, Sundblad, 1994; Alm et al., 2003). Для таких жильных систем характерна сульфидная медная минерализация, иногда доходящая до масштаба мелкого месторождения (Alm, Sundblad, 1994). Главными медны-

ми сульфидными минералами являются борнит, халькопирит и минералы группы халькозина. Интерес, проявляемый к жильным системам, связан с современными подходами к изучению вещественной эволюции, включая массоперенос и концентрирование металлов в метаморфических толщах. Для понимания этих процессов важное значение имеют структурно-геологические и минералогические исследования динамики развития жил, а также реконструкция физико-химических условий образования. Одним из наиболее сложных и принципиальных вопросов остается определение последовательности и *P-T* условий формирования жильных минеральных ассоциаций (Bons et al., 2012).

В настоящей работе представлены новые данные о структурных особенностях карбонатно-силикатных жил, залегающих в породах докембрийского метаморфического комплекса в Северной Карелии. Впервые для объекта приведены температурные оценки для изученной последовательности жильных и околожильных минеральных ассоциаций. Полученные результаты позволяют предложить общую петрогенетическую схему развития карбонатно-силикатных жил.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализы минералов на главные элементы и фотографии в обратнорассеянных электронах выполнены на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL 8200 с 5-волновыми спектрометрами в Центре коллективного пользования научного оборудования “ИГЕМ-Аналитика” (г. Москва, ИГЕМ РАН, аналитики С.Е. Борисовский и Е.В. Ковальчук). Технические условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 20 нА, диаметр зонда 1 мкм, время экспозиции на все элементы составляло для силикатов 10 с, для карбонатов – 20 с. Расчет матричных поправок осуществлялся методом ZAF с использованием программы фирмы JEOL. Для калибровки использованы апробированные внутрилабораторные стандарты природных минералов.

Для определения *P-T* параметров образования минеральных ассоциаций применялся метод мультиминеральной термобарометрии, основанный на построении комплекса линий моновариантных равновесий в поле температуры и давления – метод TWQ (Berman, 1991) с использованием взаимно согласованной термодинамической базы данных jun92 (Berman, 1988). При определении параметров принимались во внимание пересечения нескольких независимых реакций. Также для оценки температур образования амфиболитов использовался амфибол-плагиоклазовый термометр (Holland, Blundy, 1994).

Температура образования хлоритов определялась с использованием методик, основанных на распределении Al между октаэдрической и тетраэдрической позициями в структуре хлорита (Cathelineau, Nieva, 1985; Котельников и др., 2012). Также применялся термометр (Bourdelle et al., 2013), основанный на смещении равновесия: клинохлор + судоит $\leftrightarrow$ амезит + кварц + H_2O .

Для определения температуры образования карбонатов использовался кальцит-доломитовый термометр (Anovitz, Essene, 1987), основанный на фазовом равновесии в системе $CaCO_3$ – $MgCO_3$ – $FeCO_3$.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ РАЙОНА

Объект изучения находится на побережье Северной Карелии, включая прилегающие острова (рис. 1). В этом районе широко распространены кварцевые и карбонатно-силикатные жилы, залегающие среди метабазитов раннего протерозоя. Данная территория относится к Чупинскому сектору Беломорского подвижного пояса (БПП) (Глебовицкий, 2005). БПП представляет собой крупную структуру в восточной части Фенноскандинавского (Балтийского) щита, сформировавшуюся в архее и претерпевшую структурную и метаморфическую перестройку в связи с формированием раннепротерозойского Лапландско-Кольского орогена (Балаганский и др., 1998; Балаганский, 2002; Слабунов, 2008; Слабунов и др., 2021). Вмещающими породами для карбонатно-силикатных жил обычно служат тела раннепротерозойских базитов. Тела базитов представлены комплексами метаморфизованных габбро-анортозитов и габбро-норитов, а также железистых толеитов, которые рассматриваются большинством исследователей, как комплекс гранатовых метагаббро (Шуркин, 1960; Степанов, 1981; Степанова и др., 2017; Stepanova et al., 2022). Метаморфизованные габброиды обычно встречаются в виде небольших изометричных массивов (50–200 м) и даек мощностью от 0.5 до 25 м; кроме того, они часто формируют будины и серии будин размером от нескольких метров до нескольких сотен метров в амфиболит-гнейсовой толще. Возрастные оценки внедрения габбро-анортозитов и габбро-норитов составляют 2.5–2.36 млрд лет, а протолитов гранатовых метагаббро – 2.17–2.12 млрд лет (Stepanova, Stepanov, 2010; Скублов и др., 2013; Степанова и др., 2017; Stepanova et al., 2022). Интрузии базитов были метаморфизованы в условиях высоко- и умеренно-барической амфиболитовой, реже в низкобарической эклогитовой, фации и частично будинированы (Козловский, Аранович, 2010; Скублов и др., 2013, 2016; Березин, Скублов, 2014; Козловский и др., 2020). Возраст метаморфизма оценивается как

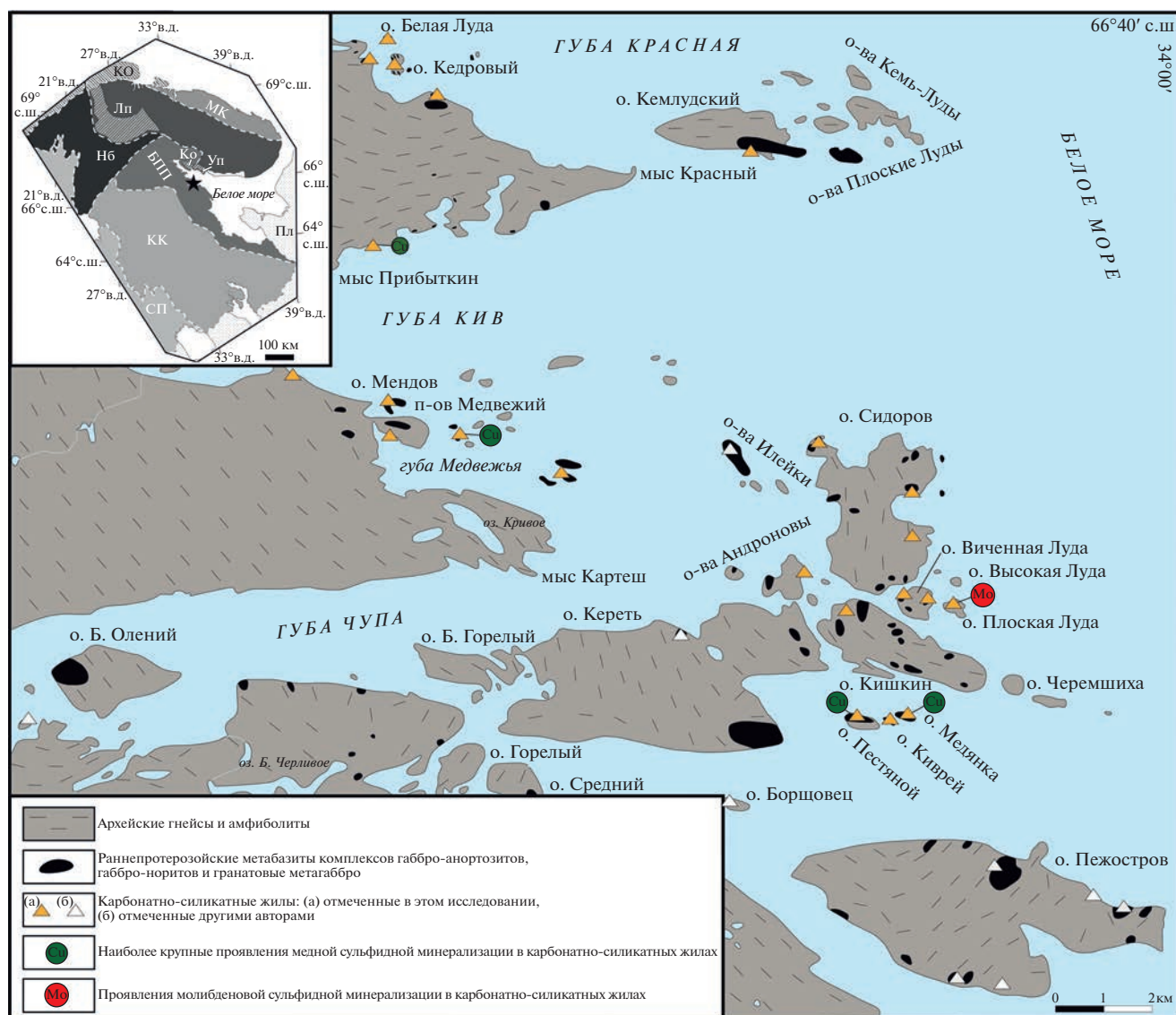


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования в Чупинском сегменте БПП. Построена с использованием материалов авторов, а также Л.А. Косого (1938), В.И. Лебедева (1950), В.С. Смирновой и Р.И. Солодкой (1960) и А.И. Слабунова (2008). На врезке – положение района исследований: звездочка – район исследования, БПП – Беломорский подвижный пояс, МК – Мурманский кратон, КК – Карельский кратон, КП – Кольская провинция, Нб – провинция Норрботтен, СП – Свекофенская провинция, КО – область Каледонского орогенеза, ПЛ – платформенный чехол, Ко – Колвицкая зона меланжа, Лп – Лапландский гранулитовый пояс, Уп – Умбинская зона гранулитов.

1.93–1.85 млрд лет (Bibikova et al., 2001; Скублов и др., 2016; Слабунов и др., 2016).

По нашим данным раннепротерозойский метаморфизм в данном районе представлял неоднородное событие (Козловский и др., 2020). Он был связан со становлением разновозрастных и разноориентированных зон расщепления, разгнейсования и пластического течения. Формирование ранних крутопадающих зон пластических деформаций северо-восточного простирания сопровождалось относительно высокотемпературным метаморфизмом, достигавшем на пике 10.3–13.8 кбар. Более поздние пологозалегающие зоны субширотного про-

стирания формировались в диапазоне 8.8–11.9 кбар (Козловский и др., 2021).

