

УДК 553.2

СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫХ ЖИЛ В РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ МЕТАБАЗИТАХ СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ: МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ, ФОРМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ СЕРЕБРА, ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ¹

© 2023 г. И. С. Волков^а *, В. Ю. Прокофьев^а, В. М. Козловский^а, А. Н. Перцев^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*E-mail: IvanVolkov19@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2023 г.

После доработки 24.07.2023 г.

Принята к публикации 25.07.2023 г.

В работе впервые описывается сульфидная минерализация карбонатно-силикатных жил, широко распространенных на островах и побережье Белого моря в Северной Карелии среди тел раннепротерозойских метаморфизованных габброидов. Жилы с Fe–Cu сульфидной минерализацией вплоть до рудопроявлений приурочены к телам metabазитов, а также к их контактам с вмещающими гнейсами. В ходе изучения минерального состава жил были выделены главные ассоциации сульфидных минералов: халькопирит-борнитовая ± хлорит ± селениды и теллуриды Pb и Ag (B1); дигенит-борнитовая ± селениды и теллуриды Pb, Ag и Pd (B2); пирит-борнитовая ± халькопирит (B3); марказит-пирит-борнит-халькопиритовая (B4); зигенит-халькопиритовая ± акантит ± хлораргирит. Развитие сульфидных ассоциаций, а также кварц-хлоритовых агрегатов, приурочено к позднему этапу жилообразования. Анализ методом LA-ICP-MS показали, что в ассоциации B1 борнит имеет наибольшие концентрации серебра (до 675 ppm) и по примесям Ag, Se и Bi наиболее близок к борниту из низкотемпературных эпитеpmальных, скарновых и высокотемпературных жильных месторождений. В целом в изученных ассоциациях главным носителем серебра является борнит, тогда как дигенит, содержащий до 1000 ppm Ag, а также собственные минералы серебра (селениды, теллуриды, акантит и хлораргирит) количественно незначительны. Флюидные включения в кварце из сульфидных ассоциаций, а также в кварце из нерудной карбонатно-силикатной жилы изучены крио- и термометрическими методами. Показано, что минерализация на поздних стадиях жилообразования связана с гетерогенным углекислотно-водно-солевым метаморфическим флюидом. Углекислотные флюидные включения захватывались жильным кварцем при температурах 253–314°C и давлениях 2 ± 1 кбар. Водно-солевые включения захватывались в более широком диапазоне температур 100–500°C. Наиболее высокотемпературные флюидные включения с температурами гомогенизации >300°C характерны для кварцевых прожилков зигенит-халькопиритовой ассоциации с сульфидом серебра и хлораргиритом.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс, карбонатно-силикатные жилы, сульфидная минерализация, борнит, серебро

DOI: 10.31857/S0016777023060102, EDN: IARFIE

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 метал-

лов. Жильные системы являются второстепенными источниками металлов, уступая порфировым, стратиформным, скарновым и месторождениям Fe-оксидных медно-золотых руд (Sillitoe, 2012). Жильные проявления полиметаллической (преимущественно медной) сульфидной минерализации могут быть генетически связаны с вулканитами, субвулканическим кислым и средним магматизмом, плутоническим гранитоидным магматизмом, а также региональным метаморфизмом (например, So et al., 1985; Alm and Sundblad, 1994; Alm, 2003; Sankar and Prasad, 2012; Raj and Kumar, 2015, 2018; Abedini et al., 2016).

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016777023060102, для авторизованных пользователей.

МЕТОДЫ

Характерными примерами жильных тел в метаморфических толщах могут служить кварцевые и карбонатно-силикатные жилы Гренвильского орогена Североамериканской платформы (Loidolt, 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 2003; Cook et al., 2011). По минеральному составу среди них выделяются преимущественно кварц-полевошпатовые, карбонат-кварц-полевошпатовые и кварцевые жилы. Жилы в упомянутых метаморфических толщах могут быть генетически связаны либо с плутоническим магматизмом (Sankar, Prasad, 2012; Raj, Kumar, 2015, 2018), либо с деволатилизацией пород при региональном метаморфизме (Alm, Sundblad, 1994; Alm et al., 2003). Для таких жильных систем характерна бедная минерализация борнита, халькопирита, минералов группы халькозина, пирита, галенита, молибденита и пирротина. Однако в некоторых случаях, например в Свеконорвежской провинции, минерализация может доходить до масштабов мелкого месторождения (Alm, Sundblad, 1994; Alm et al., 2003). Борнит, один из главных сульфидных минералов таких жильных систем, может содержать повышенные концентрации Ag, Bi, Se и Te (Cook et al., 2011).

В Северной Карелии в архейско-протерозойской метаморфической толще развиты карбонатно-силикатные жилы с сульфидной минерализацией. Результаты геолого-петрологического изучения карбонатно-силикатных жил Северной Карелии в Беломорском подвижном поясе опубликованы в нашей недавней работе (Волков, Козловский, 2023). В частности, выделены две главные стадии жилообразования. На ранней стадии формировались кварц-плагиоклазовая ассоциация совместно с амфиболитовыми ореолами по метабазитам на контакте с жилами и гнейсами при температурах около 550–650°C и давлении 2.5–5 кбар. На второй стадии формировалась кварц-карбонатная ассоциация ± биотит при температурах около 540°C и ниже с последующим развитием хлорит-кварц-карбонатных агрегатов и сульфидной минерализации как в жилах, так и в околожильных амфиболитовых ореолах при температурах 350–220°C. Недостаточно изученными остаются сульфид-содержащие минеральные ассоциации, условия их образования, геохимические особенности и состав минералообразующих флюидов. В настоящей работе приведены новые результаты исследований сульфидной минерализации этих жил, определены минеральные формы нахождения Ag, оценены физико-химические условия, впервые получены данные о составе минералообразующих флюидов.

Рентгеноспектральный микроанализ (EMPA)

Анализы минералов на главные элементы и фотографии в обратно-рассеянных электронах выполнены на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL 8200 с 5 волновыми спектрометрами в центре коллективного пользования “ИГЕМ-аналитика” (г. Москва) С.Е. Борисовским 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 10–20 с. Расчет матричных поправок осуществлялся методом ZAF с использованием программы фирмы JEOL. Для калибровки использованы апробированные внутрилабораторные стандарты природных минералов.

Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS)

Измерения содержаний микроэлементов в сульфиде проводились методом лазерной абляции с помощью микрозонда ESI NWR213, соединенного с квадрупольным ICP-MS Thermo X-Series II в центре коллективного пользования “ИГЕМ-аналитика” (г. Москва) В.Д. Абрамовой и Е.А. Миневриной. Для всех сеансов абляция проводилась в сверхчистом гелии со скоростью потока 600 мл/мин. Испаряемый материал и гелий смешивались с Ar (0.8 л/мин) перед входом в горелку. Для внешней калибровки большинства элементов использовался следующий стандартный эталонный материал (SRM): MASS-1 полиметаллический сульфид (USGS) с ³³S в качестве внутреннего стандарта на основе измерений EPMA. Для расчета элементов, отсутствующих в MASS-1, применен стандарт UQAC Fe-S1. При расчете микроэлементного состава использовалась программа Iolite (Paton et al., 2011).

Изучение флюидных включений

Микротермометрические исследования индивидуальных флюидных включений проводились в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН с использованием микротермокамеры THMSG-600. Комплекс позволяет в режиме реального времени производить измерения температур фазовых переходов внутри включений в температурном интервале от –196 до 600°C, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать микрофотографии. Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Концентрация солей в растворе включений оценивалась по температурам плавления льда в системах H₂O–NaCl и H₂O–CaCl₂. Концентрации углекислоты и метана в растворе оценивались, исходя из объемных соотношений фаз и плотностей угле-

кислоты и метана в газовой фазе (Прокофьев, Наумов, 1987). Давление оценивалось для ассоциаций углекислотно-водных и существенно-углекислотных флюидных включений гетерогенного флюида по пересечению изохоры и изотермы. Оценка концентраций солей и давлений флюида проводилась с использованием программы FLINCOR (Brown, 1989). Точность определения температур гомогенизации флюидных включений составляла $\pm 1.0^\circ\text{C}$, температур эвтектики $\pm 1.5^\circ\text{C}$, температур плавления льда и газгидратов, а также температур гомогенизации углекислоты $\pm 0.1^\circ\text{C}$, плавления углекислоты $\pm 0.5^\circ\text{C}$, расчета солёности ± 0.1 мас. %-экв. NaCl, расчета плотностей флюида ± 0.01 г/см³, оценки давлений ± 5 бар.

ГЕОЛОГИЯ

Район исследований (фиг. 1) 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). На побережье и прилегающих островах северной Карелии развиты кварцевые и карбонатно-силикатные жилы, приуроченные к метабазитовым телам раннего протерозоя. Вмещающие породы представлены комплексами метаморфизованных габбро-анортозитов и габброноритов, а также железистых метагаббро (Шуркин, 1960; Степанов, 1981; Степанова и др., 2017; Stepanova et al., 2022). Тела метабазитов 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. Интрузии базитов были метаморфизованы в условиях высоко- и умеренно-барической амфиболитовой, реже в низкобарической эклогитовой фациях и частично будинированы (Козловский, Аранович, 2010; Скублов и др., 2013, 2016; Березин, Скублов, 2014; Козловский и др., 2020).

К телам метабазитов, а также к их контактам с гнейсами приурочены кварцевые и карбонатно-силикатные жилы, минеральный состав которых был впервые описан В.И. Лебедевым (1950). Мощность жил варьирует от первых сантиметров до первых метров, а простираение прослеживается до десятков метров, причем мощность может меняться по простираению жилы, образуя крупные раздувы или пережимы (Лебедев, 1950; Волков, Козловский, 2023). Главными жильными минералами являются полевые шпаты, кварц и карбо-

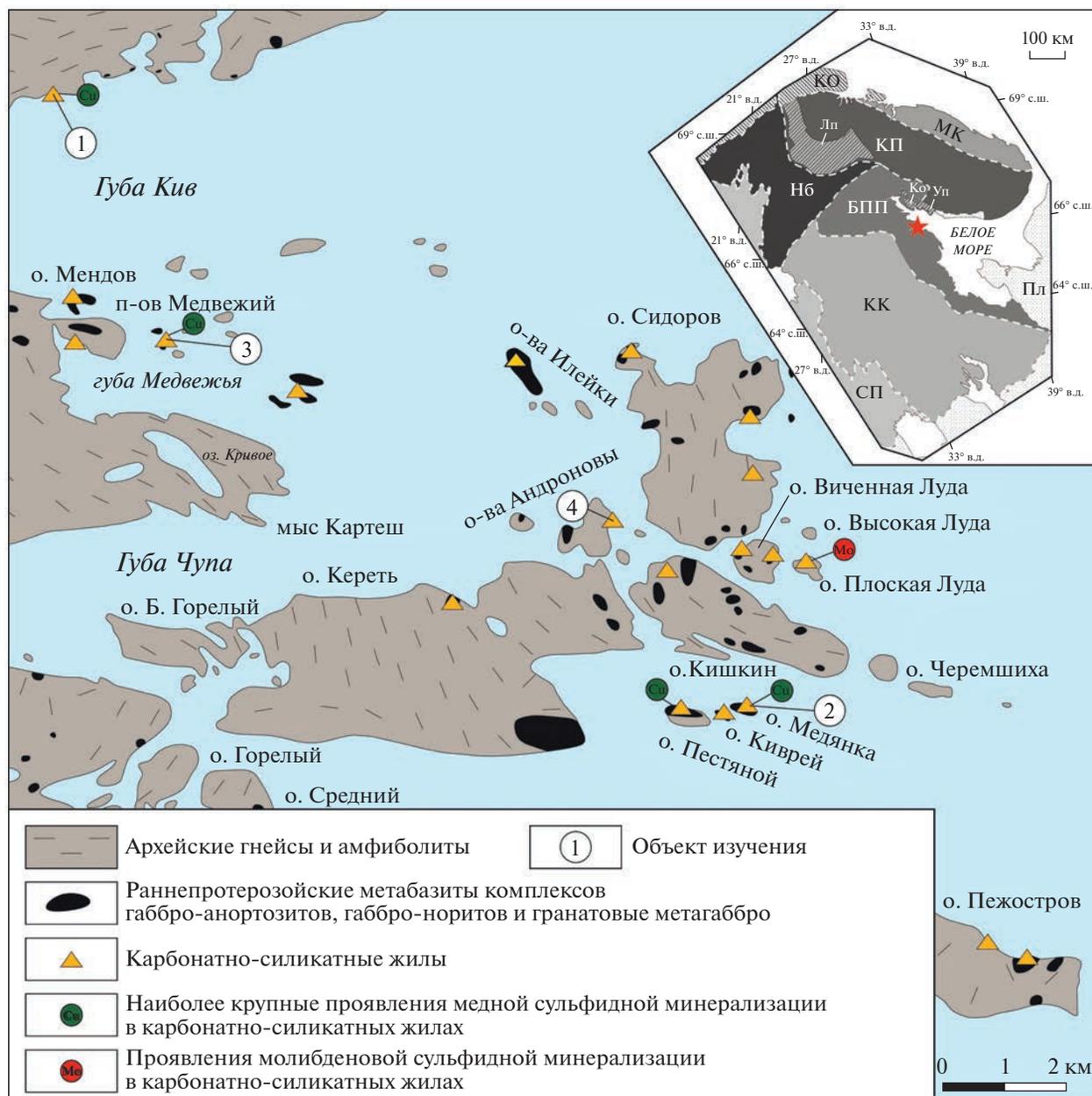
наты. В варьирующих количествах присутствуют турмалин, хлорит, минералы титана (ильменит, сфен, рутил, анатаз), эпидот, скаполит, апатит, слюды (биотит, мусковит), амфиболы, а также сульфиды железа, меди и молибдена (Лебедев, 1950; Никитин, 1960; Смирнова, Солодкая, 1960). На острове Медянка (фиг. 1) известно рудопроявление сульфидов меди в карбонатно-силикатных жилах и древние горные выработки (Смирнова, Солодкая, 1960) (фиг. 2).