К телам метабазитов, а также к их контактам с гнейсами приурочены кварцевые и карбонатно-силикатные жилы, минеральный состав которых впервые описан В.И. Лебедевым (1950). Мощность жил варьирует от первых сантиметров до первых метров, а простирание прослеживается до десятков метров (Лебедев, 1950). Главными жильными минералами являются полевые шпаты, кварц, карбонаты и хлорит. В варьирующих количествах присутствуют турмалин, минералы титана (ильменит, сфен, рутил, анатаз), эпидот, скапо-

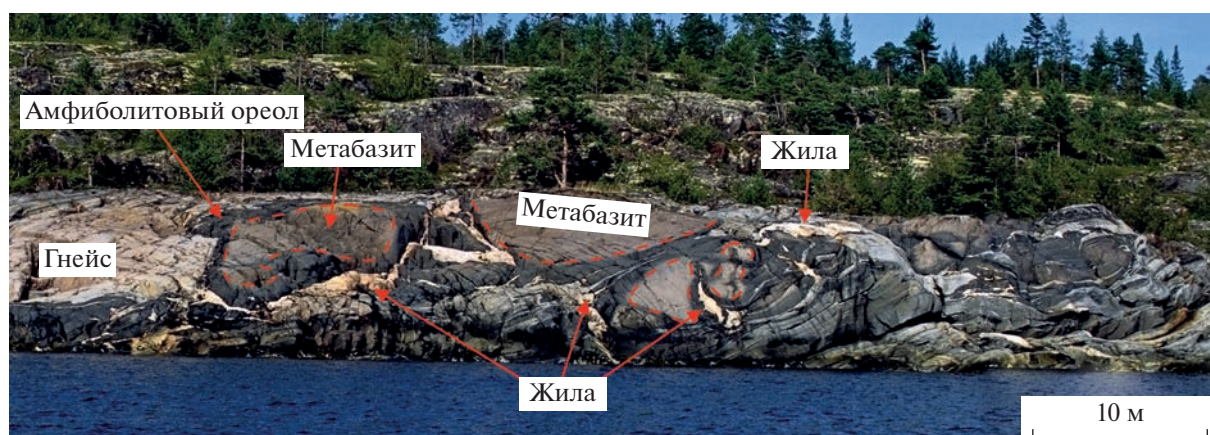


Рис. 2. Секущие и межбудинные карбонатно-силикатные и кварцевые жилы, разделяющие крупные будины эклогитизированных гранатовых метагббро в наиболее поздней пологозалегающей зоне пластических деформаций. По метабазитам на контакте с гнейсами и жилами развиваются амфиболитовые ореолы (наиболее темные). Остров Кемлудский, южный берег.

лит, апатит, слюды (биотит, мусковит), амфиболы, а также сульфиды железа, меди и молибдена (Лебедев, 1950; Никитин, 1960; Смирнова, Солодка, 1960). Со времен работ В.И. Лебедева (1950) и Ю.В. Никитина (1960) карбонатно-силикатные жилы подробно не изучались, несмотря на развитие медной и молибденовой сульфидной минерализации, а также наличие старинных горных выработок (Смирнова, Солодка, 1960).

Повсеместно в краевой зоне метабазитов на контакте с вмещающими гнейсами развиты ореолы амфиболитизации мощностью 0.5–1 м (рис. 2) (Березин, Скублов, 2014; Козловский и др., 2020). Указанные авторы также отмечают амфиболитизацию метабазитов в экзоконтакте карбонатно-силикатных жил в виде ореолов мощностью до 0.5 м. В околожилных амфиболитовых ореолах проявлено неравномерное наложение биотита, карбонатов, хлорита, реже сульфидов (Лебедев, 1950; Березин и др., 2020). Возрастная оценка циркона из амфиболитового ореола по метабазитам у контакта с гнейсами составила 1871 ± 19 млн лет (U-Pb метод, Березин, Скублов, 2014). Для карбонатно-силикатных жил имеется возрастная оценка по рутилу — 1814 ± 36 млн лет (U-Pb метод, Козловский и др., 2020).

СТРОЕНИЕ ЖИЛ И ГЛАВНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

Нами были изучены карбонатно-силикатные жилы на островах и побережье заливов восточной части Северной Карелии (губы Чупа, Медвежья, Кив и Красная) (рис. 1). В зависимости от соотношения главных минералов жилы могут варьировать по составу от кварцевых, кварц-карбонатных до кварц-плаггиоклазовых и карбонат-кварц-плаггиоклазовых. Жилы представляют собой наи-

более поздние докембрийские геологические образования, известные в этом районе, так как имеют отчетливое секущее положение по отношению к будинам раннепротерозойских метабазитов в зонах пластических деформаций. Карбонатно-силикатные жилы пространственно связаны с телами метабазитов и лишь в единичных случаях выходят за пределы метабазитов во вмещающие гнейсы. В ряде случаев встречаются межбудинные жилы, разделяющие две и более базитовые будины (рис. 2). В достаточно крупных обнажениях удалось показать, что жилы имеют преимущественно крутое падение и развиты поперек удлинения линзовидных и дайкообразных тел метабазитов (рис. 3а). Некоторые карбонатно-силикатные жилы приурочены к контакту метабазитов и мигматизированных гнейсов (рис. 3б). Жилы линейно вытянуты, иногда с изгибами и апофизмами (рис. 3в). Встречаются линзовидные, пламевидные в плане формы (рис. 3г, 3д). Мощность жил существенно варьирует, в том числе в виде появления крупных раздувов. Жилы могут прослеживаться по простиранию, образуя пережимы, разветвления и кулисообразные структуры (рис. 3е). Нередко в жилах встречаются ксенолиты вмещающих пород в виде отдельных угловатых, вытянутых и изометричных фрагментов (рис. 3д). Наблюдается развитие оперяющих прожилков в местах выклинивания (рис. 3в, 3г).

Структура жил доходит до гигантокристаллической: кристаллы карбоната, турмалина и биотита достигают размеров 5–20 см (рис. 4а, 4б). В одной из жил на Андроновых о-вах к юго-западу от о-ва Сидоров (рис. 1) наблюдаются пегматоидные сращения кварца, биотита и карбоната (рис. 4б). Во многих случаях проявлено зональное строение жил в виде закономерного развития плаггиоклазовых (альбит–олигоклаз) и кварц-плаггиоклазовых

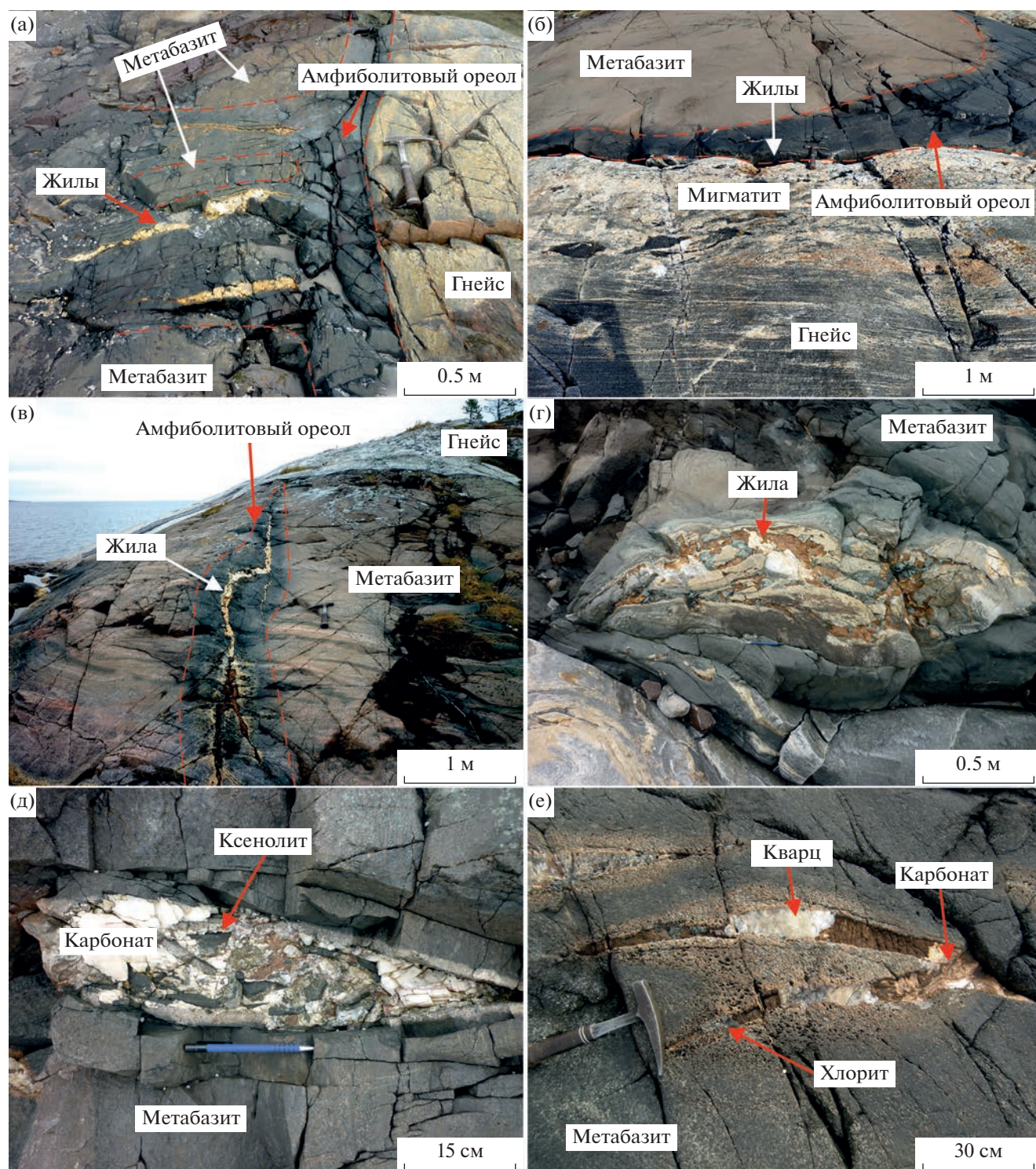


Рис. 3. Взаимоотношения карбонатно-силикатных жил с вмещающими породами: (а) карбонатные и карбонат-кварц-плагиоклазовые прожилки, залегающие поперек удлинения дайкообразного тела метабазита на о-ве Кедровый; (б) кварц-карбонатные прожилки на контакте метабазитов и мигматитов на о-ве Сидоров; (в) карбонат-кварц-плагиоклазовая жила с турмалином и хлоритом линейно вытянутой формы с изгибами и апофизами на о-ве Кедровый; (г) карбонат-кварц-плагиоклазовая жила с турмалином и хлоритом пламевидной формы на южном берегу Красной губы; (д) линзовидная карбонатная жила с ксенолитами вмещающих пород на южном берегу Красной губы; (е) кулисообразные кварц-карбонатные прожилки на южном берегу Красной губы.

внешних зон, местами с биотитом, и кварцевых/кварц-карбонатных осевых зон (рис. 4в–4д). В других случаях кварц-плагиоклазовые агрегаты рассекаются агрегатами карбонатов (рис. 4е, 5а). Карбонаты (кальцит, доломит–анкерит) образуют крупные идиоморфные и мелкие ксеноморфные кристаллы. Турмалин (шерл–дравит) образует вытянутые до 10–15 см, хаотично ориентированные идиоморфные кристаллы, в поперечном разрезе до 5 см, и преимущественно развивается в эндоконтактовых зонах или в местах выклинивания жил. Биотит образует крупные (до 20 см) кристаллы в сростках с плагиоклазом, турмалином и карбонатами. Хлорит (шамозит–клинохлор) образует прожилки и радиально-лучистые агрегаты в эндоконтакте жил, а также псевдоморфозы по биотиту. Сульфидная Fe–Cu минерализация (борнит, халькопирит, пирит, пирротин, марказит) развита в жилах преимущественно кварцевого и кварц-плагиоклазового состава. Гнезда и прожилки сульфидов рассекают кварц-плагиоклазовые и кварцевые агрегаты. По Fe–Cu сульфидам локально развиты вторичные халькозин, ковеллин, гематит и атакамит.