В зависимости от соотношения главных минералов, жилы могут варьировать по составу от кварцевых, кварц-карбонатных до кварц-плагиоклазовых и карбонат-кварц-плагиоклазовых. Структура жил доходит до гигантокристаллической, что проявляется в присутствии крупных кристаллов карбоната, турмалина и биотита. Во многих случаях проявлено зональное строение жил в виде закономерного развития плагиоклазовых (альбит-олигоклаз) и кварц-плагиоклазовых наружных зон и кварцевых/кварц-карбонатных осевых зон (фиг. 3а, б; Волков, Козловский, 2023). Жилы повсеместно сопровождаются околожильными амфиболитами по метабазитам (фиг. 3в). Амфиболитовые ореолы также развиты по метабазитам вдоль контакта с гнейсами (Березин, Скублов, 2014; Козловский и др., 2020). Мощность ореолов до 50 см. В этих ореолах у контакта с жилами проявлено неравномерное развитие карбонатов, хлорита и, реже, сульфидов (фиг. 3г). Более подробно структурно-геологическое положение и петрография изучаемых кварцевых и карбонатно-силикатных жил, а также околожильных ореолов описаны нами ранее (Волков, Козловский, 2023).

СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

Сульфидная минерализация, несмотря на наличие давно известного рудопроявления на острове Медянка (Смирнова, Солодкая, 1960), ранее детально не изучалась. Сульфиды проявлены в кварцевых и карбонат-содержащих кварц-плагиоклазовых жилах. Прожилки борнита, халькопирита, пирита и местами марказита развиваются в жильном кварце и плагиоклазе, а также в кварц-хлоритовых прожилках околожильных ореолов. Жильная Cu–Fe сульфидная минерализация изучена в трех основных объектах: (1) северный берег губы Кив; (2) рудопроявление на острове Медянка; (3) безымянный остров в Медвежьей губе (табл. 1, фиг. 1).

Сульфидные ассоциации на северном берегу губы Кив и на рудопроявлении острова Медянка (объекты 1 и 2 на фиг. 1) имеют принципиальное сходство. На северном берегу губы Кив (1) сульфидная минерализация приурочена к хлорит-кварц-плагиоклазовой жиле мощностью до 10 см и представлена редкими маломощными прожилками борнита, халькопирита и пирита в плагио-



Фиг. 1. Схема геологического строения восточной части Северной Карелии и прилегающих островов (модифицировано из: Волков, Козловский, 2023). 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 – Умбинский гранулитовый пояс. 1–4 – объекты изучения: 1 – северный берег губы Кив; 2 – рудопроявление на острове Медьянка; 3 – безымянный остров в Медвежьей губе; 4 – острова Андроновы.

клазе. На острове Медьянка (объект 2), где ранее было отмечено рудопроявление сульфидов меди, древние горные выработки (каналы), дают представления о мощности сульфид-содержащих жил: ширина каналов составляет 1–3 м, длина до 5–6 м (фиг. 2). Судя по проведенному нами изучению отвалов вокруг каналов, здесь велась разработка карбонат-биотит-кварц-плаггиоклазовых жил с

сульфидными прожилками в кварце, плаггиоклазе и околожилных амфиболитах. Сульфидные прожилки сложены преимущественно борнитом при подчиненном количестве халькопирита, пирита и минералов группы халькозина. Мощность прожилков варьирует от нескольких миллиметров до 2–3 см. Борнит из обоих объектов (фиг. 4а–в) проявлен в трех ассоциациях. Ассоциация В1



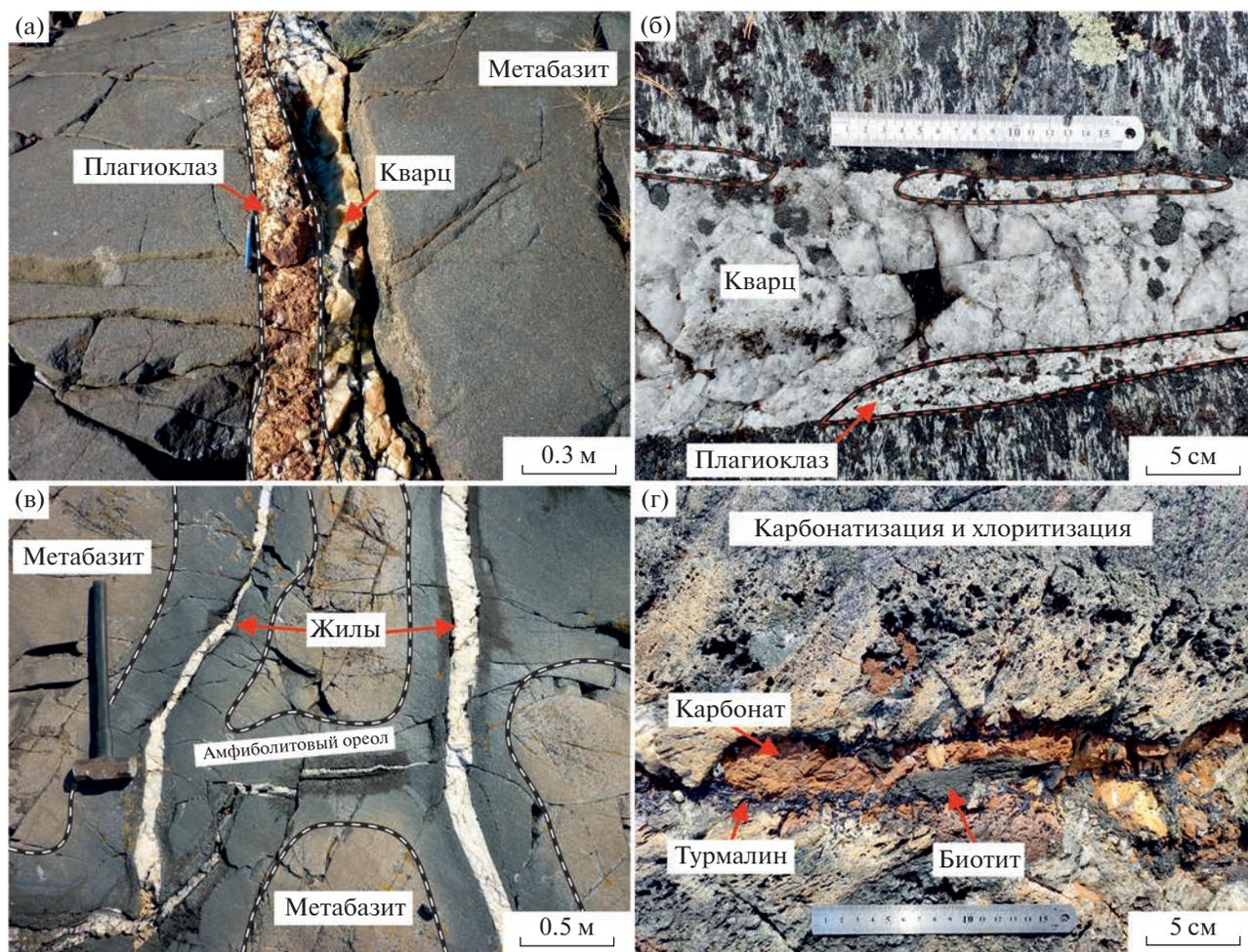
Фиг. 2. Старинные горные выработки (оконтурены пунктиром) на острове Медянка (фото В.М. Козловского).

представлена сульфидными прожилками борнитового и борнит-халькопиритового состава в кварце и плагиоклазе (фиг. 4а). В объекте (2) ассоциация В1 проявлена также в кварц-хлоритовых прожилках околожилльных амфиболитов, где сульфиды образуют сростания с хлоритом клинохлор-шамазитового состава (фиг. 4г). Ассоциация В2 характеризуется сростанием борнита с дигенитом (фиг. 4б) и обнаружена только в объекте (2). Дигенит образует вроски в борните и наружные каймы шириной до 0.5 мм вокруг него. В борните, халькопирите и дигените из ассоциаций В1 и В2 местами встречаются зерна микронной размерности селенидов и теллуридов свинца, серебра и палладия (фиг. 5). Помимо ассоциаций В1 и В2, на обоих объектах встречена ассоциация В3. Она характеризуется присутствием пирита в виде небольших зерен обломочной формы, а также пиритовыми включениями округлой или правильной кубической формы 0.01–4 мм в борните (фиг. 4в). Взаимоотношения между выделяемыми тремя ассоциациями борнита не были обнаружены. Повсеместно по сульфидам из представленных ассоциаций развивается гематит в виде удлиненных скелетных агрегатов вдоль трещин или в виде скоплений ромбовидных кристаллов размером от

нескольких мкм до 0.2 мм. По трещинам в борните развиваются халькозин и ковеллин (фиг. 4а, в). Наиболее интенсивно гематитизированы ассоциации В2 и В3.

В объекте (2) (остров Медянка) помимо борнитовых ассоциаций В1 и В2 обнаружены жилы мощностью до 30 см кварцевого состава с рассеянным ильменитом и прожилками халькопирита. Прожилки халькопирита имеют мощность до 1 см. Халькопирит содержит включения округлых зерен зигенита размером 20–50 мкм (фиг. 6а), а также микронные зерна теллуридов и селенидов серебра и свинца. В кварце наблюдаются цепочки включений хлораргирита размером до 30 мкм и микрокристаллических агрегатов акантита (фиг. 6б–г).

Борнит-содержащая ассоциация В4 выделяется нами в кварц-плагиоклазовых жилах на одном из безымянных островов в Медвежьей губе (объект 3 на фиг. 1). Особенность ассоциации В4 — обогащение марказитом. Сульфидная минерализация представлена гнездами размером до 2 см и прожилками мощностью до 1.5 см в кварце и плагиоклазе. Гнезда и прожилки сложены преимущественно агрегатом из мелких зерен марказита размером от первых микрон до 0.5 мм в матриксе халькопирита (фиг. 7а). Зерна марказита имеют



Фиг. 3. Строение карбонатно-силикатных жил: (а) — зональная кварц-плагиоклазовая жила с развитием наружной плагиоклазовой зоны; (б) — зональная кварц-плагиоклазовая жила с развитием наружных плагиоклазовых и осевой кварцевой зон; (в) — развитие ореолов амфиболизации по метабазитам вокруг карбонатно-силикатных жил; (г) — наложенная околожилльная карбонатизация и хлоритизация.

неправильную форму “осколков”, которые выстраиваются в ориентированные цепочки (фиг. 7а). Более крупные срастания зерен пирита и марказита имеют размер до 2 мм (фиг. 7б). В таких срастаниях в марказите наблюдаются ламеллы халькопирита (фиг. 7в). По халькопириту основной массы развиваются прожилки борнита, переходящие в крупные участки с реликтовыми зернами марказита, макро- и микроламеллами халькопирита и крупными кристаллами пирита (фиг. 7г–е). Для борнита характерны микроламеллы халькопирита (фиг. 7д, е). По трещинам в борните развиваются халькозин, ковеллин и гематит-кварцевые прожилки (фиг. 7). В рассмотренной ассоциации последовательность образования минералов следующая: марказит, пирит → халькопирит → борнит, халькопирит → халькозин, ковеллин, гематит.

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ

В кварце из описанных выше сульфидных ассоциаций, а также в кварце из нерудной карбонатно-силикатной жилы, обнаружены флюидные включения размером более 10 мкм, пригодные для микротермометрических исследований. По фазовому составу при комнатной температуре флюидные включения подразделены на 3 типа (фиг. 8): (а) углекислотно-водно-солевые; (б) газовые, заполненные плотной углекислотой, иногда с небольшой каймой водного раствора, и (в) двух- или однофазовые газово-жидкие включения водно-солевых растворов. Включения типа (а) и (б) были обнаружены в карбонат-турмалин-кварцевой жиле без сульфидов на Андроновых островах (объект 4) и в кварцевой жиле с халькопиритом, акантитом и хлораргиритом на острове Медянка (объект 2). Углекислотные газовые вклю-

Таблица 1. Изученные объекты, минеральные ассоциации и типы флюидных включений в кварце

Объект изучения на фиг. 1	№ образца	Описание	Сульфидные ассоциации	Флюидные включения в кварце
1	М-50-1	Хлорит-плагиоклаз-кварцевая жила с сульфидными прожилками	Ассоциация В1: борнит, халькопирит, селениды и теллуриды Pb и Ag	—
	М-50-2, М-50-3		Ассоциация В3: борнит, пирит ± халькопирит	
2	К-38	Кварц-хлоритовые прожилки с сульфидами в околожильном эпидот-кварц-плагиоклазовом амфиболите	Ассоциация В1: борнит, халькопирит, селениды и теллуриды Pb и Ag	—
	К-39	Карбонат-биотит-кварц-плагиоклазовая жила с сульфидными прожилками	Ассоциация В1: борнит, халькопирит, хлорит	Включения типов (б) и (в)
	К-43		Ассоциация В2: борнит, дигенит, селениды и теллуриды Pb, Ag и Pd	—
	М-12, М-15	Кварцевая жила с сульфидными прожилками	Халькопирит, зигенит, акантит(?), хлораргирит	Включения типов (а), (б) и (в)
3	М-9-1, М-9-2	Кварц-плагиоклазовая жила с гнездами и прожилками сульфидов	Ассоциация В4: Марказит, пирит, халькопирит, борнит	Включения типа (в)
4	С-28	Карбонат-турмалин-кварцевая жила	—	Включения типов (а), (б) и (в)

Примечание. Борнит-содержащие ассоциации обозначены номерами В1–В4. Описание типов флюидных включений см. текст.

чения (б) также встречаются в кварце из карбонатно-силикатной жилы объекта (2). Включения типа (в) встречаются как отдельно, так и вместе с остальными типами включений. Все изученные флюидные включения приурочены к залеченным трещинам, и большинство из них в соответствии с критериями Э. Реддера (Реддер, 1987) отнесены к вторичным и первично-вторичным флюидным включениям. Нередко встречаются ассоциации газовых включений и углекислотно-водных включений. Такие ассоциации могут захватываться на линии двухфазового равновесия, и температуры гомогенизации углекислотно-водных флюидных включений соответствуют температурам их захвата (Реддер, 1987).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Главные компоненты состава сульфидов

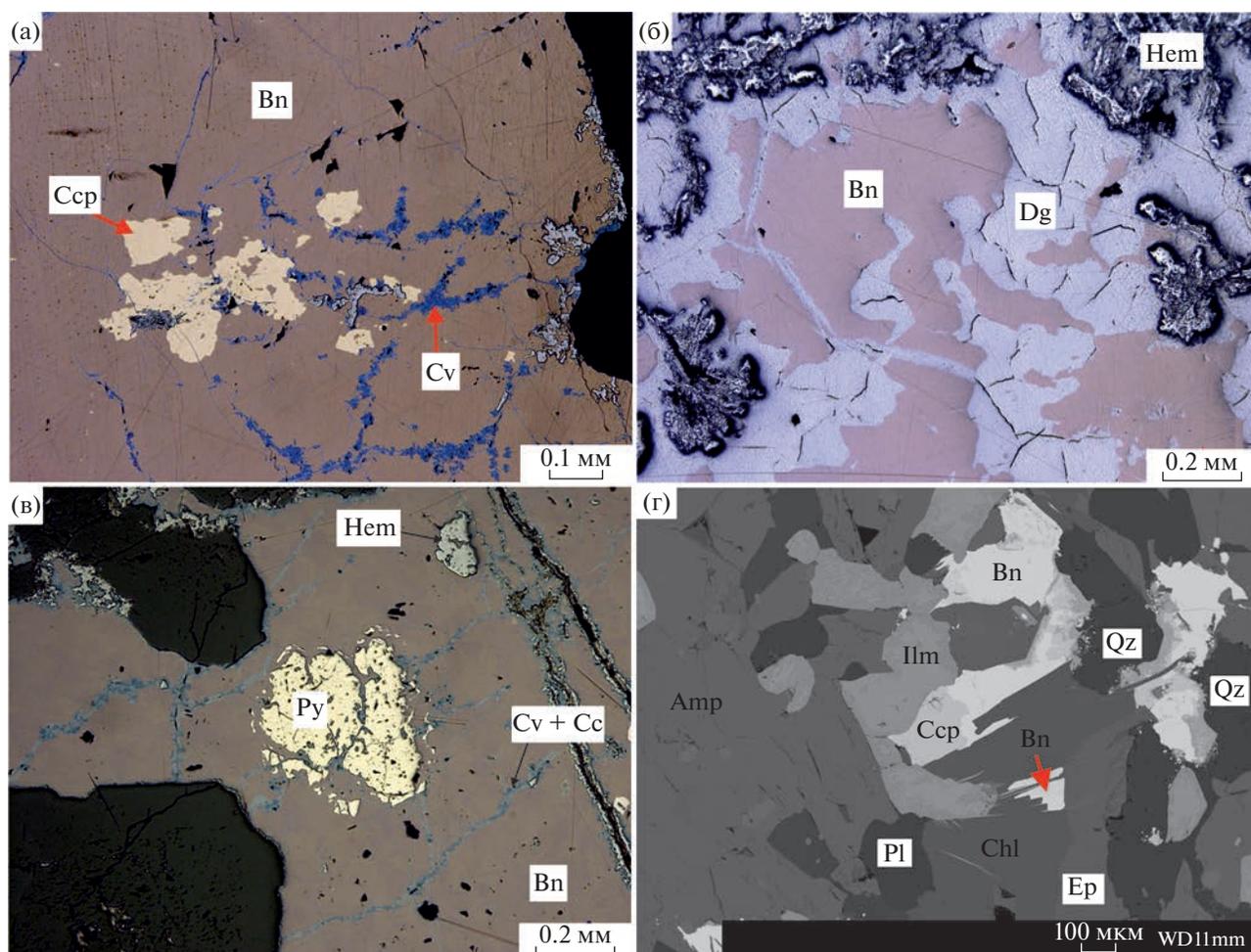
Анализы халькопирита, дигенита, пирита и марказита показывают состав близкий к CuFeS_2 , Cu_9S_5 и FeS_2 соответственно с учетом аналитической ошибки (см. формульные единицы в табл. 2). Зигенит и акантит, так же, как и микронные включения хлораргирита, селенидов теллуридов Pb, Ag и Pd, количественно не анализировались, а

диагностировались по спектрам ЭДС. Борнит обычно рассматривается как минерал постоянного состава в отношении главных элементов. Вместе с тем, для борнита известна ограниченная изоморфная примесь дигенита (Yund, Kullerud, 1966), а также предполагается борнит-халькопиритовый твердый раствор (Ciobanu et al, 2017).

Микрозондовые анализы в основном показывают отсутствие дигениновой составляющей в борните (табл. 3). Существенные отклонения соотношений S, Fe и Cu в анализах борнита наблюдаются в сторону халькопирита, что может быть частично связано с фазовой неоднородностью (см. обсуждение). Составы борнита, наиболее близкие к Cu_5FeS_4 , получены для ассоциаций В1–В3 (фиг. 9). Наибольшие отклонения анализов борнита от Cu_5FeS_4 наблюдаются в ассоциации В4, где отношения Cu/Fe и (Cu + Fe)/S достигают до 4.03 и 1.26 соответственно при наличии видимых микроламель халькопирита (фиг. 7e).

Микропримеси в сульфидах

Новые данные, полученные методом LA-ICP-MS (табл. 3), показали, что борнит может содержать Ag от 10 до 675 ppm, Se от 17 до 867 ppm и Bi до 494 ppm. Кроме того, борнит содержит примеси As (12–112

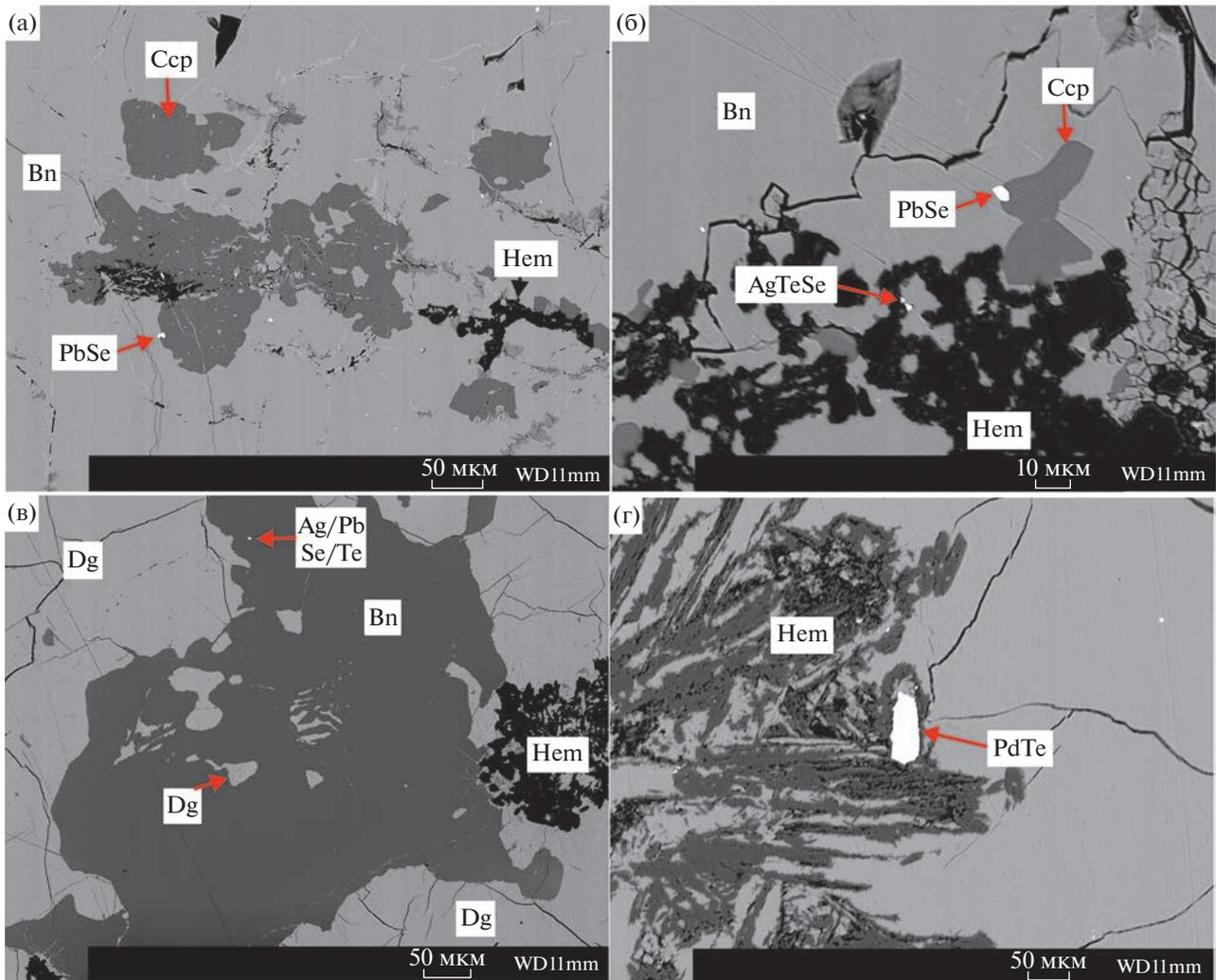


Фиг. 4. Сульфидные борнит-содержащие ассоциации жил и околожилных амфиболитов: (а) – борнит-халькопиритовая ассоциация В1 в карбонатно-силикатной жиле на северном берегу губы Кив, отраженный свет; (б) – борнит-дигенитовая ассоциация В2 в карбонатно-силикатной жиле на рудопоявлении на острове Медянка, отраженный свет; (в) – борнит-пиритовая ассоциация В3 в карбонатно-силикатной жиле на северном берегу губы Кив, отраженный свет; (г) ассоциация В1 в кварц-хлоритовых прожилках в околожилных амфиболитах из рудопоявления на острове Медянка, BSE изображение. Здесь и далее аббревиатуры минералов приведены по (Warr, 2021).

ppm), Те (до 42 ppm), Сd (до 340) и Рb (до 86 ppm). Выделенные ассоциации В1–В4 различаются по концентрациям Ag, Se и Bi в борните. На фиг. 10 показаны примеры графиков интенсивности анализируемых элементов от времени. Графики интенсивности для всех анализов LA-ICP-MS представлены в Приложении 1. Наибольшие концентрации Ag характерны для борнита из ассоциации В1 (объекты (1) и (2)): 157–675 ppm. Концентрации Bi и Se в борните В1 колеблются от 208 до 455 ppm и от 428 до 856 ppm соответственно. Борнит из ассоциации В2 имеет низкий уровень Ag (20–45 ppm). Особенностью борнита из ассоциации В2 являются сростания с дигенитом, о равновесии с которым свидетельствует преимущественное распределение Ag в дигените (табл. 3; 108–1004 ppm), а Bi – в борните (423–510 ppm) (Cook et al., 2011). Борнит из ассоциации В3 (объект 1) обеднен Ag (≤ 75 ppm) и Bi (≤ 1 ppm), содержит Se до 426 ppm. Борнит из ассо-

циации В4 (объект 3) тоже обеднен Ag (до 63 ppm) и содержит Bi до 130 ppm и Se до 116 ppm.

Характер графика зависимости интенсивности Ag от времени для анализов борнита обычно достаточно ровный и повторяет поведение макрокомпонентов (например, Cu), но иногда образует отдельные пики (“микроаномалии”) в ассоциациях В1 (фиг. 10б) и В2 (фиг. 10г). Такое поведение может означать, что Ag не только образует изоморфную примесь в борните, но и присутствует в виде микровключений собственных минеральных фаз (фиг. 5). Висмут ведет себя аналогично макрокомпонентам, т.е. без аномалий, что соответствует его изоморфному вхождению в твердый раствор борнита. Значения интенсивностей Se, Те и Рb в борните могут отличаться на несколько порядков и образовывать отдельные пики. Пики Se и Те совпадают с пиками Ag и/или Рb (фиг. 8), что согласуется с присутствием диагно-



Фиг. 5. Микронные включения селенидов и теллуридов Pb, Pd и Ag в сульфидных ассоциациях, BSE изображение: (а) – включения селенида Pb в борните и халькопирите из ассоциации B1 на северном берегу губы Кив; (б) – включения селенидов и теллуридов Pb и Ag в борните и халькопирите из ассоциации B1 на северном берегу губы Кив; (в) – включения селенидов и теллуридов Pb и Ag в борните из ассоциации B2 из рудопроявления острова Медянка; (г) – Включение теллурида Pd в дигените (ассоциация B2) из рудопроявления острова Медянка.