Формирование жил происходило в процессе хрупких деформаций вмещающих метабазитов с многократным растрескиванием, на что указывает развитие оперяющих прожилков в местах выклинивания и наличие ксенолитов вмещающих пород, согласно (Bons et al., 2012). Внутренняя структура жил позволяет предполагать закономерные переходы от кварц-плагиоклазовых к карбонатсодержащим ассоциациям. Сульфидная минерализация формировалась на поздних стадиях эволюции жил.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Гнейсы, как правило, слагают матрикс тектонического меланжа, в котором заключены тела гранепротерозойских метабазитов (рис. 2). Наименее деформированные и мигматизированные разновидности гнейсов представляют собой однородные породы гранат-биотитового, гранат-биотит-амфиболового и амфибол-биотитового состава; доминируют плагиогнейсы. В них отчетливо проявлена гнейсовидная текстура, ориентировка которой в большинстве обнажений соответствует направлению пластического течения. Вблизи контактов с будинами базитов, в гнейсах наблюдается переориентирование гнейсовидности конформно контактам будин. В местах наиболее интенсивного проявления пластических деформаций в гнейсах формируется характерная текстура “прямого гнейса”, которая стирает все сложноскладчатые пликативные формы. Гнейсы интенсивно мигматизированы. Мигматитовые прожилки крупно- и гигантозернистых структур, мощностью от 2 до 40–50 см, залегают, как пра-

вило, согласно с гнейсовидностью. Вблизи контакта с мигматитовыми прожилками в гнейсах может незначительно повышаться содержание микроклина.

Составы минералов гнейсов, как правило, очень однородны в пределах одного обнажения. Биотиты обычно умеренно-железистые $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) = 41\text{--}53$ мол. %. Амфиболы в большинстве отвечают паргаситу, реже встречаются эдениты, по составу пограничные с паргаситом, $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) = 42\text{--}44$ мол. %. Гранаты имеют существенно альмандиновый состав, мольная доля пирропа составляет 0.14–0.19, а мольная доляgrossуляра – 0.12–0.20; зональность для гнейсовых гранатов не характерна. В плагиоклазах, как и в гранатах, зональность не проявлена или выражена слабо. Состав плагиоклазов отвечает андезину или олигоклазу ($\text{An}_{29\text{--}36}$) (Козловский и др., 2020).

Метабазиты, представленные метаморфизованными породами комплексов габбро-анортозитов, габбро-норитов и габбро, сложены амфиболом, гранатом, плагиоклазом и клинопироксеном. Магматическая ассоциация лучше всего сохранилась в породах комплекса габбро-норитов; в ее состав входят оливин, ортопироксен, клинопироксен и основной плагиоклаз ($\text{An}_{47\text{--}55}$). В этих породах регулярно отмечаются внутренние короны, представляющие собой шестоватый агрегат клинопироксена, развивающийся вокруг оливина; гранат в строении таких корон не участвует, а плагиоклаз при их формировании не меняет свой состав. Такие короны, вероятно, были сформированы на магматическом этапе в результате перитектической реакции оливина с расплавом. В гранатовых метагаббро редко отмечались единичные находки магматических клино- и ортопироксена и основного плагиоклаза ($\text{An}_{49\text{--}67}$); в габбро-анортозитах магматическая ассоциация не обнаружена.

Метаморфическая ассоциация в породах этих комплексов однотипна; пику метаморфизма отвечает гранат-омфацитовая (иногда с плагиоклазом) ассоциация эклогитов и эклогитоподобных пород. Гранат обычно начинает развиваться в виде внешних корон на контакте пироксенов и плагиоклаза. В наиболее магнезиальных породах – метагаббро-норитах – высокобарные преобразования заканчиваются на этом уровне коронарной эклогитизации с многочисленными реликтами первичного плагиоклаза и клинопироксена в центральных частях зерен. В более железистых породах – преимущественно гранатовых метагаббро – степень преобразования пород при высокобарном метаморфизме практически полная; реликтов магматических минералов не остается. Для таких пород характерна однородная гранобластовая или порфиробластовая структура (благодаря крупным выделениям граната). Составы минералов, входящих в высокобарную ассоциацию, как пра-

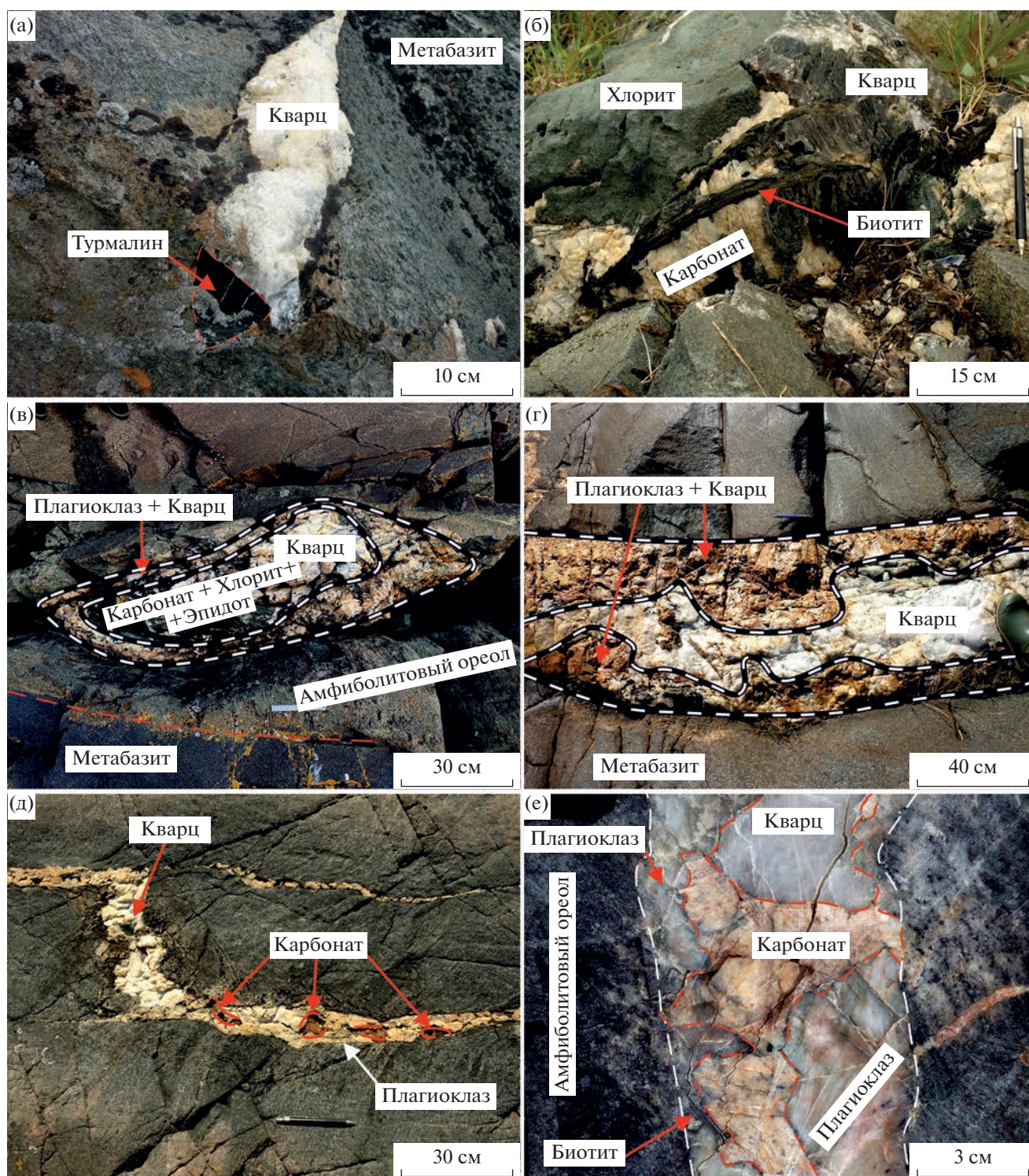


Рис. 4. Внутреннее строение карбонатно-силикатных жил: (а) крупнокристаллическая кварц-турмалиновая жила на южном берегу Красной губы; (б) кварц-карбонатная жила с крупными кристаллами карбоната и биотита на Андроновых о-вах; (в) зональная карбонат-кварц-плагинклавовая жила с хлоритом и эпидотом на о-ве Сидоров; (г) зональная кварц-плагинклавовая жила на о-ве Мендов; (д) карбонат-кварц-плагинклавовая жила с развитием карбоната в осевой зоне, о. Кедровый; (е) взаимоотношение карбоната с плагинклавом и кварцем в карбонат-кварц-плагинклавовой жиле на о-ве Кедровый (поперечный спил жилы).

вило, зависят от валового состава протопороды (преимущественно — от ее железистости). Обычно доля жадеитового минала в клинопироксенах не велика и составляет 17–31 мол. % в метабазах всех комплексов. Это соответствует омфациту или Na-авгиту. Железистость клинопироксенов ($f = \text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$) изменяется от $f = 16$ –21 мол. % в магнезиальных габбро-норитах до $f = 27$ –37 мол. % в железистых гранатовых метагаббро. Гранат в габбро-норитах также более магнезиальный $Prp = 32$ –34 мол. % и менее кальциевый $Grss = 14$ –16 мол. %, чем в гранатовых метагаббро — $Prp = 15$ –24 мол. % и $Grss = 21$ –27 мол. %. Плагноклаз, отвечающий пику метаморфизма метабазов, существенно более кислый, чем реликтовый магматический. Его состав в метабазах разных комплексов варьирует от An_{30-33} в габбро-норитах до An_{19-31} в гранатовых метагаббро (Козловский, 2021).

Амфиболиты, развивающиеся по метабазам, приурочены к двум типам контактовых зон: (1) контакты с гнейсами, (2) экзоконтактовые зоны карбонатно-силикатных жил. В обоих типах проявлений амфиболиты представлены ореолами мощностью до 0.5–1 м. В некоторых случаях, когда карбонатно-силикатные жилы приближаются к контакту метабазов и гнейсов, амфиболитовые зоны у контакта с гнейсами непосредственно переходят в околожильные ореолы (рис. 3а). Амфиболиты на контакте с гнейсами и в околожильных ореолах имеют принципиальное петрографическое сходство. В настоящей работе мы изучали околожильные амфиболиты, тогда как описание и результаты изучения амфиболитов на контакте с гнейсами можно найти в предшествующих работах (Березин, Скублов, 2014; Березин и др., 2020; Козловский и др., 2020, 2021). Амфиболиты состоят из амфибола ферропаргаситового состава (30–50% объема), плагноклаза (олигоклаз, реже альбит) (15–30% объема), биотита (до 50% объема) и кварца (5–10% объема). Амфибол (рис. 5б–5е) образует короткопризматические однородные идиоморфные кристаллы размером от 0.1 до 2 мм; часто содержит включения кварца округлой формы (рис. 5а, 5б) размером до первых десятых миллиметра. Плагноклаз (An_{19-30}) (рис. 5б–5е) образует таблитчатые зерна размером от 0.1 до 2 мм. В некоторых образцах наблюдается локальное развитие альбита по олигоклазу вдоль контактов с амфиболом (рис. 5г). Характерно развитие агрегатов биотита в виде крупных (до 2 мм) чешуй, в том числе частично замещающих амфибол (рис. 5д). Также могут встречаться: апатит, гранат (альмандин–гроссуляр), ильменит, циркон, рутил. На о-ве Медянка в околожильных амфиболитах присутствует эпидот (10% объема), представленный идиоморфными и гипидиоморфными вытянутыми кристаллами размером от 0.1 до 0.5 мм (рис. 5е).

В отличие от амфиболитов, развитых на контакте с гнейсами, в околожильных амфиболитах наблюдается локальное наложение поздних агрегатов хлорита, карбоната и сульфидов железа и меди. Хлорит (рис. 5е) имеет шамозит-клинохлоровый состав и образует радиально-лучистые слоистые агрегаты или крупные вытянутые кристаллы размером от 0.1 до нескольких миллиметров. Замещает амфибол и биотит. Может содержать включения акцессорных рутила, ильменита, циркона и алланита. Карбонаты (кальцит и доломит–анкерит) образуют ксеноморфные и изометричные зерна, а также прожилки мощностью до 2 мм, иногда с включениями ферропаргасита и плагноклаза. Сульфиды встречаются редко и представлены в основном халькопиритом и борнитом. В единичных случаях сульфиды могут слагать до 5% объема (о. Медянка). При этом халькопирит и борнит проявлены в виде ксеноморфных зерен или прожилков в сростаниях с хлоритом (рис. 5е). Борнит частично замещается халькозином и гематитом.

ОЦЕНКИ P - T УСЛОВИЙ

P - T условия формирования амфиболитов на контактах с гнейсами были изучены ранее (Березин, Скублов, 2014; Козловский и др., 2020). В настоящей работе расчеты P - T условий для околожильных амфиболитов проводились методом построения линий моновариантных равновесий в координатах P – T (метод TWQ; рис. 6). Ассоциация гранат + кварц + олигоклаз + амфибол показывает значения 550–650°C и 4.3–5.2 кбар (рис. 6а). Ассоциация кварц + олигоклаз + амфибол отвечает условиям 480–690°C и 4–5.2 кбар (рис. 6б). Эта же ассоциация во включениях в карбонатах из зоны карбонатизации и хлоритизации показывает близкие условия: 580–650°C и 3.8–4.5 кбар (рис. 6в). В образце КИШ-13 в ассоциации кварц + плагноклаз + амфибол плагноклаз (An_{19-30}) частично замещается альбитом. P - T условия, рассчитанные по равновесию с альбитом, соответствуют 550–590°C и ~2.5 кбар (рис. 6г). Большинство изученных минеральных ассоциаций показали удовлетворительное пересечение линий равновесий. Вместе с тем ассоциация кварц + олигоклаз + амфибол показывает заметный разброс пересечения линий моновариантных равновесий (рис. 6б). Дополнительные оценки температур выполнены по амфибол-плагноклазовому термометру (Holland, Blundy, 1994) для околожильных амфиболитовых ореолов и составляют от 590 до 710°C при 2–5 кбар. Составы амфибола, плагноклаза и граната представлены в табл. 1, 2 и 3 соответственно.

В жилах распределение составов сосуществующих кальцитов и доломит–анкеритов в системе MgCO_3 – CaCO_3 – FeCO_3 показало, что максимальная температура образования карбонатной ассоциации жил составляла 540°C. Во внимание прини-

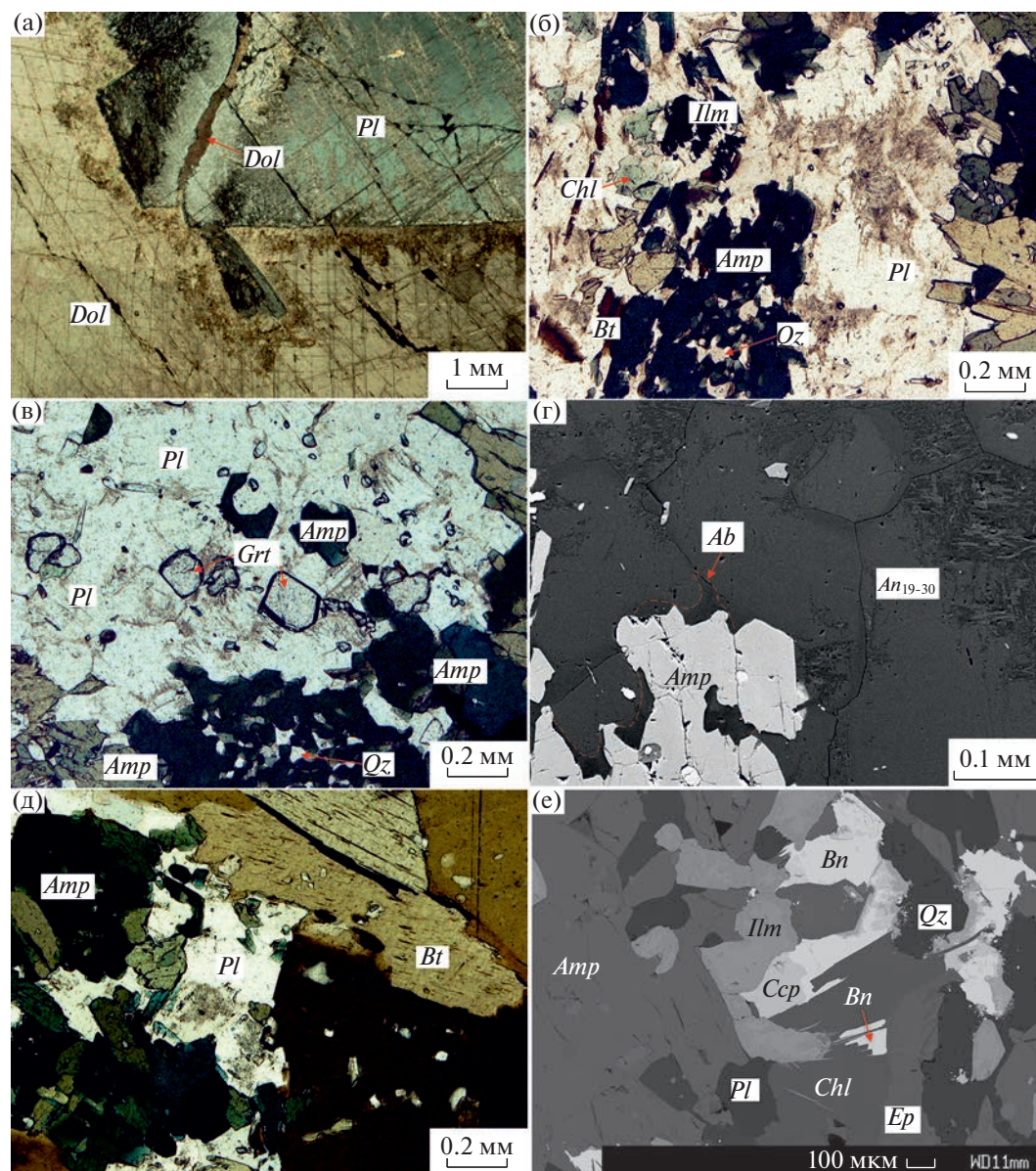


Рис. 5. Петрографические особенности карбонатно-силикатных жил и околожильных амфиболитов: (а) взаимоотношения доломита и плагиоклаза в кварц-карбонат-плагиоклазовой жиле; (б) биотит-кварцевый амфиболит с редкими хлоритом, биотитом и ильменитом; (в) гранат-биотит-кварцевый амфиболит; (г) развитие альбита по олигоклазу на контакте с амфиболом в биотит-кварцевом амфиболите; (д) кварц-биотитовый амфиболит; (е) кварц-эпидотовый амфиболит с наложенными халькопирит-борнитовыми прожилками и хлоритом. (а), (б), (в), (д) — фотографии в проходящем плоско-поляризованном свете; (г), (е) — изображения в обратнорассеянных электронах. Здесь и далее аббревиатура минералов приведена по (Warr, 2021).

мались только составы кальцитов, сосуществующих с доломит–анкеритом и имеющих наибольшее содержание $MgCO_3$. Составы кальцитов и доломит–анкеритов представлены в табл. 4.

Температура образования хлорита в амфиболитах и карбонатно-силикатных жилах по (Cathelineau, Nieva, 1985) варьирует от 230 до 300°C, по А.Р Котельникову и др. (2012) — от 220 до 280°C, по (Bourdelle et al., 2013) — от 240 до 350°C. Последний термометр не учитывает содержание Fe^{3+}

и ограничен условиями не выше 350°C и 4 кбар. Составы хлоритов приведены в табл. 5.