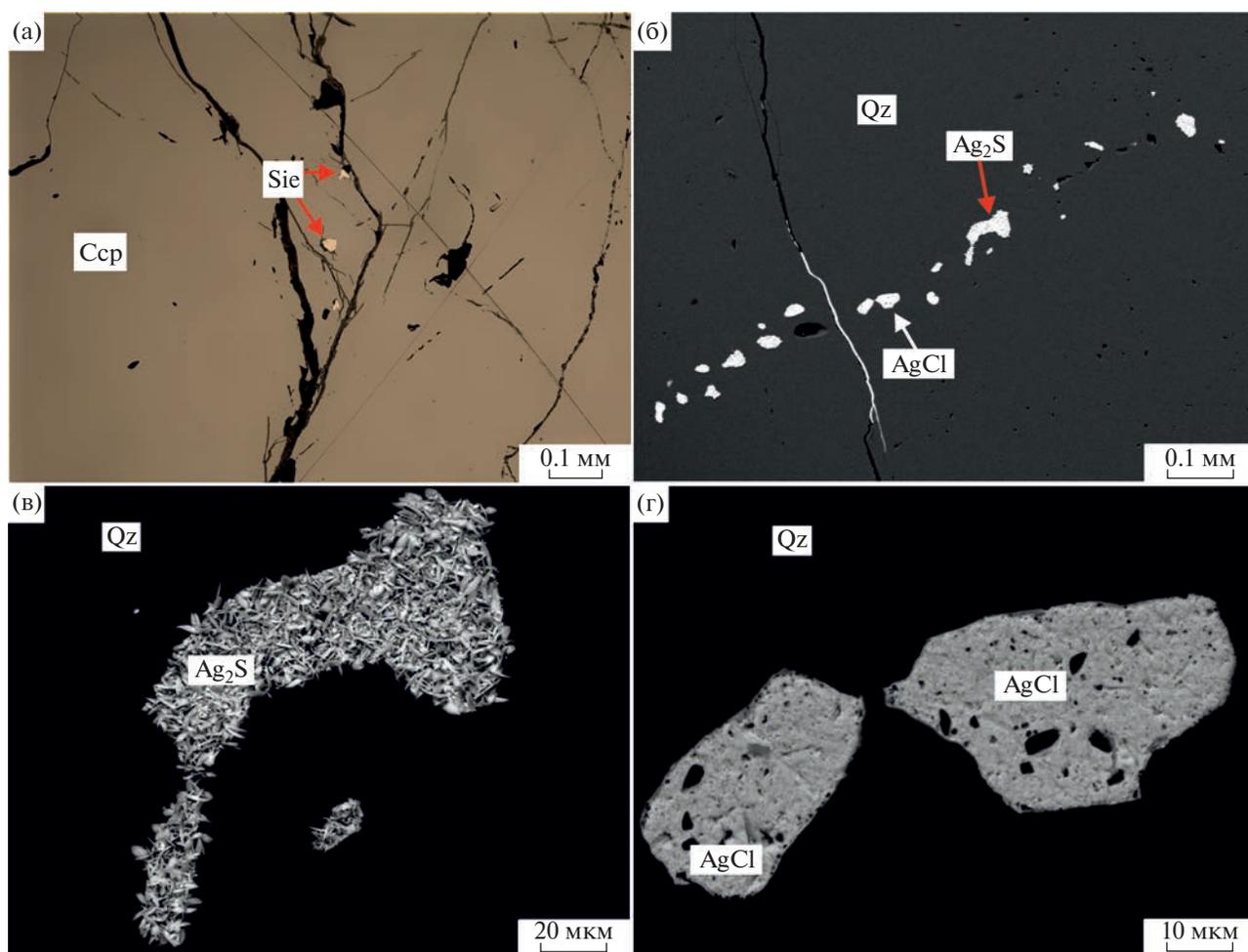
стированных микровключений селенидов и теллуридов Ag и Pb (фиг. 3).

Содержания Ag в халькопирите, пирите и марказите гораздо ниже, чем в борните и обычно не превышают 50 ppm (табл. 2). Однако в ассоциации B4 халькопирит, вмещающий зерна марказита, может содержать около 150 ppm Ag (фиг. 11). В дигените из ассоциации B2 содержание Ag варьирует от 108 до 1004 ppm. Se и Bi в дигените варьируют от 123 до 690 и от 5 до 10 ppm соответственно. В пирите содержание Se может достигать 532 ppm.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ

По данным изучения более 200 индивидуальных флюидных включений в кварце из разных

прожилков (табл. 4), температуры гомогенизации флюидных включений типа (а) (углекислотно-водных) в кварце из жилы без сульфидов изменяются в интервале 253–314°C (фиг. 12). Концентрация солей в этих углекислотно-водных флюидах составляет 18.9–21.9 мас. %-экв. NaCl (фиг. 12), концентрация углекислоты находилась в интервале 1.8–5.3 моль/кг р-ра, метана 0.01–0.3 моль/кг р-ра, а плотность флюида в интервале 1.03–1.14 г/см³. Во флюидных включениях типа (а) в кварце из жилы с халькопиритом, акантитом и хлораргиритом температура гомогенизации составляет 269°C (фиг. 12). Концентрация солей в этих углекислотно-водных включениях составляет 21.5 мас. %-экв. NaCl (фиг. 12). Концентрация углекислоты в соответствующем флюиде 3.7 моль/кг р-ра, а метана 0.06 моль/кг р-ра; плотность флюида 1.07 г/см³. Судя по величине температуры эвтектики (от –44



Фиг. 6. Сульфидная ассоциация в кварцевой жиле на острове Медянка: (а) – включения зигенита в халькопирите, отраженный свет; (б–г) – включения акантита (Ag_2S) и хлораргирита (AgCl) в кварце, BSE.

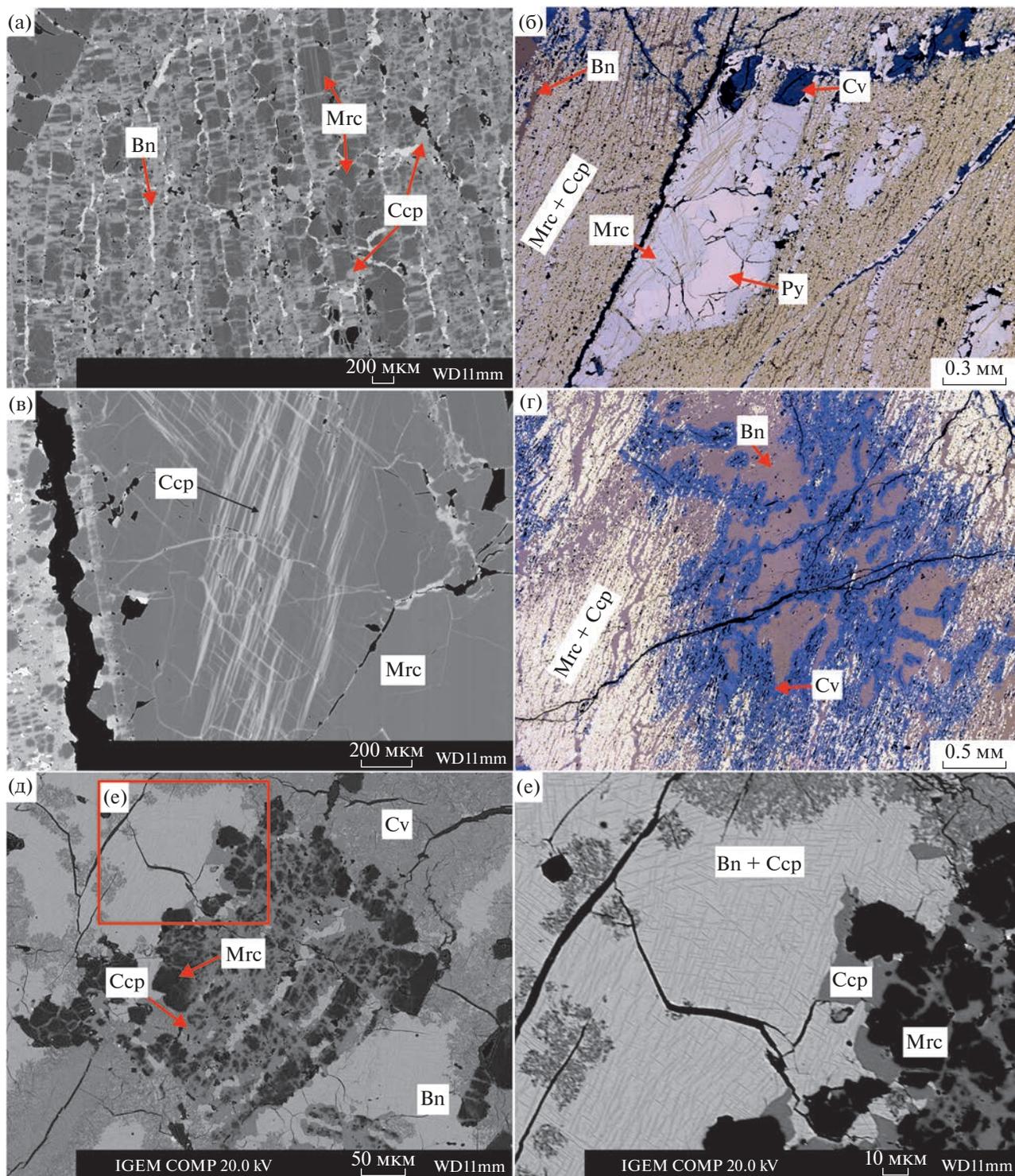
до -54°C), в углекислотно-водных минералообразующих флюидах среди солей преобладали хлориды Na, Ca и Mg.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях типа (б) (существенно газовых), некоторые из которых сингенетичны включениям типа (а), происходит в жидкую фазу при температурах от $+19.8$ до -18.3°C . Плавление углекислоты в них наблюдается в интервале температур от -57.2 до -58.9°C , т.е. содержание примесей менее 5 мол. %. Температуры плавления ниже температуры плавления чистой углекислоты (-56.6°C) связаны с наличием в ней примесей метана, азота, сероводорода. Оценки плотности флюидов типа (б) находятся в интервале $0.78\text{--}1.02\text{ г/см}^3$.

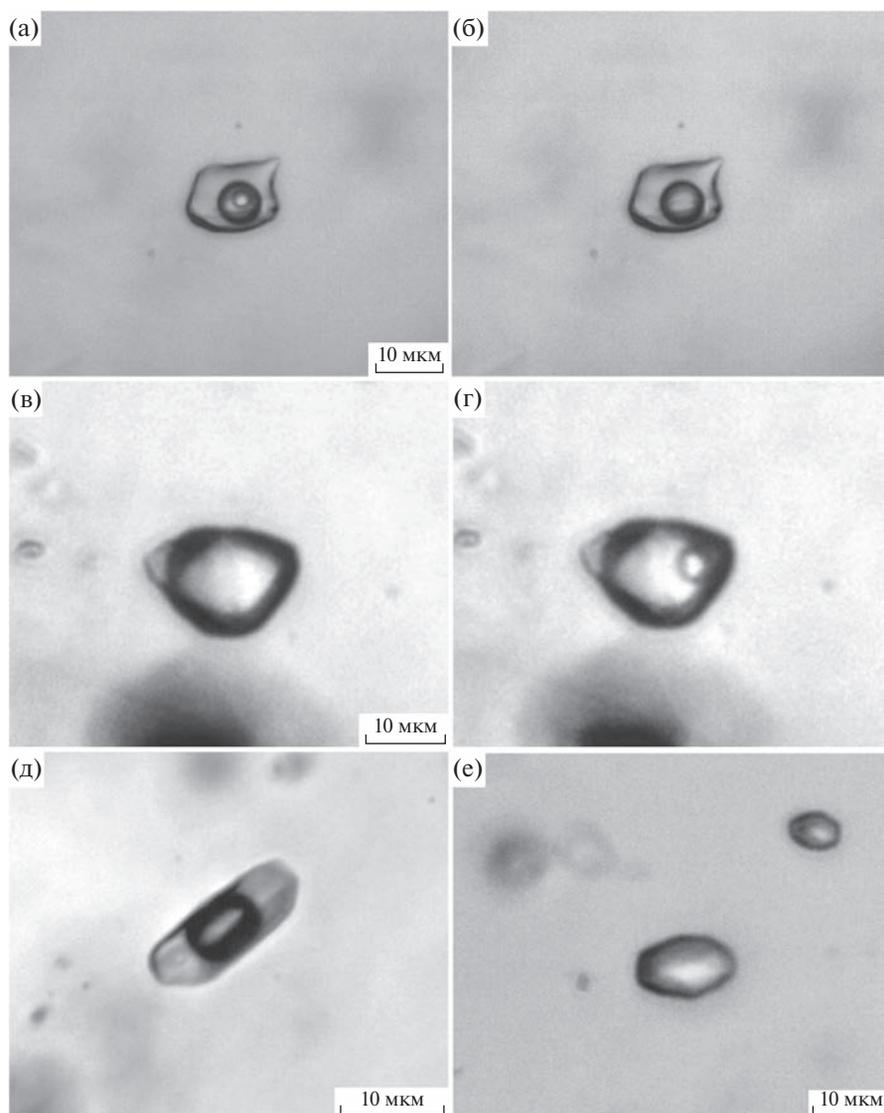
Для сосуществующих включений типов (а) и (б) давление флюида оценено методом пересечения изохор и изотерм (фиг. 12а). Поскольку в кварце из карбонатно-силикатной жилы с борнит-содержащей ассоциацией В1 (обр. К-39) были обнаружены только углекислотные газовые

включения типа (б), в качестве изотерм использовались оценки температур $270\text{--}310^\circ\text{C}$ по известным хлоритовым термометрам (Cathelineau, Nieva, 1985; Котельников и др., 2012; Bourdelle et al., 2013) для хлорита (табл. 5) в сростках с борнитом В1 (фиг. 4г). Соответствующие пересечения с изохорами дают значения $1.4\text{--}2.8$ кбар (фиг. 13а). В ассоциации с сульфидом серебра и хлораргиритом (обр. М-15) встречаются углекислотные включения типов (а) и (б), значения давлений которых соответствуют $2.25\text{--}2.75$ кбар при изотерме 269°C (фиг. 13а). Для карбонатно-силикатной жилы без сульфидов оценки давления варьируют от 1.1 до 1.8 кбар при $253\text{--}314^\circ\text{C}$ (фиг. 13а). Таким образом, полученные оценки давления для всего интервала плотностей углекислотного флюида и температур гомогенизации включений варьируют от 1.1 до 3.1 кбар при температурах от 253 до 314°C (желтый контур на фиг. 13а).

Водно-солевые включения типа (в) гомогенизируются при температурах от 25 (однофазовые при комнатной температуре) до 330°C (фиг. 12).



Фиг. 7. Сульфидная ассоциация В4 на безымянном острове в Медвежьей губе: (а) – зерна марказита в халькопиритовом матриксе, замещаемом борнитом, BSE-изображение; (б) – крупные кристаллы пирита и марказита, а также мелкие зерна марказита в халькопиритовом матриксе, замещаемом борнитом, отраженный свет; (в) – трещины в марказите, выполненные халькопиритом, BSE изображение; (г, д) – крупный участок борнита с реликтами марказита и халькопирита и поздним ковеллином (г – отраженный свет; д – BSE изображение); (е) – борнит с ламеллями халькопирита, BSE изображение.



Фиг. 8. Флюидные включения в кварце карбонатно-силикатных жил объектов 1–4: (а), (б) – углекисотно-водное ((а) при +25°C, (б) при +15°C); (в), (г) – газовое углекислотное ((в) при +20°C, (г) при +10°C), (д) – двухфазовое водно-солевое, (е) – однофазовое водно-солевое.

Эти включения содержат водный раствор, в котором преобладают хлориды Na, Ca и Mg (температуры эвтектики меняются от -34 до -55°C) с концентрацией солей 4.9–22.9 мас. %-экв. NaCl (фиг. 12). Плотность водно-солевого флюида составляет 0.70 – 1.16 г/см³. При тех же условиях глубинности (примерно отвечающих 2 ± 1 кбар), что и для ассоциирующих включений типа (а) и (б), водно-солевые включения типа (в) в жилах с ассоциациями В1 и В4, а также в бессульфидной жиле могли быть захвачены при температурах от 50 до 350°C (фиг. 13б). В ассоциации с сульфидом серебра и хлораргиритом водно-солевые включения являются более высокотемпературными и при той же глубинности (2 ± 1 кбар) их температура захвата могла варьировать от 250 до 500°C (фиг. 13б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Химическая неоднородность борнита

Главные компоненты

Анализ борнита в изученных нами ассоциациях могут заметно отклоняться от Cu_5FeS_4 в сторону халькопирита (фиг. 9). Это может быть обусловлено борнит-халькопиритовой смесимостью (Ciobanu et al, 2017) или наличием халькопиритовых ламелл, образовавшихся в результате распада или замещения. Вместе с тем видимые ламеллы микронной размерности и более крупные наблюдаются только в борните ассоциаций В3 и В4. Наибольшие отклонения от состава Cu_5FeS_4 проявлены в борните из ассоциации В4, где халькопиритовые ламеллы наиболее обильны (фиг. 7е).

Таблица 2. Результаты микроанализов халькопирита, дигенита, пирита и марказита

Образец	М-50-1		М-9-1		К-43		М-50-2		М-50-3		М-9-1		М-9-2			
Минерал	Халькопирит				Дигенит				Пирит				Марказит			
	3		17		10		3		6		6		4		3	
<i>n</i>	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Fe	30.78	0.21	29.92	0.26	0.17	0.22	46.18	0.08	44.62	1.43	46.48	0.16	45.32	0.32	43.40	0.61
S	35.44	0.13	35.15	0.14	21.57	0.07	53.35	0.41	53.06	0.15	53.44	0.11	53.35	0.11	53.02	0.35
Cu	34.26	0.06	35.13	0.47	77.70	0.31	0.06	0.01	0.16	0.14	0.07	0.05	0.17	0.10	1.07	0.55
Ni	—	—	—	—	—	—	0.02	0.01	0.85	1.12	0.04	0.03	0.04	0.07	1.89	0.45
Co	—	—	—	—	—	—	0.06	0.01	0.60	0.71	0.01	0.01	0.03	0.02	0.12	0.01
Сумма	100.48	0.23	100.21	0.29	99.45	0.26	99.66	0.42	99.28	0.22	100.04	0.19	98.91	0.30	99.50	0.32
Формульные единицы																
Fe	1.00	0.00	0.98	0.01	0.02	0.03	1.00	0.01	0.97	0.03	1.00	0.00	0.98	0.00	0.94	0.01
S	2.01	0.00	2.01	0.01	4.96	0.02	2.00	0.01	2.00	0.00	2.00	0.00	2.01	0.00	2.00	0.00
Cu	0.98	0.00	1.01	0.01	9.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.02	—	—	—	—	0.04	0.01
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—	—	—	—	—
Микрокомпоненты, ppm (LA ICP-MS)																
Ag	60–66	—	4–150	—	108–1004	—	до 3	—	до 3	—	до 26	—	до 8	—	34–68	—
Bi	25–80	—	8–220	—	5–10	—	—	—	до 8	—	до 5	—	до 4	—	5–13	—
Se	407–740	—	64–68	—	123–690	—	340–532	—	301–524	—	до 126	—	58–139	—	6–84	—
As	40–54	—	24–30	—	67–96	—	18–753	—	34–1032	—	27–123	—	54–430	—	60–186	—
Te	до 42	—	—	—	до 40	—	до 39	—	4–11	—	—	—	—	—	—	—
Cd	—	—	—	—	до 73	—	до 2	—	до 6	—	—	—	до 2	—	до 3	—
Pb	676–1350	—	23–211	—	до 27	—	до 16	—	9–72	—	до 256	—	до 86	—	40–330	—

Примечание. *n* – количество анализов EMPA; μ – среднее значение; σ – стандартное отклонение.

Таблица 3. Результаты анализов борнита

Образец	М-50-1										М-50-2									
	Главные компоненты, мас. % (ЕМРА)																			
Fe	11.31	11.30	11.26	11.29	11.30	11.27	11.31	11.15	11.34	11.41	11.41	11.41	11.25	11.40	11.37	11.44	11.26			
S	26.07	25.96	26.39	25.73	25.81	25.57	25.87	25.77	25.51	25.76	25.66	25.79	25.61	25.72	25.48	25.69				
Cu	62.48	62.69	61.99	61.84	61.73	61.68	62.16	63.11	63.12	62.71	61.94	63.72	62.07	62.36	61.23	63.37				
Сумма	99.86	99.95	99.65	98.85	98.84	98.51	99.33	100.02	99.97	99.88	99.01	100.76	99.08	99.44	98.15	100.33				
Формульные единицы																				
Fe	1.01	1.01	1.01	0.51	0.61	0.72	0.82	1.00	1.02	1.02	1.03	1.00	1.03	1.02	1.04	1.01				
S	4.07	4.05	4.11	2.03	2.44	2.83	3.25	4.03	3.99	4.03	4.04	4.00	4.03	4.04	4.05	4.01				
Cu	4.92	4.94	4.88	2.46	2.95	3.45	3.94	4.97	4.99	4.95	4.92	4.99	4.93	4.94	4.91	4.99				
(Cu + Fe)/S	1.46	1.47	1.43	1.46	1.46	1.47	1.46	1.48	1.50	1.48	1.47	1.50	1.48	1.48	1.47	1.50				
Cu/Fe	4.85	4.88	4.84	4.81	4.80	4.81	4.83	4.98	4.89	4.83	4.77	4.98	4.78	4.82	4.70	4.95				
Микрокомпоненты, ppm (LA ICP-MS)																				
Ag	100–188 ppm										63–75 ppm									
Bi	220–243 ppm										до 1 ppm									
Se	428–616 ppm										157–307 ppm									
As	80–100 ppm										47–56 ppm									
Te	до 40 ppm										–									
Cd	–										–									
Pb	до 86 ppm										до 4 ppm									

Таблица 3. Продолжение

Образец	М-50-3														К-38																							
	Главные компоненты, мас. % (ЕМРА)																																					
Fe	11.11	11.14	11.21	11.24	11.25	11.17	11.28	11.18	11.17	11.62	11.69	11.58	11.60	11.58	11.71	11.65	11.78	11.54	11.60	11.11	11.14	11.21	11.24	11.25	11.17	11.28	11.18	11.17	11.62	11.69	11.58	11.60	11.58	11.71	11.65	11.78	11.54	11.60
S	25.47	25.71	25.69	25.82	25.78	25.84	25.78	25.83	25.80	26.10	26.20	26.40	26.16	26.40	26.02	25.75	26.11	25.89	25.96	25.47	25.71	25.69	25.82	25.78	25.84	25.78	25.83	25.80	26.10	26.20	26.40	26.16	26.40	26.02	25.75	26.11	25.89	25.96
Cu	63.61	64.31	63.35	63.07	63.49	63.83	63.40	63.07	63.08	61.55	61.82	61.61	61.26	61.61	61.90	61.66	61.62	62.07	61.90	63.61	64.31	63.35	63.07	63.49	63.83	63.40	63.07	63.08	61.55	61.82	61.61	61.26	61.61	61.90	61.66	61.62	62.07	61.90
Сумма	100.20	101.16	100.25	100.12	100.52	100.83	100.46	100.07	100.05	99.28	99.71	99.59	99.02	99.45	99.63	99.06	99.50	99.50	99.46	100.20	101.16	100.25	100.12	100.52	100.83	100.46	100.07	100.05	99.28	99.71	99.59	99.02	99.45	99.63	99.06	99.50	99.50	99.46
Формульные единицы																																						
Fe	1.00	0.99	1.00	1.01	1.00	0.99	1.01	1.00	1.00	1.05	1.05	1.04	1.05	1.04	1.05	1.05	1.06	1.04	1.04	1.00	0.99	1.00	1.01	1.00	0.99	1.01	1.00	1.00	1.05	1.05	1.04	1.05	1.04	1.05	1.05	1.06	1.04	1.04
S	3.98	3.98	4.01	4.03	4.01	4.01	4.01	4.03	4.03	4.09	4.09	4.12	4.10	4.08	4.07	4.05	4.08	4.06	4.06	3.98	3.98	4.01	4.03	4.01	4.01	4.01	4.03	4.03	4.09	4.09	4.12	4.10	4.08	4.07	4.05	4.08	4.06	4.06
Cu	5.02	5.03	4.99	4.97	4.98	5.00	4.98	4.97	4.97	4.87	4.87	4.85	4.85	4.88	4.88	4.90	4.86	4.91	4.89	5.02	5.03	4.99	4.97	4.98	5.00	4.98	4.97	4.97	4.87	4.87	4.85	4.85	4.88	4.88	4.90	4.86	4.91	4.89
(Cu + Fe)/S	1.51	1.51	1.50	1.48	1.49	1.49	1.49	1.48	1.48	1.45	1.45	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.45	1.47	1.46	1.51	1.51	1.50	1.48	1.49	1.49	1.49	1.48	1.48	1.45	1.45	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.45	1.47	1.46
Cu/Fe	5.03	5.07	4.96	4.93	4.96	5.02	4.94	4.96	4.96	4.65	4.65	4.68	4.64	4.69	4.65	4.65	4.60	4.73	4.69	5.03	5.07	4.96	4.93	4.96	5.02	4.94	4.96	4.96	4.65	4.65	4.68	4.64	4.69	4.65	4.65	4.60	4.73	4.69
Микрокомпоненты, ppm (LA ICP-MS)																																						
Ag	10–16ppm														280–675 ppm																							
Bi	до 1 ppm														264–455 ppm																							
Se	113–152 ppm														434–788 ppm																							
As	74–91 ppm														463–1012 ppm																							
Te	–														до 30 ppm																							
Cd	–														–																							
Pb	10–20 ppm														до 78 ppm																							

Таблица 3. Продолжение

Образец		К-39											
Главные компоненты, мас. % (EMPA)													
Fe	11.14	10.97	11.07	11.17	11.25	10.93	11.66	11.34	11.61	11.46	11.38	11.09	
S	25.70	25.61	25.33	25.77	25.69	25.48	25.72	26.06	25.60	25.80	25.77	25.85	
Cu	63.55	62.72	63.13	63.88	63.10	63.47	62.21	61.84	61.96	62.42	62.02	62.24	
Сумма	100.40	99.30	99.53	100.81	100.03	99.88	99.58	99.24	99.17	99.68	99.17	99.18	
Формульные единицы													
Fe	1.00	0.99	1.00	1.00	1.01	0.98	1.05	1.02	1.05	1.03	1.03	1.00	
S	4.00	4.03	3.99	4.00	4.01	3.99	4.03	4.09	4.03	4.04	4.05	4.06	
Cu	5.00	4.98	5.01	5.00	4.98	5.02	4.92	4.89	4.92	4.93	4.92	4.94	
(Cu + Fe)/S	1.50	1.48	1.51	1.50	1.49	1.50	1.48	1.45	1.48	1.48	1.47	1.46	
Cu/Fe	5.01	5.02	5.01	5.03	4.93	5.11	4.69	4.79	4.69	4.79	4.79	4.93	
Микрокомпоненты, ppm (LA ICP-MS)													
Ag	236–150 ppm												
Bi	222–230 ppm												
Se	573–627 ppm												
As	106–112 ppm												
Te	до 30 ppm												
Cd	–												
Pb	до 2 ppm												