Результаты расчетов TWQ, вместе с данными по карбонатному и хлоритовым термометрам суммированы в табл. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Амфиболитовые ореолы развиваются по метабазитам как на контакте с гнейсами и/или мигма-

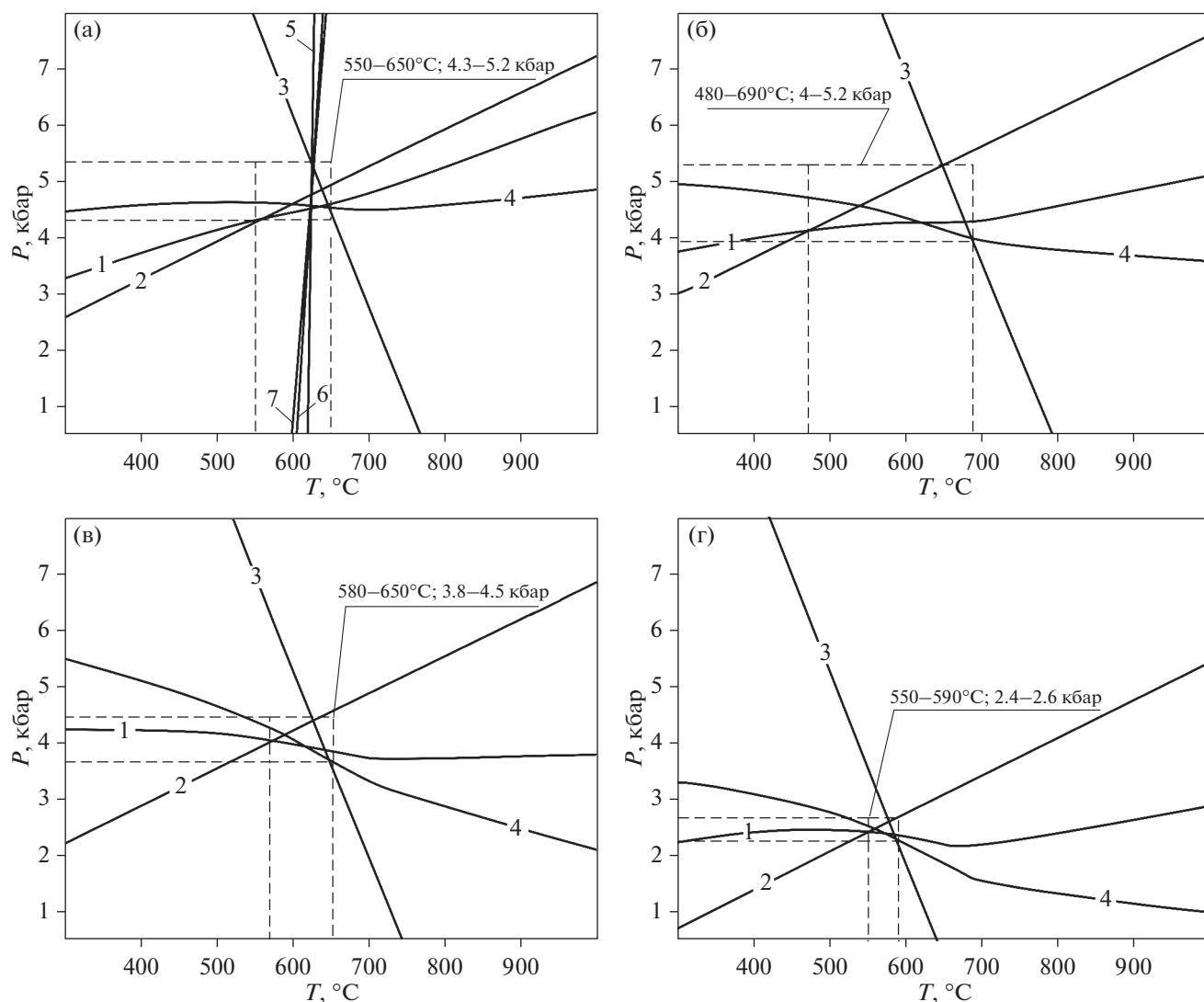


Рис. 6. Линии моновариантных равновесий для амфиболитовых ассоциаций из околожильных ореолов карбонатно-силикатных жил: (а) гранат-биотит-кварцевый амфиболит, обр. КИШ-28; (б) эпидот-кварцевый амфиболит, обр. КИШ-38; (в) включения амфибола и плагиоклаза в карбонате, обр. КР-32; (г) кварц-биотитовый амфиболит, обр. КИШ-13. Анализы минералов в указанных образцах см. в табл. 1–3. На диаграммах (а), (в) и (г) схождение линий моновариантных равновесий удовлетворительное, что говорит о равновесности соответствующих ассоциаций. На диаграмме (б) значительное расхождение пересечений линий, по-видимому, указывает на нарушение равновесности при наложении поздних ретроградных процессов. Номера линий равновесия: 1) $2Prg + 8\alpha Qz = 2Ab + Tr + Tsr$; 2) $3Prg + 4fTs = 4Tsr + 3fPrg$; 3) $4Tr + 5fPrg = 5Prg + 4fTr$; 4) $8\alpha Qz + 2fPrg = fTsr + fTr + 2Ab$; 5) $Ts + Alm = Prp + Fts$; 6) $3Prg + 4Alm = 4Prp + 3fPrg$; 7) $5Alm + 3Tr = 3fTr + 5Prp$.

титам, так и на контакте с карбонатно-силикатными жилами. Согласно наблюдениям А.В. Березина и С.Г. Скублова (2014), амфиболитовые ореолы по метабазитам образовались в результате воздействия кварцевых и кварц-полевошпатовых жил при 620°C и 2–2.5 кбар. В.М. Козловский и др. (2020) для амфиболитов по метабазитам привели широкий диапазон P - T параметров: 7.5–11 кбар и 590–740°C. Эти же авторы отмечают, что формирование амфиболитовых ореолов происходило в наиболее поздний для Беломорья раннепротерозойский ретроградный этап метаморфизма. Ранее

В.И. Лебедев (1950) предполагал, что амфиболитизация метабазитов на контакте с гнейсами и в экзоконтакте карбонатно-силикатных жил — единовременный процесс, связанный с гидротермальным воздействием мигматитов и пегматитов на метабазиты.

Полученные нами результаты показывают, что околожильные амфиболиты и амфиболиты на контакте с гнейсами обнаруживают петрографическое сходство и, в ряде случаев, имеют пространственные взаимные переходы (рис. 3а). Приведенные нами оценки температур для околожильных

Таблица 1. Состав амфиболов из околосильных амфиболитов

Компоненты	Обр. КИШ-13						Обр. КИШ-28					
SiO ₂	40.98	41.21	40.42	40.30	40.79	41.04	41.12	40.45	41.05	40.94	40.96	40.86
TiO ₂	0.56	0.60	0.62	0.79	0.59	0.76	0.89	0.90	0.95	0.82	1.02	1.00
Al ₂ O ₃	13.70	13.75	14.37	13.76	14.16	13.14	13.14	13.83	13.53	14.29	13.01	12.83
FeO	21.56	20.99	21.33	21.23	20.66	21.46	20.12	20.06	21.08	21.31	19.48	19.51
MnO	0.28	0.31	0.20	0.29	0.26	0.28	0.25	0.23	0.36	0.26	0.23	0.26
MgO	6.38	6.50	5.89	6.14	6.24	6.55	6.97	6.54	6.41	6.17	7.48	7.43
CaO	11.24	11.22	11.77	11.25	11.42	11.42	11.39	11.51	11.36	11.41	11.68	11.56
Na ₂ O	1.80	1.87	1.60	1.69	1.66	1.58	1.60	1.53	1.63	1.62	1.41	1.41
K ₂ O	0.70	0.62	0.73	0.96	0.67	0.88	0.95	1.15	0.87	0.93	1.11	1.13
F	0.18	0.16	0.11	0.18	0.10	0.17	0.23	0.15	0.07	0.11	0.26	0.20
Cl	0.18	0.17	0.23	0.21	0.19	0.20	0.06	0.06	0.12	0.17	0.01	0.04
Сумма	97.55	97.41	97.29	96.80	96.73	97.47	96.71	96.41	97.42	98.02	96.65	96.23
Si	6.25	6.29	6.20	6.22	6.26	6.28	6.31	6.24	6.27	6.22	6.28	6.29
Ti	0.06	0.07	0.07	0.09	0.07	0.09	0.10	0.10	0.11	0.09	0.12	0.12
Al	2.47	2.47	2.60	2.51	2.56	2.37	2.38	2.52	2.44	2.56	2.35	2.33
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.51	0.43	0.42	0.43	0.39	0.51	0.37	0.32	0.41	0.41	0.41	0.42
Fe ²⁺	2.24	2.25	2.32	2.32	2.26	2.24	2.21	2.28	2.28	2.30	2.09	2.10
Mn	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
Mg	1.45	1.48	1.35	1.41	1.43	1.49	1.60	1.51	1.46	1.40	1.71	1.71
Ca	1.84	1.83	1.93	1.86	1.88	1.87	1.87	1.90	1.86	1.86	1.92	1.91
Na	0.53	0.55	0.48	0.51	0.49	0.47	0.48	0.46	0.48	0.48	0.42	0.42
K	0.14	0.12	0.14	0.19	0.13	0.17	0.19	0.23	0.17	0.18	0.22	0.22
T, °C (Holland, Blundy, 1994)	630	610	600	620	590	640	670	660	680	670	690	690

Таблица 1. Окончание

Компоненты	Обр. КИШ-28			Обр. КИШ-38					Обр. КР-32			
SiO ₂	41.01	40.85	40.78	40.54	39.72	39.67	39.96	41.50	41.62	40.74	41.94	42.33
TiO ₂	1.05	0.75	0.79	0.68	1.10	1.11	0.94	0.49	0.80	0.38	0.98	0.74
Al ₂ O ₃	13.45	13.56	13.95	14.46	14.47	14.57	14.74	14.83	13.15	14.86	13.12	13.74
FeO	20.03	21.14	21.34	20.36	19.74	19.29	19.24	19.14	20.17	20.41	20.37	20.98
MnO	0.26	0.25	0.24	0.19	0.25	0.34	0.28	0.25	0.15	0.21	0.18	0.20
MgO	7.30	6.17	6.15	6.93	7.26	7.51	7.44	7.61	7.02	6.50	7.37	6.48
CaO	11.80	11.91	11.47	11.49	11.43	11.33	11.42	11.42	11.84	11.60	11.64	11.69
Na ₂ O	1.43	1.44	1.56	1.36	1.37	1.43	1.45	1.55	1.21	1.51	1.32	1.25
K ₂ O	1.22	0.58	0.84	0.84	1.01	1.19	1.09	0.57	0.95	0.42	0.70	0.87
F	0.12	0.13	0.15	0.06	0.07	0.01	0.09	0.05	0.18	0.09	0.05	0.13
Cl	0.02	0.20	0.15	0.09	0.08	0.05	0.06	0.07	0.19	0.25	0.20	0.19
Сумма	97.68	96.99	97.42	96.99	96.49	96.50	96.69	97.49	97.28	96.96	97.87	98.60
Si	6.23	6.27	6.24	6.16	6.07	6.05	6.08	6.22	6.34	6.20	6.32	6.37
Ti	0.12	0.09	0.09	0.08	0.13	0.13	0.11	0.06	0.09	0.04	0.11	0.08
Al	2.41	2.45	2.52	2.59	2.61	2.62	2.65	2.62	2.36	2.66	2.33	2.44
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.43	0.45	0.44	0.62	0.65	0.63	0.59	0.56	0.41	0.56	0.53	0.37
Fe ²⁺	2.11	2.27	2.29	1.97	1.87	1.84	1.86	1.84	2.16	2.04	2.04	2.27
Mn	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
Mg	1.65	1.41	1.40	1.57	1.65	1.71	1.69	1.70	1.59	1.47	1.66	1.45
Ca	1.92	1.96	1.88	1.87	1.87	1.85	1.86	1.83	1.93	1.89	1.88	1.88
Na	0.42	0.43	0.46	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.36	0.45	0.39	0.36
K	0.24	0.11	0.16	0.16	0.20	0.23	0.21	0.11	0.19	0.08	0.14	0.17
T, °C (Holland, Blundy, 1994)	700	680	670	680	710	710	690	660	660	650	690	630

Примечание. Формульные коэффициенты рассчитаны по (Leake et al., 1997), Fe²⁺ и Fe³⁺ – по (Holland, Blundy, 1994).