Таблица 3. Продолжение

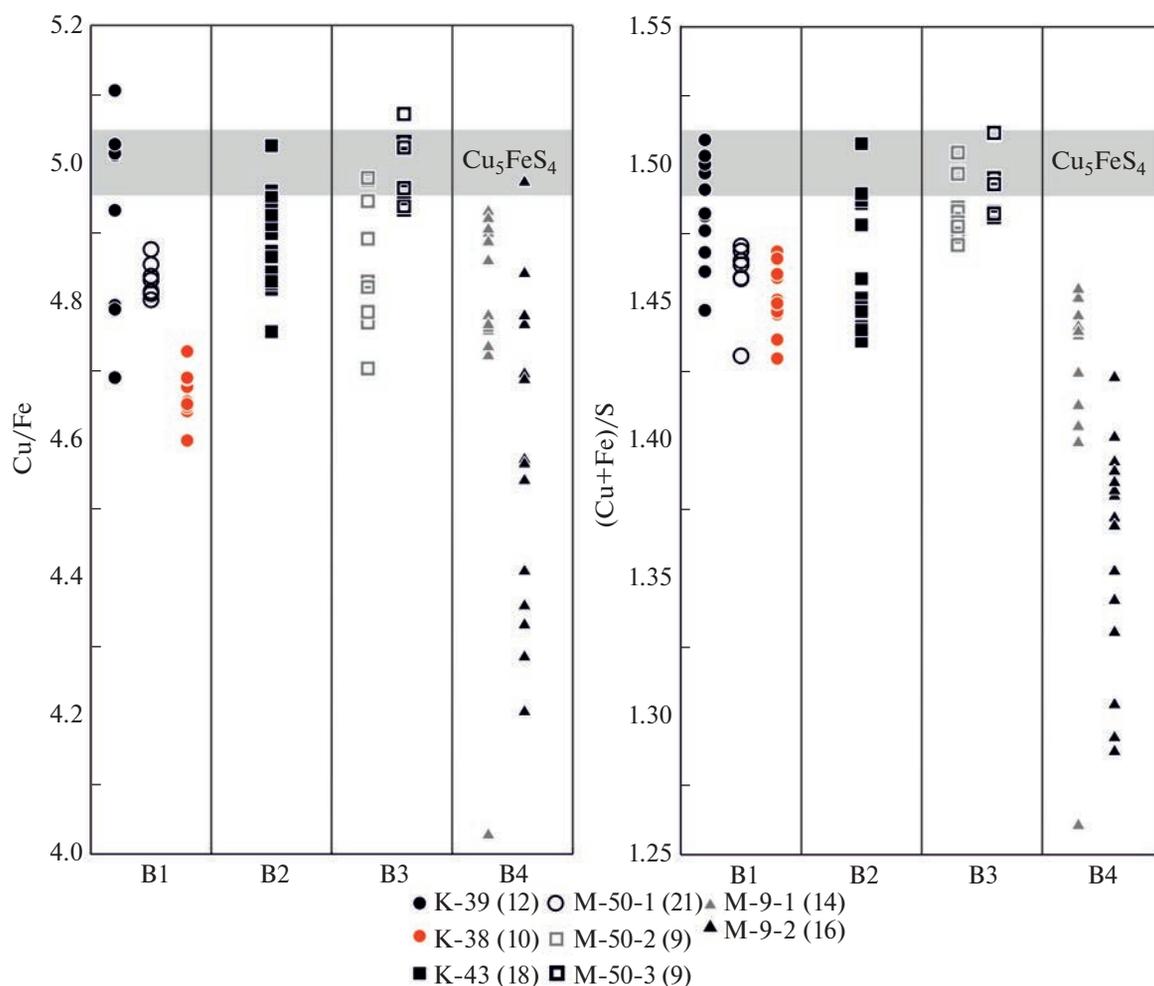
Образец		К-43												
		Главные компоненты, мас. % (EMPA)												
Fe	10.97	11.31	11.07	11.28	11.16	11.30	11.29	11.13	11.09	11.34	11.03	11.25		
S	26.30	26.22	26.17	26.45	26.17	26.31	26.20	26.05	26.32	26.40	26.04	26.34		
Cu	62.73	62.00	62.45	62.52	62.58	62.01	62.24	62.60	62.49	62.76	62.16	62.70		
Сумма	99.99	99.53	99.69	100.25	99.91	99.62	99.73	99.78	99.90	100.49	99.23	100.29		
Формульные единицы														
Fe	0.98	1.01	0.99	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	0.99	1.01	0.99	1.00		
S	4.09	4.10	4.09	4.10	4.08	4.10	4.09	4.07	4.10	4.09	4.08	4.09		
Cu	4.93	4.89	4.92	4.89	4.92	4.88	4.90	4.93	4.91	4.90	4.92	4.91		
(Cu + Fe)/S	1.44	1.44	1.45	1.44	1.45	1.44	1.45	1.46	1.44	1.45	1.45	1.45		
Cu/Fe	5.03	4.82	4.96	4.87	4.93	4.83	4.84	4.94	4.95	4.86	4.95	4.90		
Микрокомпоненты, ppm (LA ICP-MS)														
Ag	20–45 ppm													
Bi	423–510 ppm													
Se	163–817 ppm													
As	100–110 ppm													
Te	до 17 ppm													
Cd	–													
Pb	до 7 ppm													

Таблица 3. Продолжение

Образец		М-9-1												
Главные компоненты, мас. % (ЕМРА)														
Fe	11.49	11.30	11.43	11.25	11.58	11.52	11.22	11.55	11.25	11.23	12.69	11.53	11.41	11.32
S	26.53	26.66	26.50	26.34	26.87	26.94	26.23	26.54	26.36	26.43	29.07	26.88	27.01	26.58
Cu	62.54	63.27	63.25	63.17	62.70	61.92	62.87	62.58	62.72	62.72	58.21	62.14	61.94	62.97
Сумма	100.56	101.25	101.20	100.76	101.15	100.38	100.32	100.66	100.33	100.39	100.00	100.55	100.36	100.87
Формульные единицы														
Fe	1.02	1.00	1.01	1.00	1.02	1.02	1.00	1.02	1.00	1.00	1.11	1.02	1.01	1.00
S	4.10	4.10	4.08	4.07	4.12	4.16	4.07	4.10	4.09	4.10	4.42	4.14	4.17	4.10
Cu	4.88	4.91	4.91	4.93	4.86	4.82	4.93	4.88	4.91	4.90	4.47	4.84	4.82	4.90
(Cu+Fe)/S	1.44	1.44	1.45	1.46	1.42	1.41	1.46	1.44	1.45	1.44	1.26	1.41	1.40	1.44
Cu/Fe	4.78	4.92	4.86	4.93	4.76	4.72	4.92	4.76	4.90	4.91	4.03	4.74	4.77	4.89
Микрокомпоненты, ppm (LA ICP-MS)														
Ag	20–42 ppm													
Bi	12–94 ppm													
Se	17–116 ppm													
As	26–82 ppm													
Te	–													
Cd	до 340 ppm													
Pb	до 30 ppm													

Таблица 3. Окончание

Образец		М-9-2													
		Главные компоненты, мас. % (ЕМРА)													
Fe		11.54	12.18	12.23	9.69	11.70	11.46	11.54	11.35	11.39	12.31	11.91	11.49	11.40	11.76
S		27.20	27.17	27.89	26.44	28.13	27.32	27.51	26.76	27.40	28.47	28.48	26.57	27.53	27.34
Cu		61.60	61.14	60.30	64.31	60.90	62.18	61.70	62.57	61.99	58.94	59.13	59.72	60.84	60.81
Сумма		100.35	100.53	100.41	100.46	100.76	100.99	100.76	100.69	100.80	99.73	99.53	97.78	99.77	99.92
Формульные единицы															
Fe		1.02	1.08	1.07	0.86	1.02	1.01	1.02	1.01	1.00	1.08	1.05	1.04	1.01	1.04
S		4.19	4.18	4.27	4.10	4.29	4.18	4.21	4.13	4.20	4.36	4.37	4.20	4.25	4.22
Cu		4.79	4.74	4.66	5.03	4.69	4.81	4.77	4.87	4.80	4.56	4.58	4.76	4.74	4.74
(Cu+Fe)/S		1.39	1.39	1.34	1.44	1.33	1.39	1.37	1.42	1.38	1.29	1.29	1.38	1.35	1.37
Cu/Fe		4.69	4.41	4.33	5.83	4.57	4.77	4.70	4.84	4.78	4.21	4.36	4.57	4.69	4.54
Микрокомпоненты, ppm (LA-ICP-MS)															
Ag		11–48 ppm													
Bi		88–130 ppm													
Se		55–92 ppm													
As		19–26 ppm													
Te		–													
Cd		–													
Pb		–													



Фиг. 9. Отношения $(\text{Cu} + \text{Fe})/\text{S}$ и Cu/Fe для выделяемых разновидностей борнита. Составы с существенным уменьшением $(\text{Cu} + \text{Fe})/\text{S}$ и Cu/Fe относительно Cu_5FeS_4 могут быть представлены криптоагрегатами борнит + халькопирит (см. раздел “Обсуждение результатов” в тексте). Серая область соответствует составу Cu_5FeS_4 в пределах аналитической погрешности. В условных обозначениях в скобках приведено количество анализов.

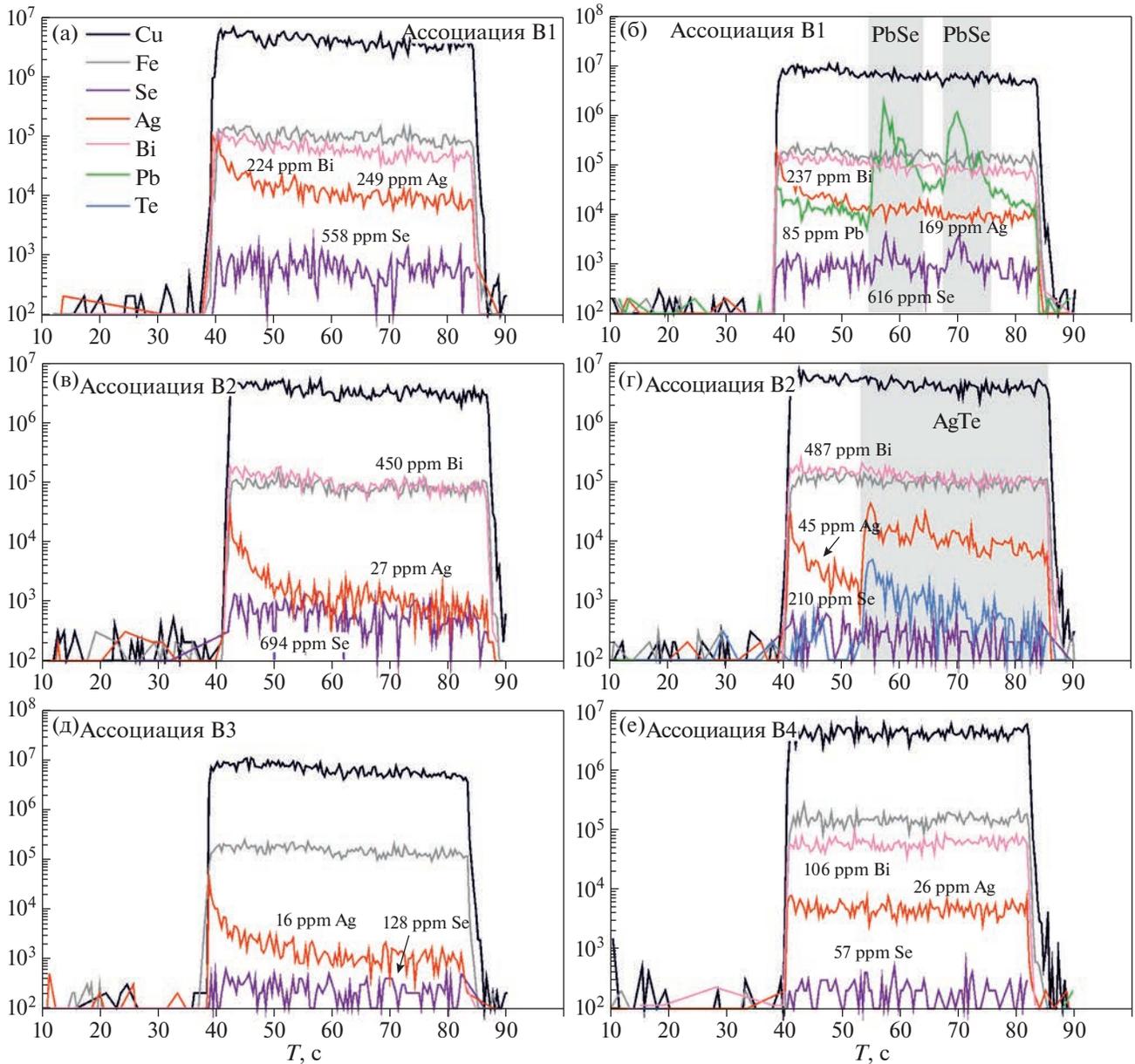
В ассоциации В1 видимых ламелл халькопирита в борните не наблюдается, но систематически присутствуют более или менее изометричные включения халькопирита размером до 0.1 мм (фиг. 4а). Наконец, в ассоциации В2 халькопирит не обнаружен ни в каком виде, однако существенное отклонение состава борнита от Cu_5FeS_4 в сторону халькопирита проявлено и в этом случае (фиг. 9).

Микрокомпоненты и геохимические особенности сульфидной минерализации

В изученных сульфидных ассоциациях главным концентратором Ag является борнит, содержащий до 675 ppm Ag (табл. 2 и 3), поскольку присутствующий дигенит (до 1000 ppm Ag), а также собственные минералы серебра (селениды, теллуриды, сульфиды и хлориды) по сравнению с

борнитом количественно незначительны. Содержание серебра в борните может служить косвенным признаком температурных условий в различных типах месторождений (Cook et al., 2011).

N.J. Cook и др. (2011) показали, что концентрации Ag и Bi в борните имеют хорошо выраженную положительную корреляцию, и, как правило, наибольшие концентрации этих элементов характерны для высокотемпературного гипогенного борнита ($>340^\circ\text{C}$), что, вероятно, связано с растворимостью упомянутых элементов в этом минерале. Однако в изученных нами ассоциациях насыщение борнита серебром (ассоциация борнита с сульфидом Ag) не наблюдается, собственные минералы серебра в борните — селениды и теллуриды. Какие-либо экспериментальные данные по пределам вхождения Ag в борнит в присутствии Se и Te до настоящего времени неизвестны. Борнит из ассоциации В1, по всей видимости, яв-

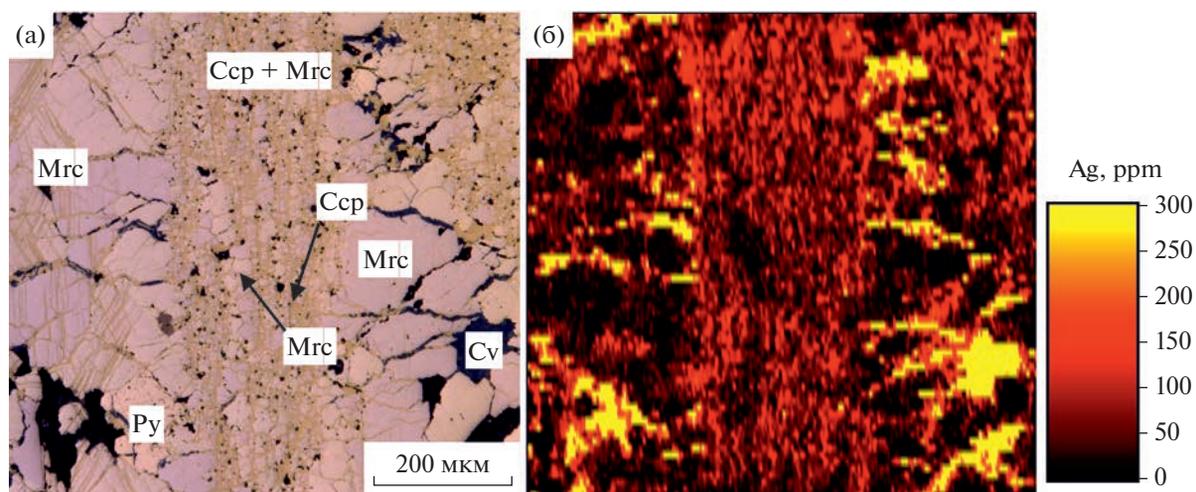


Фиг. 10. Примеры графиков интенсивности элементов от времени при анализе борнита методом LA-ICP-MS. (Результаты анализов см. в табл. 2, графики интенсивности для всех анализов LA-ICP-MS см. в электронном Приложении 1). (а) – борнит из ассоциации В1 без микровключений. (б) – борнит из ассоциации В1 с видимыми пиками Pb и Se, указывающими на наличие микровключений селенида свинца; (в) – борнит из ассоциации В2 без микровключений; (г) – борнит из ассоциации В2 с пиками Ag и Te, указывающими на наличие микровключений теллурида серебра; (д) – однородный борнит из ассоциации В3 без микровключений селенидов и теллуридов; (е) – однородный борнит из ассоциации В4 без микровключений селенидов и теллуридов.

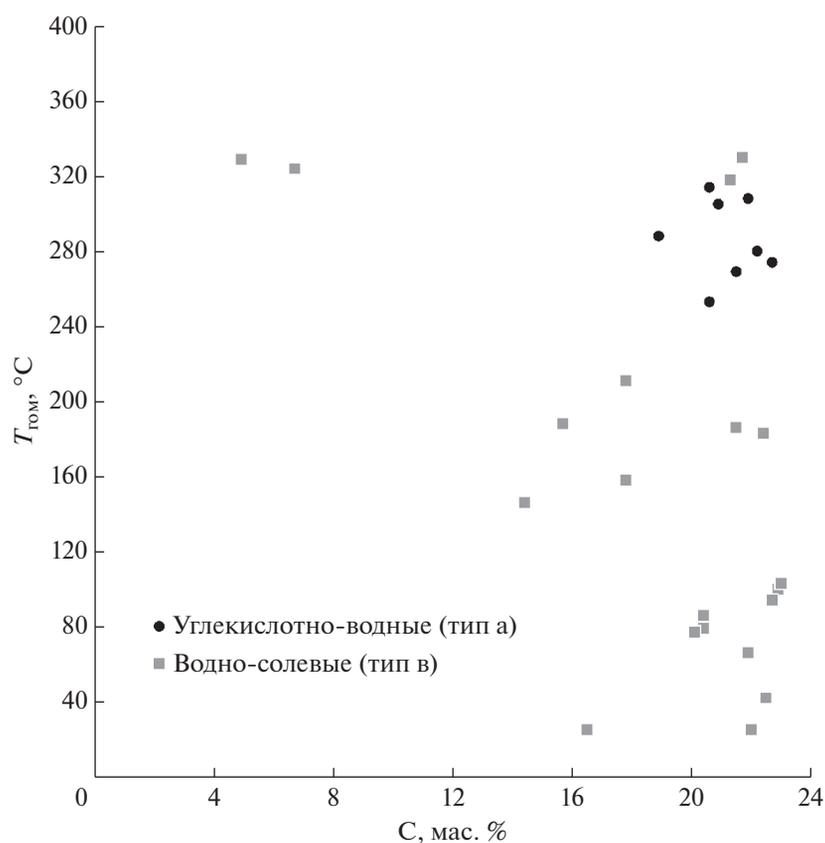
ляется наиболее высокотемпературным (по сравнению с другими изученными ассоциациями), поскольку имеет наибольшие концентрации Ag и Bi (табл. 3). В этой ассоциации состав борнита по примесям Ag, Bi и Se соответствует борниту низкотемпературных ассоциаций скарновых и эпитегральных месторождений (175–250°C) и, частично, высокотемпературному борниту из жильных месторождений (>340°C) (фиг. 14).

Состав флюидов и PT-условия

Ранее для изучаемых карбонатно-силикатных жил выделены две главные стадии развития (Волков, Козловский, 2023). Первая стадия – формирование кварц-плагиоклазовой ассоциации совместно с амфиболитовыми ореолами по метабазитам на контакте с жилами и гнейсами при температурах около 550–650°C и давлении 2.5–5 кбар. На второй стадии формировалась



Фиг. 11. Распределение серебра в ассоциации В4, обр. М-9-2: (а) — мелкие зерна марказита в халькопиритовом матриксе, а также крупные зерна пирита и марказита, отраженный свет; (б) — то же в виде карты распределения Ag.



Фиг. 12. Диаграмма “температура гомогенизации—концентрация солей” для флюидных включений типов (а) и (в).

кварц-карбонатная ассоциация ± биотит при температурах около 540°C и ниже с последующим развитием хлорит-кварц-карбонатных агрегатов и сульфидной минерализации как в жилах, так и в околожильных амфиболитовых ореолах при температурах 350–220°C. Полученные новые данные

по флюидным включениям показывают, что поздние хлорит-кварц-карбонатные ассоциации с сульфидами формировались при участии углекислотно-водного (типы включений “а” и “б”) и водно-солевого (тип включений “в”) флюидов. Захват углекислотных и углекислотно-водных вклю-

Таблица 4. Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце прожилков

Образец	Тип включений*	n	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. CO}_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{гом CO}_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. газлдр}}, ^\circ\text{C}$	С солей, мас. %- экв. NaCl (CaCl ₂)	C_{CO_2} , моль/кг р-ра	C_{CH_4} , моль/кг р-ра	d , г/см ³	P , бар
С-28-1	а	19	280	-52	-22.3	-58.3	28.3 Ж	-3.7	(22.2)	1.9	0.01	1.13	
	а	2	274	-51	-20.5	-57.7	27.4 Ж	-3.6	22.7	1.8	0.01	1.14	
	в	5	183	-55	-20.1				22.4			1.06	
	в	11	100	-50	-20.8				22.9			1.13	
С-28-2	а	5	314	-47	-17.5	-57.2	19.2 Ж	4.4	20.6	3.8	0.3	1.10	1170–1820
	а	3	308	-51	-19.4	-57.2	25.6 Ж	-1.1	21.9	5.3	0.2	1.03	
	а	5	305	-46	-18.2	-57.7	28.4 Ж	-2.2	20.9	2.4	0.3	1.10	
	а	5	288	-47	-15.4	-57.4	28.3 Ж	3.3	18.9	2.4	0.2	1.10	
	а	8	253	-44	-17.5	-57.8	27.6 Ж	4.1	20.6	1.9	0.14	1.13	
	б	2				-57.5	10.7 Ж					0.86	
	б	2				-57.5	13.2 Ж					0.84	
	б	3				-57.5	14.5 Ж					0.82	
М-15	б	2				-57.2	19.8 Ж					0.78	
	в	4	86	-51	-17.3				20.4			1.12	
	в	13	25	-49	-12.6				16.5			1.12	
	а	4	269	-54	-18.8	-57.8	27.5 Ж	-3.5	21.5	3.7	0.06	1.07	2090–2740
	б	6				-58.2	-18.3 Ж					1.02	
	б	6				-58.4	-7.4 Ж					0.97	
	б	5				-58.9	-6.5 Ж					0.97	
	б	7				-58.9	-2.3 Ж					0.94	
	в	3	330	-49	-19.0				21.7			0.90	
	в	6	329	-34	-3.0				4.9			0.70	
в	4	324	-30	-4.2				6.7			0.74		
в	3	318	-54	-18.4				21.3			0.91		
в	5	186	-37	-18.7				21.5			1.05		

Таблица 4. Продолжение

Образец	Тип включений*	<i>n</i>	$T_{\text{том}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. CO}_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{том CO}_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. газидр}}, ^\circ\text{C}$	С солей, мас. %-экв. NaCl (CaCl ₂)	C_{CO_2} , моль/кг р-ра	C_{CH_4} , моль/кг р-ра	d , г/см ³	P , бар
М-9	в	9	211	-44	-14.0				17.8			0.98	
	в	4	188	-44	-11.7				15.7			1.00	
	в	9	158	-47	-14.0				17.8			1.04	
	в	3	146	-44	-10.4				14.4			1.03	
	в	3	103	-54	-21.0				23.0			1.13	
	в	7	94	-55	-20.5				22.7			1.13	
	в	3	79	-38	-17.3				20.4			1.12	
	в	8	42	-55	-20.2				22.5			1.16	
	в	5	25	-55	-19.5				22.0			1.16	
	К39	б	4				-57.3	-12.6 Ж					1.00
б		3				-57.5	-8.0 Ж					0.97	
б		3				-57.5	-7.8 Ж					0.97	
б		5				-57.5	-7.7 Ж					0.97	
б		3				-57.5	-6.7 Ж					0.97	
б		2				-57.3	16.5 Ж					0.81	
в		4	77	-44	-16.8				20.1			1.12	
в		5	66	-45	-19.3				21.9			1.14	

Примечание. а – углекислотно-водно-солевые; б – газы углекислотные, в – газы углекислотные, в – газы-жидкие водно-солевые, Ж – в жидком состоянии. $T_{\text{том}}$ – температура гомогенизации, $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления, C – солёность, d – плотность флюида.

Таблица 5. Результаты анализов хлорита и расчета температур

Образец	К-28				
	Компоненты, мас. %				
SiO ₂	25.25	25.11	25.49	25.30	25.54
TiO ₂	0.08	0.05	0.09	0.08	0.08
Al ₂ O ₃	20.94	20.60	20.98	20.67	21.07
FeO	26.74	26.09	27.42	26.49	26.65
MnO	0.23	0.23	0.27	0.21	0.20
MgO	13.40	13.40	13.40	13.37	13.57
CaO	0.01	0.03	0.07	0.04	0.02
Na ₂ O	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03
K ₂ O	0.20	0.00	0.02	0.15	0.00
F	0.09	0.09	0.16	0.10	0.15
Сумма	86.94	85.62	87.91	86.43	87.31
	Формульные единицы				
Si	2.71	2.73	2.71	2.73	2.73
Ti	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe	2.40	2.37	2.44	2.39	2.38
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	2.15	2.17	2.13	2.15	2.16
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
K	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Al ^{IV}	1.29	1.27	1.29	1.27	1.27
Al ^{VI}	1.36	1.37	1.35	1.36	1.38
	Оценки температур по хлоритовым геотермометрам				
T°C (Cathelineau, Nieva, 1985)	290	290	290	290	290
T°C (Котельников и др., 2012)	270	270	270	270	270
T°C (Bourdelle et al., 2013)	290	250	310	260	250

Примечание. Формулы рассчитаны на 14 O²⁻.

чений кварцем происходил преимущественно при температурах 253–314°C и давлениях 2 ± 1 кбар (фиг. 10а). Можно предполагать, что водно-солевые включения захватывались при этих же давлениях, но в более широком диапазоне температур (примерно 500–100°C: фиг. 13б). Нахождение в одних и тех же образцах углекислотных и водно-солевых включений в кварце, значительная соленость (18.9–22.7 мас. %-экв. NaCl) углекислотных включений, а также существенное перекрытие температурных условий для включений разных типов (фиг. 13) позволяют предполагать существование гетерогенного углекислотно-водно-солевого флюида, по крайней мере, в диапазоне температур 253–314°C. Флюидные включения с подобными свойствами встречаются в минералах пород низкой и средней степеней метаморфизма (Реддер, 1987), что подтверждает предположение о метаморфическом происхождении жилобразующих флюидов (Волков, Козловский, 2023).

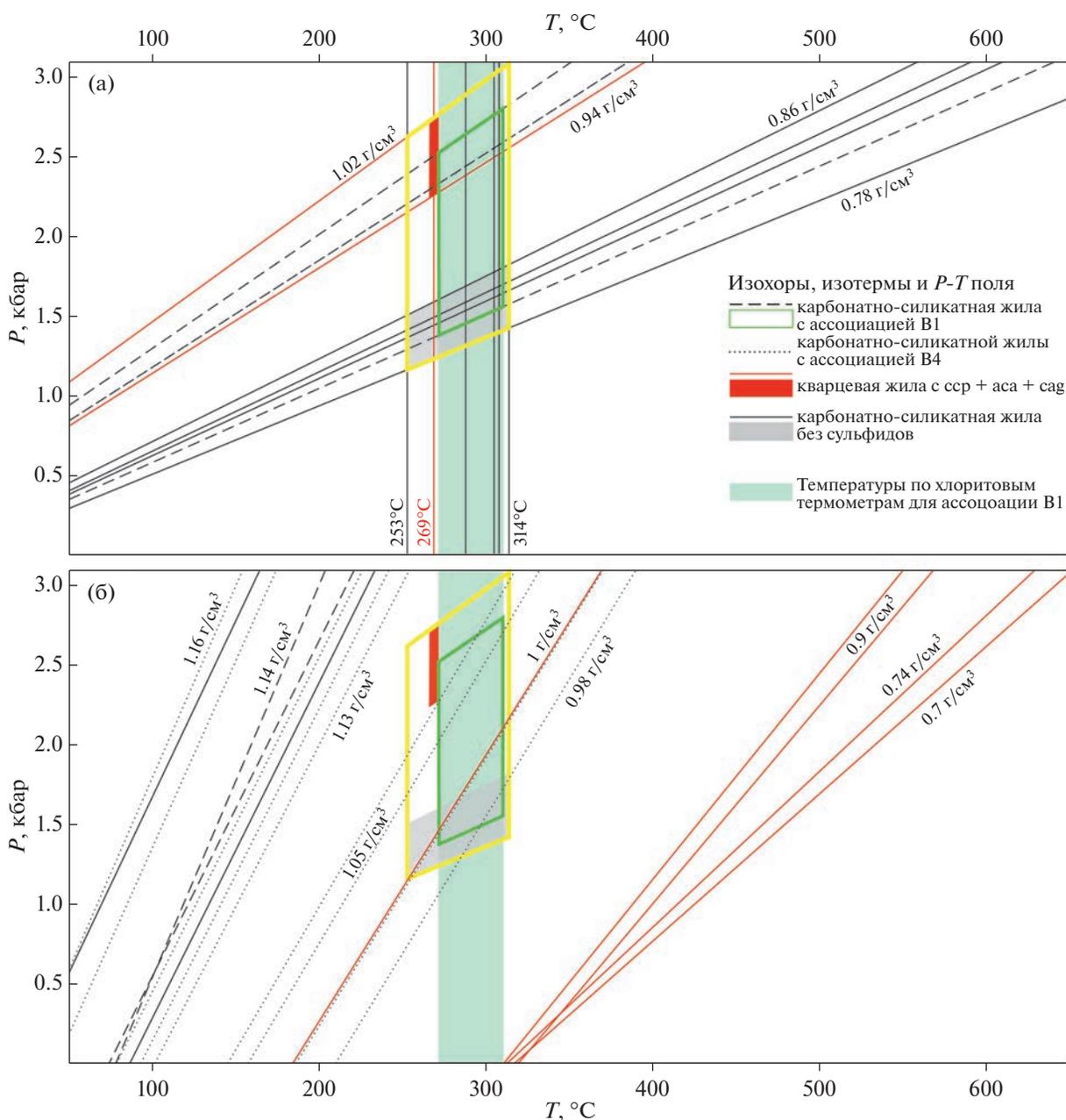
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В ходе изучения минерального состава карбонатно-силикатных жил были выделены главные ассоциации сульфидных минералов: халькопирит-борнитовая ± хлорит ± селениды и теллуриды Pb и