Таблица 2. Состав плагиоклаза из околожильных амфиболитов

Компо- ненты	Обр. КИШ-13								Обр. КИШ-28							
	61.84	63.57	66.83	62.07	67.62	60.60	68.11	65.26	61.98	60.68	61.29	66.72	61.62	60.77	59.57	60.62
SiO ₂																
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	24.37	22.96	20.15	24.18	20.64	24.56	20.08	21.09	23.73	24.95	24.68	20.91	24.18	24.79	25.40	25.02
FeO	0.12	0.15	0.30	0.07	0.22	0.05	0.11	0.17	0.09	0.07	0.00	0.44	0.19	0.18	0.06	0.10
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
MgO	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
CaO	5.68	4.13	1.02	5.54	1.14	6.07	0.65	1.81	5.02	6.25	5.91	1.59	5.71	6.27	7.16	6.74
Na ₂ O	8.47	9.47	11.34	8.84	10.88	8.34	11.55	10.86	8.91	8.09	8.59	11.10	8.30	7.99	7.73	8.03
K ₂ O	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04
Сумма	100.57	100.33	99.69	100.76	100.54	99.73	100.57	99.25	99.79	100.08	100.53	100.82	100.06	100.04	99.96	100.59
Si	2.73	2.80	2.94	2.74	2.94	2.70	2.97	2.89	2.75	2.70	2.71	2.91	2.73	2.70	2.66	2.68
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.27	1.19	1.05	1.26	1.06	1.29	1.03	1.10	1.24	1.31	1.29	1.08	1.26	1.30	1.34	1.31
Fe	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.27	0.20	0.05	0.26	0.05	0.29	0.03	0.09	0.24	0.30	0.28	0.07	0.27	0.30	0.34	0.32
Na	0.72	0.81	0.97	0.76	0.92	0.72	0.97	0.93	0.77	0.70	0.74	0.94	0.71	0.69	0.67	0.69
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An#	0.27	0.19	0.05	0.26	0.05	0.29	0.03	0.08	0.24	0.30	0.27	0.07	0.27	0.30	0.34	0.32

Таблица 2. Окончание

Компоненты	Обр. КИШ-28	Обр. КР-32							Обр. КИШ-38						
SiO ₂	68.46	61.87	62.14	60.92	63.91	60.75	62.53	62.45	60.53	62.18	58.79	60.56	64.18	62.56	62.17
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	20.11	24.33	24.40	24.63	22.77	24.68	23.57	23.74	25.35	23.78	25.64	25.17	22.05	23.49	24.12
FeO	0.35	0.10	0.25	0.04	0.15	0.21	0.03	0.00	0.01	0.04	0.16	0.10	0.05	0.10	0.35
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
MgO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
CaO	0.85	6.22	5.95	6.56	4.31	6.45	5.27	5.23	6.61	5.42	7.63	6.93	3.63	5.17	4.13
Na ₂ O	11.41	8.44	8.58	8.09	9.32	8.22	8.74	8.69	7.75	8.36	7.15	7.59	9.43	8.50	8.10
K ₂ O	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06	0.08	0.08	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.99
Сумма	101.21	101.02	101.42	100.31	100.52	100.38	100.22	100.21	100.31	99.84	99.48	100.44	99.41	99.91	99.96
Si	2.96	2.72	2.73	2.70	2.81	2.70	2.76	2.76	2.68	2.76	2.64	2.68	2.85	2.77	2.76
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.03	1.26	1.26	1.29	1.18	1.29	1.23	1.24	1.32	1.24	1.36	1.31	1.15	1.23	1.26
Fe	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Ca	0.04	0.29	0.28	0.31	0.20	0.31	0.25	0.25	0.31	0.26	0.37	0.33	0.17	0.25	0.20
Na	0.96	0.72	0.73	0.70	0.79	0.71	0.75	0.74	0.67	0.72	0.62	0.65	0.81	0.73	0.70
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
An#	0.04	0.29	0.28	0.31	0.20	0.30	0.25	0.25	0.32	0.26	0.37	0.34	0.18	0.25	0.22

Примечание. Формульные коэффициенты пересчитаны на 8O²⁻.

Таблица 3. Состав граната из околожильных амфиболитов

Компоненты	КИШ-28					
SiO ₂	37.26	37.62	38.13	37.65	37.52	37.45
TiO ₂	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04
Al ₂ O ₃	21.07	20.92	21.23	20.74	21.15	20.84
FeO	27.07	25.05	28.41	28.18	27.25	25.13
MnO	2.70	2.94	0.49	0.82	2.10	4.20
MgO	1.87	1.49	2.91	2.29	1.86	1.19
CaO	10.50	11.91	9.88	10.89	10.64	11.21
Сумма	100.51	99.94	101.07	100.58	100.54	100.07
Si	2.96	2.99	2.99	2.98	2.97	2.99
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.97	1.96	1.96	1.93	1.97	1.96
Fe ³⁺	0.06	0.04	0.04	0.07	0.04	0.04
Fe ²⁺	1.74	1.63	1.82	1.79	1.76	1.63
Mn	0.18	0.20	0.03	0.05	0.14	0.28
Mg	0.22	0.18	0.34	0.27	0.22	0.14
Ca	0.89	1.02	0.83	0.92	0.90	0.96
<i>Prp</i> , %	7.47	5.91	11.38	9.05	7.38	4.74
<i>Alm</i> , %	56.19	53.54	59.76	58.12	57.47	53.70
<i>Sps</i> , %	6.14	6.61	1.09	1.84	4.75	9.49
<i>Andr</i> , %	2.84	1.96	2.17	3.78	2.16	2.10
<i>Grs</i> , %	27.36	31.98	25.60	27.21	28.23	29.97

Примечание. Формульные коэффициенты пересчитаны на 12O²⁻ и на 8 катионов.

амфиболитов (550–720°C, 2.5–5 кбар) значительно перекрываются с аналогичными оценками других авторов для амфиболитовых ореолов на контакте с гнейсами (620°C, 2–2.5 кбар, Березин, Скублов, 2014; 590–740°C, 7.5–11 кбар, Козловский и др., 2020). Кроме того возрастные оценки амфиболитовых ореолов по метабазитам на контакте с гнейсами в 1871 ± 19 млн лет (Березин, Скублов, 2014) и карбонатно-силикатных жил в 1814 ± 36 млн лет (Козловский и др., 2020) близки. Все это подтверждает предположение В.И. Лебедева (1950) о приуроченности жил и амфиболитовых ореолов к единому метаморфическому событию. Вместе с тем представления В.И. Лебедева о связи мигматизации гнейсов с этим же событием не находят прямых подтверждений. По-видимому, гидротермальные флюиды, связанные с рассматриваемым жильобразованием, имели метаморфическую природу.

Полученные оценки давления при формировании карбонатно-силикатных жил оказались значимо ниже, чем проведенные нами ранее оценки условий становления крутопадающих (10.3–13.8 кбар) и пологих (8.8–11.9 кбар) зон пластического течения в БПП (Козловский и др., 2020). Это указывает на то, что жильобразование, вероятно, наиболее позднее событие в раннепро-

терозойской истории БПП, связано с ретроградной декомпрессией и остыванием при выведении пород комплекса на уровень верхней коры. Разница в оценках давления по предшествующим работам – 2–2.5 кбар (Березин, Скублов, 2014) и 7.5–11 кбар (Козловский и др., 2020), предположительно, может быть связана с неравномерностью выведения различных доменов БПП на более высокий уровень. В результате на одном уровне оказались совмещены фрагменты БПП, амфиболизация которых началась и проходила на разной глубине.

Общая последовательность образования карбонатно-силикатных жил предполагается в следующем виде. Ранняя стадия – формирование кварц-плагноклазовой ассоциации жил и амфиболитовых ореолов по гранатосодержащим метабазитам в наиболее высокотемпературных условиях. Значительное расхождение пересечений линий моновариантных равновесий на рис. 6б, по-видимому, указывает на нарушение равновесности при наложении поздних ретроградных процессов. Поэтому наиболее достоверными оценками температур ранней стадии следует считать 550–650°C (рис. 6, табл. 6). Поздняя стадия связана с дальнейшим растрескиванием жил и кристалли-

Таблица 4. Составы карбонатов из карбонатно-силикатных жил

Компоненты	Обр. КР-19а						Обр. КИШ-19	
	Кальцит	Доломит	Кальцит	Доломит	Кальцит	Доломит	Кальцит	Доломит
MgO	0.38	19.33	1.16	22.25	0.62	17.83	0.90	17.26
FeO	0.49	2.00	0.39	0.18	0.77	6.62	0.98	5.99
CaO	54.26	29.03	51.60	29.55	53.71	28.51	52.74	28.82
MnO	1.09	3.21	0.83	0.80	2.64	0.42	0.59	0.83
CO ₂ (расч.)	43.98	47.10	42.51	48.09	44.94	46.16	43.32	45.65
Сумма	100.20	100.67	96.48	100.87	102.67	99.54	98.52	98.54
MgCO ₃	0.95	44.81	2.97	50.52	1.51	42.17	2.26	41.29
FeCO ₃	0.68	2.59	0.56	0.23	1.05	8.79	1.38	8.04
CaCO ₃	96.84	48.37	95.26	48.22	93.80	48.48	95.53	49.54
MnCO ₃	1.53	4.23	1.21	1.03	3.64	0.56	0.84	1.13
T, °C (Anovitz, Essene, 1987)	170		440		320		400	

Компоненты	Обр. КР-21							
	Кальцит	Доломит	Кальцит	Доломит	Кальцит	Доломит	Кальцит	Доломит
MgO	0.50	18.78	0.76	18.47	2.21	18.98	1.99	18.56
FeO	0.13	1.41	0.17	1.49	0.32	4.66	0.84	5.98
CaO	54.45	29.90	54.52	29.79	53.40	28.73	52.57	28.69
MnO	2.13	3.79	2.96	4.14	0.76	0.22	0.32	0.24
CO ₂ (расч.)	44.68	47.19	45.56	47.03	44.98	47.41	44.14	46.60
Сумма	101.89	101.06	103.98	100.92	101.66	100.00	99.85	100.08
MgCO ₃	1.22	43.47	1.83	42.88	5.36	44.80	4.92	43.49
FeCO ₃	0.18	1.83	0.23	1.94	0.43	6.17	1.16	7.87
CaCO ₃	95.65	49.73	93.91	49.71	93.17	48.74	93.47	48.32
MnCO ₃	2.95	4.98	4.03	5.47	1.04	0.29	0.46	0.32
T, °C (Anovitz, Essene, 1987)	240		340		540		530	

зацией крупно- и гигантозернистых кварц-карбонатных агрегатов ($\pm$ биотит) при температурах около 540°C и ниже (оценки по кальцит-доломитовому термометру). Растрескивание могло происходить как по оси жил, так и отклоняться от нее, образуя оперяющие кварц-карбонатные прожилки и апофизы, а также захватывая ксенолиты вмещающих пород (рис. 3в–3е). Дальнейшая эволюция жил на поздней стадии связана с формированием более мелкозернистых хлорит-кварц-карбонатных агрегатов и локальным наложением хлоритизации и карбонатизации в амфиболитовых ореолах при 350–220°C (оценки по хлоритовым термометрам). С наиболее низкотемпературной кварц-хлоритовой ассоциацией была связана сульфидная минерализация.

Таким образом, образование карбонатно-силикатных жил и амфиболитов по метабазитам, по-

видимому, происходило в результате инфильтрации метаморфических флюидов по трещинам в метабазитах, а также вдоль контакта метабазитов и гнейсов в период наиболее позднего ретроградного этапа метаморфизма в раннем протерозое.

Закономерная локализация изученных карбонатно-силикатных жил в метабазитовых телах характерна также для кварц-полевошпат-карбонатных жил Гренвильского орогена Северо-Американской платформы (Карриза Маунтинс, США), где хлоритизированные и наиболее богатые сульфидами железа и меди жилы приурочены к наиболее основным вмещающим породам (Loidolt, 1970). Такая закономерность объяснима эффектом кислотно-основного взаимодействия (Коржинский, 1994). Согласно этому эффекту, метаморфические флюиды соответствующего этапа регионального метаморфизма гнейсовой толщи,

Таблица 5. Состав хлорита из карбонатно-силикатных жил и околожилых амфиболитов

Компоненты	Обр. КИШ-13						Обр. КИШ-28						Обр. КР-32					
	25.81	25.58	25.25	25.11	25.49	25.30	25.54	25.58	25.56	25.33	25.26	25.52	25.39	25.31	25.49	25.81	25.58	25.56
SiO ₂	25.81	25.58	25.25	25.11	25.49	25.30	25.54	25.58	25.56	25.33	25.26	25.52	25.39	25.31	25.49	25.81	25.58	25.56
TiO ₂	0.11	0.11	0.08	0.05	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.06	0.06	0.05	0.07	0.11	0.11	0.11
Al ₂ O ₃	20.88	21.10	20.94	20.60	20.98	20.67	21.07	21.55	21.81	21.68	22.01	21.92	21.57	21.78	21.95	20.88	21.10	21.10
FeO	26.42	26.30	26.74	26.09	27.42	26.49	26.65	25.74	23.81	25.39	25.04	24.96	25.12	25.64	25.10	26.42	26.30	26.30
MnO	0.26	0.25	0.23	0.23	0.27	0.21	0.20	0.07	0.07	0.06	0.03	0.04	0.10	0.11	0.11	0.26	0.25	0.25
MgO	14.18	14.30	13.40	13.40	13.40	13.37	13.57	14.25	15.51	14.41	14.29	14.75	14.41	14.50	14.84	14.18	14.30	14.30
CaO	0.00	0.01	0.01	0.03	0.07	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
Na ₂ O	0.00	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.04
K ₂ O	0.00	0.00	0.20	0.00	0.02	0.15	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.05	0.05
F	0.24	0.13	0.09	0.09	0.16	0.10	0.15	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.00	0.03	0.00	0.24	0.13	0.13
Cl	—	—	—	—	—	—	—	0.12	0.11	0.24	0.13	0.07	0.03	0.02	0.01	—	—	—
Сумма	87.90	87.82	86.94	85.62	87.91	86.43	87.31	87.47	87.00	87.24	86.88	87.43	86.74	87.46	87.63	87.90	87.82	87.82
Si	2.73	2.71	2.71	2.73	2.71	2.73	2.73	2.71	2.69	2.69	2.68	2.69	2.70	2.68	2.68	2.73	2.71	2.71
Ti	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe	2.34	2.33	2.40	2.37	2.44	2.39	2.38	2.28	2.10	2.25	2.22	2.20	2.23	2.27	2.21	2.34	2.33	2.33
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Mg	2.24	2.26	2.15	2.17	2.13	2.15	2.16	2.25	2.43	2.28	2.26	2.32	2.28	2.29	2.33	2.24	2.26	2.26
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ^{IV}	1.27	1.29	1.29	1.27	1.29	1.27	1.27	1.29	1.31	1.31	1.32	1.31	1.30	1.32	1.32	1.27	1.29	1.29
Al ^{VI}	1.34	1.34	1.36	1.37	1.35	1.36	1.38	1.40	1.40	1.40	1.44	1.41	1.40	1.39	1.40	1.34	1.34	1.34
T, °C (Cathelineau, Nieva, 1985)	290	290	290	290	290	290	290	290	300	300	300	300	290	300	300	290	290	290
T, °C (Котельников и др., 2012)	270	270	270	270	270	270	270	270	280	280	280	280	270	280	280	270	270	270
T, °C (Bourdelle et al., 2013)	290	350	290	250	310	260	250	250	270	270	240	260	250	310	290	290	350	350

Таблица 5. Окончание

Компоненты	Обр. КР-32						Обр. КИШ-38						Обр. МЕД-46	
	24.97	25.51	25.86	25.85	25.32	25.43	24.84	25.01	27.73	25.46	25.83	25.60	26.74	25.54
SiO ₂														
TiO ₂	0.03	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.16	0.08	0.09	0.05	0.09
Al ₂ O ₃	21.98	21.68	21.37	21.33	21.91	20.96	20.97	20.92	16.56	20.68	21.27	20.96	20.36	20.19
FeO	24.69	25.67	24.72	23.90	24.94	24.49	24.40	24.42	26.65	23.55	23.63	24.19	21.11	25.28
MnO	0.10	0.03	0.06	0.09	0.11	0.21	0.21	0.18	0.13	0.19	0.18	0.21	0.18	0.21
MgO	14.83	14.83	15.45	15.62	15.08	16.13	15.68	15.84	15.51	16.32	15.98	16.27	19.10	15.68
CaO	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.06	0.03	0.02	0.03	0.01
Na ₂ O	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
F	0.02	0.02	0.04	0.00	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.04
Cl	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02
Сумма	86.64	87.86	87.63	86.89	87.46	87.35	86.25	86.47	86.75	86.47	87.05	87.38	87.61	87.06
Si	2.65	2.68	2.71	2.72	2.67	2.68	2.66	2.67	2.98	2.70	2.72	2.69	2.75	2.72
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Fe	2.20	2.26	2.17	2.11	2.20	2.16	2.18	2.18	2.39	2.09	2.08	2.13	1.82	2.25
Mn	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	2.35	2.33	2.42	2.45	2.37	2.54	2.50	2.52	2.48	2.58	2.50	2.55	2.93	2.49
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ^{IV}	1.35	1.32	1.29	1.28	1.33	1.32	1.34	1.33	1.02	1.30	1.28	1.31	1.25	1.28
Al ^{VI}	1.41	1.37	1.36	1.37	1.39	1.29	1.30	1.29	1.07	1.29	1.35	1.29	1.23	1.25
T, °C (Cathelineau, Nieva, 1985)	300	300	290	290	300	300	300	300	240	290	290	300	280	290
T, °C (Котельников и др., 2012)	280	280	270	270	280	280	280	280	230	280	270	280	270	270
T, °C (Bourdelle et al., 2013)	330	340	300	270	350	240	250	250	300	240	310	250	240	240

Примечание. Формульные коэффициенты пересчитаны на 14O²⁻.

Таблица 6. Результаты оценок *P-T* условий формирования жил и околожилных изменений

Номер образца	Описание	<i>T</i> , °C	<i>P</i> , кбар	Методы
КИШ-28	Гранат-биотит-кварцевый амфиболит	550–650; 660–700	4.3–5.2 –	TWQ (Grt-Amp-Pl ₁₉₋₃₀ -Qz); Amp-Pl (Holland, Blundy, 1994)
КИШ-38	Эпидот-кварцевый амфиболит	480–690; 660–710	4–5.2 –	TWQ (Amp-Pl ₁₉₋₃₀ -Qz); Amp-Pl (Holland, Blundy, 1994)
КР-32	Включения амфибола и плагиоклаза в карбонате	580–650; 630–690	3.8–4.5 –	TWQ (Amp-Pl ₁₉₋₃₀ -Qz); Amp-Pl (Holland, Blundy, 1994)
КИШ-13	Кварц-биотитовый амфиболит	550–590; 590–640	~2.5	TWQ (Amp-Pl ₁₀₋₅ -Qz); Amp-Pl (Holland, Blundy, 1994)
КР-21	Крупные кристаллы карбоната из карбонатно-силикатной жилы	≤540	–	MgCO ₃ – CaCO ₃ – FeCO ₃ (Anovitz, Essene, 1987)
КИШ-19	Крупные кристаллы карбоната из карбонатно-силикатной жилы	≤400	–	MgCO ₃ –CaCO ₃ –FeCO ₃ (Anovitz, Essene, 1987)
КР-19а	Крупные кристаллы карбоната из карбонатно-силикатной жилы	≤320	–	MgCO ₃ –CaCO ₃ –FeCO ₃ (Anovitz, Essene, 1987)
КИШ-28	Наложенная хлоритизация на амфиболит	~290; ~270; 250–310	–	Al ^{IV} (Cathelineau, Nieva, 1985); Al ^{IV} (Котельников и др., 2012); (Bourdelle et al., 2013)
КИШ-38	Наложенная хлоритизация на амфиболит	240–300; 230–280; 240–310	–	Al ^{IV} (Cathelineau, Nieva, 1985); Al ^{IV} (Котельников и др., 2012); (Bourdelle et al., 2013)
КИШ-13	Наложенная хлоритизация на амфиболит	~290; ~270; 290–350	–	Al ^{IV} (Cathelineau, Nieva, 1985); Al ^{IV} (Котельников и др., 2012); (Bourdelle et al., 2013)
КР-32	Хлорит из карбонатно-силикатной жилы	290–300; 270–280; 250–350	–	Al ^{IV} (Cathelineau, Nieva, 1985); Al ^{IV} (Котельников и др., 2012); (Bourdelle et al., 2013)
МЕД-46	Наложенная хлоритизация на амфиболит	280–290; 270; 240	–	Al ^{IV} (Cathelineau, Nieva, 1985); Al ^{IV} (Котельников и др., 2012); (Bourdelle et al., 2013)

могли привести к локальному повышению активности оснований при инфильтрации через базитовые тела. Признаком локального повышения активности является кристаллизация карбонатов, отсутствующих во вмещающей толще гнейсов. Известно также, что взаимодействие флюидов с основными породами может приводить к осаждению рудных минералов (Коржинский, 1994). В нашем случае это отложение сульфидов меди и железа на наиболее поздних низкотемпературных стадиях жилобразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Формирование карбонатно-силикатных жил с амфиболитовыми ореолами приурочено к систе-

ме хрупких деформаций в метабазах и контактам метабазов с вмещающими гнейсами.