Ag (ассоциация В1); дигенит-борнитовая ± селениды и теллуриды Pb, Ag и Pd (ассоциация В2); пирит-борнитовая ± халькопирит (ассоциация В3); марказит-пирит-борнит-халькопиритовая (ассоциация В4) и не содержащая борнит дигенит-халькопиритовая ассоциация ± акантит ± хлораргирит.

2. В ассоциации В1 борнит имеет наибольшие концентрации серебра (до 675 ppm) и по примесям Ag, Se и Bi наиболее близок к борниту из низкотемпературных эпитеpmальных, скарновых и, частично, высокотемпературных жильных месторождений. В целом, в изученных ассоциациях главным носителем серебра является борнит, тогда как дигенит, содержащий до 1000 ppm Ag, а также собственные минералы серебра (селениды, теллуриды, сульфиды и хлориды) количественно незначительны.

3. Сульфидные ассоциации вместе с кварцевыми и хлорит-кварцевыми прожилками формировались на поздних стадиях жилобразования при участии гетерогенного углекислотно-водно-солевого флюида. Углекислотно-водные флюидные включения захватывались жильным кварцем при температурах 253–314°C и давлениях 2 ± 1 кбар. Водно-солевые включения захватывались в более широком диапазоне температур 100–500°C. Флюиды с подобными свойствами характерны



Фиг. 13. Оценка давлений минералообразующих флюидов. Желтым контуром обозначено общее PT поле для углекислотных включений из всех ассоциаций.

для низкой и средней степеней метаморфизма. Наиболее высокотемпературные условия (до 500°C) обоснованы для кварцевых прожилков зигенит-халькопиритовой ассоциации с сульфидом серебра и хлораргиритом.

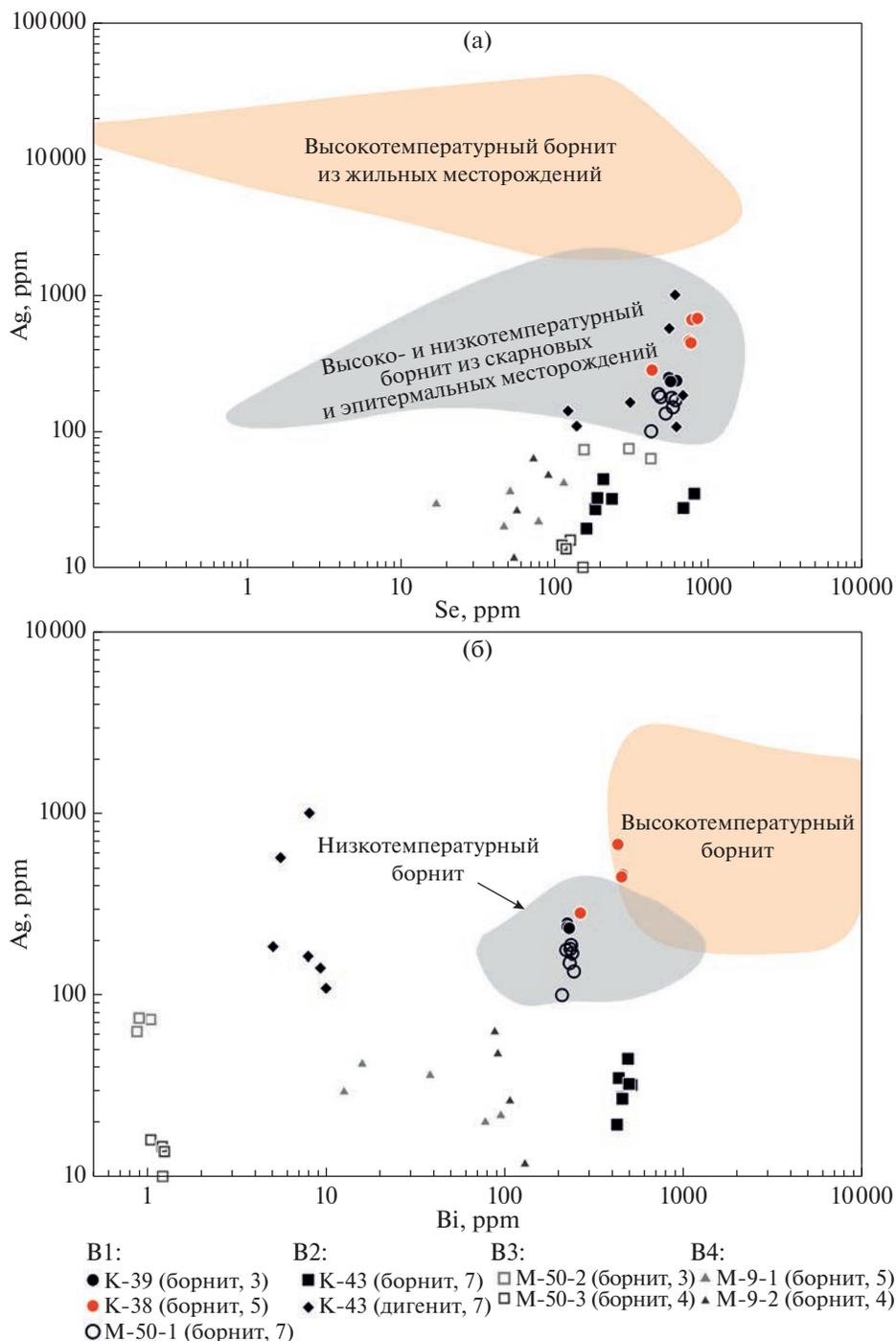
и Е.А. Миневриной (LA-ICP-MS). Авторы благодарят О.В. Каримову и Л.А. Левицкую (ИГЕМ РАН) за квалифицированную помощь в диагностике минералов. Авторы глубоко признательны И.В. Викентьеву и В.А. Коваленкеру за критический обзор и конструктивные замечания при подготовке рукописи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Лабораторные исследования проведены при участии сотрудников ЦКП «ИГЕМ-Аналитика» С.Е. Борисовского и Е.В. Ковальчук (ЕМРА), В.Д. Абрамовой

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проведена в рамках темы Государственного задания ИГЕМ РАН.



Фиг. 14. Графики корреляций (а) Ag–Se и (б) Ag–Bi для борнита и дигенита карбонатно-силикатных жил Лоухского района в сравнении с борнитом из других геологических объектов (выделенные области) (Cook et al., 2011). В условных обозначениях в скобках после названия минерала приведено количество анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балаганский В.В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое. Автореф. дис. ... д-ра 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 апогаббровые 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.
<https://doi.org/10.7868/S0869590314030030>

- Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газожидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Волков И.С., Козловский В.М.* Стадийность и условия формирования карбонатно-силикатных жил и околожильных ореолов в раннепротерозойских комплексах Беломорского подвижного пояса, Северная Карелия // Петрология. 2023. Т. 31. № 5.
- Глебовицкий В.А.* Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с
- Козловский В.М., Аранович Л.Я.* Петрология и термобарометрия эколгитовых пород Красногубского дайкового поля, Беломорский подвижный пояс // Петрология. 2010. Т. 18. № 1 С. 29–52.
- Козловский В.М., Травин В.В., Саватенков В.М., Терентьева Л.Б., Сальникова, Е.Б., Курдюков Е.Б.* Термобарометрия палеопротерозойских метаморфических событий центральной части Беломорского подвижного пояса, Северная Карелия // Петрология. 2020. Т. 28. № 2. С. 184–209.
<https://doi.org/10.31857/S0869590320010033>
- Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Шекина Т.И., Калинин Г.М.* Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. № 9001.
https://doi.org/10.2205/2012NZ_ASEMPG
- Лебедев В.И.* К минералогии кварцево-карбонатных жил северной Карелии // Известия Карело-финского филиала Академии Наук СССР. 1950. № 1. С. 3–36.
- Никитин Ю.В.* Молибденитовое оруденение в жилах Северной Карелии. // Труды лаборатории геологии докембрия. Выпуск 9. М.–Л.: Изд.-во. АН СССР, 1960. С. 150–157.
- Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б.* Геохимические особенности рудообразующих растворов Зырянского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Геохимия. 1987. № 3. С. 375–386.
- Реддер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 560 с.
- Слабунов А.И.* Геология и геодинамика архейских подвижных поясов на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита // Институт геологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2008. 296 с.
- Слабунов А.И., Балаганский В.В., Шипанский А.А.* Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эколгитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 650–677.
<https://doi.org/10.15372/GIG2021116>
- Смирнова В.С., Солодкая Р.И.* Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Карельская лист Q-36XVI. Об. Записка. М.: Госгеолтеиздат // Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр. Москва. 1960. 60 с.
- Степанов В.С.* Основной магматизм докембрия западного Беломорья // Ленинград: Наука, 1981 г. 216 с.
- Степанова А.В., Степанов В.С., Ларионов А.Н., Азимов П.Я., Егорова С.В., Ларионова Ю.О.* Габбро-анортозиты 2.5 млрд лет в Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология и тектоническая позиция // Петрология. 2017. Т. 25(6). С. 581–608.
<https://doi.org/10.7868/S0869590317060061>
- Шуркин К.А., Дук В.Л., Митрофанов Ф.П.* Материалы к геологии и петрографии габбро-лабрадоритов архея Северной Карелии // Геология и абсолютный возраст докембрия Балтийского щита и Восточной Сибири. М. 1960. С. 120–149.
- Abedini A., Calagari A.A., Naseri H.* Mineralization and REE geochemistry of hydrothermal quartz and calcite of the Helmesi vein-type copper deposit, NW Iran // Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen. 2016. С. 123–134.
<https://doi.org/10.1127/njgpa/2016/0591>
- Alm E., Broman C., Billström K., Sundblad K., Torssander P.* Fluid characteristics and genesis of early Neoproterozoic orogenic gold-quartz veins in the Harnas area, southwestern Sweden // Econ. Geol. 2003. V. 98. № 7. P. 1311–1328.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.7.1311>
- Alm E., Sundblad K.* Sveconorwegian polymetallic quartz veins in Sweden // Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte. 1994. V. 1994. № 1. P. 1–22.
- 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.
<https://doi.org/10.1007/s00410-012-0832-7>
- Brown P.* FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 1390–1393.
- 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.
- Ciobanu C.L., Cook N.J., Ehrig K.* Ore minerals down to the nanoscale: Cu-(Fe)-sulphides from the iron oxide copper gold deposit at Olympic Dam, South Australia // Ore Geol. Rev. 2017. V. 81. P. 1218–1235.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.015>
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Danyushevsky L.V., Gilbert S.* Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulphides: A LA-ICP-MS study bornite mineral chemistry // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. № 21. P. 6473–6496.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.08.021>
- Loidolt L.H.* Quartz-feldspar-carbonate bodies of the Carrizo Mountains, Texas. The University of Arizona, 1970. 126 p.
- Paton C., Hellstorm J., Paul B., Woodhead J., Hergt J.* Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data // J. Analytical Atomic Spectrometry. 2011. V. 26. № 12. P. 2508–2518.
- Raj R.M., Kumar S.N.* Characterisation of selected sulphides associated with the granitic pegmatites of Nagamalai Pudukkottai 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-Pudukkottai 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.
- Sillitoe, R.H.* Copper provinces // Society of Economic Geologists Special Publication 16, 2012. P. 1–18.
<https://doi.org/10.5382/SP.16.01>
- So C.S., Chi S.J., Shelton K.L., Skinner B.J.* Copper-bearing hydrothermal vein deposits in the Gyeongsang basin, Republic of Korea // Econ. Geol. 1985. V. 80. № 1. P. 43–56.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.1.43>
- Stepanova A.V., Stepanov V.S., Larionov A.N., Salnikova E.B., Samsonov A.V., Azimov P., Egorova S.V., Babarina I.I., Larionova Y.O., Sukhanova M.A., Kervinen A.V., Maksimov O.A.* 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.
<https://doi.org/10.1144/SP518-2021-30>
- Warr L.N.* IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineral. Mag. 2021. V. 85. № 3. P. 291–320.
<https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Yund R.A., Kullerud G.* Thermal stability of assemblages in the Cu–Fe–S system // J. Petrology. 1966. V. 7. № 3. P. 454–488.
<https://doi.org/10.1093/petrology/7.3.454>