- Жилообразование и околожильная амфиболитизация, вероятно, связаны с воздействием метаморфических флюидов на наиболее позднем ретроградном этапе метаморфизма в раннем протерозое.

- Процесс жилообразования включал две главные стадии. На первой стадии развивалась кварц-плагиоклазовая ассоциация внешних зон совместно с образованием амфиболитовых ореолов по метабазам при 550–650°C и 2.5–5 кбар. На второй стадии формировалась кварц-карбонатная ассоциация ± биотит при 540°C и ниже с последующим развитием хлорит-кварц-карбонатных агрегатов и сульфидного оруденения в

жилах и околожилльных амфиболитовых ореолах в температурном интервале 350–220°C.

Благодарности. Авторы выражают признательность С.Е. Борисовскому и Е.В. Ковальчук (ИГЕМ РАН), выполнившим микрозондовые анализы минералов в ЦКП “ИГЕМ-Аналитика”. Авторы благодарны А.Л. Перчуку и анонимному рецензенту за конструктивные замечания к рукописи.

Источники финансирования. Работа проведена в рамках темы Государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балаганский В.В.* Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: ИГГД РАН, 2002. 32 с.
- Балаганский В.В., Глазнев В.Н., Осипенко Л.Г.* Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // Геотектоника. 1998. № 2. С. 16–28.
- Березин А.В., Скублов С.Г.* Эклогитоподобные апогabbровые породы Керетского архипелага (о-ва Сидоров и Большая Илейка, Белое море): особенности состава, условия и возраст метаморфизма // Петрология. 2014. Т. 22. № 3. С. 265–286.
- Березин А.В., Салимгараева Л.И., Скублов С.Г.* Эволюция состава минералов при эклогитовом метаморфизме в Беломорском подвижном поясе (на примере о-ва Виченная Луда) // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 85–107.
- Глебовицкий В.А., Смолькин В.Ф.* Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Козловский В.М.* Геология и метаморфизм метабазитов в зонах пластического течения Беломорского подвижного пояса северной Карелии. Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2021. 550 с.
- Козловский В.М., Аранович Л.Я.* Петрология и термобарометрия эклогитовых пород Красногубского дайкового поля, Беломорский подвижный пояс // Петрология. 2010. Т. 18. № 1. С. 29–52.
- Козловский В.М., Травин В.В., Саватенков В.М. и др.* Термобарометрия палеопротерозойских метаморфических событий центральной части Беломорского подвижного пояса, Северная Карелия // Петрология. 2020. Т. 28. № 2. С. 184–209.
- Козловский В.М., Травин В.В., Зигер Т.Ф. и др.* Статический и динамический метаморфизм базитов Беломорья (на примере массива Поньгома-Наволоки и его метаморфического обрамления) // Петрология и геодинамика геологических процессов. 2021. Т. 2. С. 28–31.
- Коржинский Д.С.* Кислотно-основное взаимодействие в минералообразующих системах // Теория процессов минералообразования: избранные труды. М.: Наука, 1994. 223 с.
- Косой Л.А.* Геолого-петрографический очерк Керетского района Северной Карелии // Ученые записки ЛГУ. 1938. № 26. С. 65–99.
- Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А. и др.* Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов // Вест. ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. С. 1–4.
- Лебедев В.И.* К минералогии кварцево-карбонатных жил Северной Карелии // Изв. Карело-финского филиала АН СССР. 1950. № 1. С. 3–36.
- Никитин Ю.В.* Молибденитовое оруденение в жилах Северной Карелии // Тр. Лаборатории геологии докембрия. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 9. С. 150–157.
- Скублов С.Г., Мельник А.Е., Марин Ю.Б. и др.* Новые данные о возрасте (U-Pb, Sm-Nd) метаморфизма и протолита эклогитоподобных пород района Красной губы, Беломорский пояс // Докл. АН. 2013. Т. 453. № 3. С. 319–325.
- Скублов С.Г., Березин А.В., Мельник А.Е. и др.* Возраст протолита эклогитов южной части Пезжострова, Беломорский пояс: протолит метабазитов как индикатор времени эклогитизации // Петрология. 2016. Т. 24. № 6. С. 640–653.
- Слабунов А.И.* Геология и геодинамика архейских подвижных поясов на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.
- Слабунов А.И., Азимов П.Я., Глебовицкий В.А. и др.* Архейская и палеопротерозойская мигматизации пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // Докл. АН. 2016. Т. 467. № 1. С. 71–71.
- Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А.* Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 650–677.
- Смирнова В.С., Солодкая Р.И.* Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Карельская лист Q-36XVI. Объяснительная записка. М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по геологии и охране недр, 1960. 60 с.
- Степанов В.С.* Основы магматизма докембрия западного Беломорья. Л.: Наука, 1981. 216 с.
- Степанова А.В., Степанов В.С., Ларионов А.Н. и др.* Габбро-анортозиты 2.5 млрд лет в Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология и тектоническая позиция // Петрология. 2017. Т. 25. № 6. С. 581–608.
- Шуркин К.А.* Материалы к геологии и петрографии габбро-лабрадоритов архея Северной Карелии / Под ред. К.А. Шуркина, В.Л. Дука, Ф.П. Митрофанова. Геология и абсолютный возраст докембрия Балтийского щита и Восточной Сибири. М.–Л., 1960. С. 120–149.
- Alm E., Sundblad K.* Sveconorwegian polymetallic quartz veins in Sweden // Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte. 1994. V. 1994. № 1. P. 1–22.
- Alm E., Broman C., Billström K. et al.* Fluid characteristics and genesis of early Neoproterozoic orogenic gold-quartz veins in the Harnas area, southwestern Sweden // Econom. Geol. 2003. V. 98. № 7. P. 1311–1328.
- Anovitz L.M., Essene E.J.* Phase equilibria in the system CaCO₃–MgCO₃–FeCO₃ // J. Petrol. 1987. V. 28. № 2. P. 389–415.

- Berman R.G.* Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ // *J. Petrol.* 1988. V. 29. P. 445–522.
- Berman R.G.* Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // *Canad. Mineral.* 1991. V. 29. P. 833–855.
- Bibikova E., Skiöld T., Bogdanova S. et al.* Titanite-rutile thermochronometry across the boundary between the Archean Craton in Karelia and the Belomorian Mobile Belt, eastern Baltic Shield // *Precamb. Res.* 2001. V. 105. № 2–4. P. 315–330.
- Bons P.D., Elburg M. A., Gomez-Rivas E.* A review of the formation of tectonic veins and their microstructures // *J. Structur. Geol.* 2012. V. 43. P. 33–62.
- Bourdelle F., Parra T., Chopin C., Beyssac O.* A new chlorite geothermometer for diagenetic to low-grade metamorphic conditions // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2013. V. 165. № 4. P. 723–735.
- Cathelineau M., Nieva D.* A chlorite solid solution geothermometer the Los Azufres (Mexico) geothermal system // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1985. V. 91. № 3. P. 235–244.
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Danyushevsky L.V., Gilbert S.* Minor and trace elements in bornite and associated Cu–(Fe)-sulfides: a LA-ICP-MS study Bornite mineral chemistry // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2011. V. 75. № 21. P. 6473–6496.
- Holland T., Blundy J.* Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1994. V. 116. № 4. P. 433–447.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S. et al.* Nomenclature of amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names // *Mineral. Mag.* 1997. V. 61. № 405. P. 295–310.
- Loidolt L.H.* Quartz-feldspar-carbonate bodies of the Carrizo Mountains, Texas. The University of Arizona, 1970. 126 p.
- Marsala A., Wagner T., Wälle M.* Late-metamorphic veins record deep ingress of meteoric water: a LA-ICP-MS fluid inclusion study from the fold-and-thrust belt of the Rhenish Massif, Germany // *Chem. Geol.* 2013. V. 351. P. 134–153.
- Raj R.M., Kumar S.N.* Characterisation of selected sulphides associated with the granitic pegmatites of Nagamalai-Pudukottai area, Madurai District, Tamil Nadu, India // *J. Applied Geochem.* 2015. V. 17. № 4. P. 444–450.
- Raj R.M., Kumar S.N.* Geothermobarometry of granitic pegmatites of Nagamalai-Pudukottai area, Madurai Block, South India // *Earth Sci. India.* 2018. V. 11. P. 168–182.
- Sankar D.B., Prasad K.S.S.* Petrology of Garimanipenta (copper mineralisation area), Nellore District, Andhra Pradesh, south India – A case study // *Int. J. Sci. Environment and Technology.* 2012. V. 1. № 4. P. 247–259.
- Stepanova A., Stepanov V.* Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // *Precamb. Res.* 2010. V. 183. № 3. P. 602–616.
- Stepanova A.V., Stepanov V.S., Larionov A.N. et al.* Relicts of paleoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2022. V. 518. № 1. P. 101–128.
- Warr L.N.* IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineral. Mag.* 2021. V. 85. № 3. P. 291–320.

Stages and Conditions of Formation of Carbonate-Silicate Veins and Near-Vein Aureoles in the Early Proterozoic Complexes of the Belomorian Mobile Belt, North Karelia

I. S. Volkov¹ and V. M. Kozlovskii¹

¹ *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

On the islands and the coast of the White Sea in North Karelia, the bodies of Early Proterozoic metamorphosed gabbroids are widely distributed in Archean gneiss. Carbonate-silicate veins with sulfide mineralization are confined to these bodies of metabasites, as well as to their contacts with gneiss. The main vein minerals are plagioclase, quartz, carbonates and chlorite. The stages of vein formation correspond to the transition from early quartz-plagioclase to late quartz-carbonate associations with chlorite and sulfides. The early (high-temperature) stage is fixed by the amphibolite aureoles around the vein with temperature estimates of about 550–650°C by the TWQ method. This stage corresponds to the quartz-plagioclase association of the marginal zones of the veins. The transition to the late stage with the formation of veined quartz-carbonate associations ($\pm$ biotite) occurred at temperatures of 540°C and lower, judging by the calcite-dolomite associations. Further development of quartz-chlorite-carbonate and sulfide associations in veins and wall amphibolites corresponds to a decrease in temperature to 350°C and below, judging by chlorite thermometers. Vein formation and near-vein amphibolitization are presumably associated with the impact of metamorphic fluids at the latest retrograde stage of metamorphism in the Early Proterozoic.

Keywords: carbonate-silicate veins, amphibolite halos, chloritization, carbonatization, Belomorian mobile belt