

УДК 553.411:53.065.2

ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТО-ТЕЛЛУРИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ БЫНЬГОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

© 2012 г. Ю. И. Клюкин

Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7
E-mail: klukin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 19.03.2012 г.

В статье рассмотрен состав флюида, формировавшего мезотермальное жильное золото-теллуридное месторождение Быньги. Представлены результаты анализов валового и индивидуального состава флюида из газово-жидких включений, а также оценка P - T условий образования по доломит-кальцитовому геотермобарометру. Флюид месторождения описывается системой $H_2O-CO_2-NaCl + KCl \pm CH_4 \pm N_2$, образование Быньговского месторождения происходило при понижении температуры с 465 до 170°C и давления с 1.2 до 0.2 кбар из гетерогенного флюида. Кварцевые жилы сформированы при P - T параметрах – 360–410°C и 0.3–0.5 кбар.

Ключевые слова: *состав минералообразующей среды, генезис месторождения, газово-жидкие включения, мезотермальное золоторудное месторождение.*

ВВЕДЕНИЕ

Золото-теллуридные месторождения развиты во многих регионах мира – Болгария (Елшица), Узбекистан (Кочбулак), Россия (Прасоловское), Китай (Донгпинг), Филиппины (Акупан), Фиджи (Эмпор), Финляндия (Кутемаджарфи) и др.

Такие месторождения известны и на Урале (Быньговское, Ларьковское, Березняковское, Светлинское, Кочкарское, Гагарское, Кумакское), где они пространственно связаны с проявлениями гранитоидного магматизма повышенной основности или метасоматоза в протяженных тектонических зонах расланцевания, предположительно в связи с глубинными гидротермальными растворами [14].

Важнейшим фактором, определяющим физико-химические параметры рудоносного флюида, является уровень становления оруденения относительно становления на Урале оруденения Березняковского месторождения на Южном Урале, которое рассматривается как элемент золото-порфировой системы [11, 15].

Быньговское золоторудное месторождение является типичным представителем кварцевожильного золото-теллуридного типа мезотермального уровня становления. Наиболее детально оно описано в ряде статей [3, 4, 18]. В них охарактеризована геологическая позиция месторождения, изучены околорудные метасоматиты, принадлежащие березитлиственитовой формации, проведено детальное изучение стадийности рудообразования и минерального состава продуктивных кварцевых жил. В дру-

гих работах рассматриваются отдельные термодинамические и физико-химические аспекты рудообразования на месторождении [5, 10, 12, 20]. Однако, в целом, флюидный режим формирования золото-теллуридных руд Быньговского месторождения остается изученным в недостаточной степени и не отвечает современному уровню генетических построений. В данной статье приводятся результаты термобарогеохимического исследования состава минералообразующей среды, заключенной в газово-жидких включениях, и определены физико-химические условия образования жильного кварца.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Индивидуальные газово-жидкие включения были изучены на термостойке Linkam THMSG-600 в Институте геологии и геохимии УрО РАН. Солевой состав раствора определялся по температуре эвтектики [6]. Так как все включения принадлежат к системе H_2O-CO_2-NaCl , то концентрация соли в них оценивалась по температуре плавления газгидрата для данной системы [26]. Присутствие CO_2 определялось по поведению газового пузырька при охлаждении до температур ниже –100°C, а также при нагреве вблизи температуры тройной точки CO_2 (–56.6°C). Плотность углекислоты рассчитывалась по уравнению линии равновесия жидкость–пар [24]. Состав газовой и жидкой фаз был дополнительно оценен методом КР-спектроскопии на установке Jobin Yvon Labram Raman с конфокальной оптикой и 514-нм аргонным лазером мощностью 100 мВт. Микроэлементный состав жидкой фазы индивидуаль-

ных включений определялся методом LA-ICP-MS (квадрупольный масс-спектрометр Agilent 7500ce с системой лазерной абляции Excimer Lambda Physik GeoLas 193 нм [29]) в лаборатории исследования флюида политехнического университета и института штата Вирджиния, США.

Помимо изучения индивидуальных включений, был проведен анализ валового состава газо-жидких включений, выполненный в ЦНИГРИ, аналитик С.Г. Кряжев. Использовался метод сопряженного установления солевого, газового и микроэлементного состава минералообразующей среды, извлеченной при термическом вскрытии включений в диапазоне температур 110–400°C [13]. Метод позволяет проводить одновременный анализ газовой фазы, выделившейся в процессе нагрева, на газовом хроматографе (ЦВЕТ-100) и жидкой фазы – на жидкостном хроматографе (ЦВЕТ 3006) и ICP-MS. Кроме того, состав газовой фазы включений в кварце определялся методом газовой хроматографии на уста-

новке Цвет-800 с гелием в качестве газа-носителя в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик С.Н. Шанина). Вскрытие включений для определения валового состава производилось в температурном диапазоне 150–500°C. Методика позволяет определять H_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2O , а также углеводороды из рядов алканов, алкенов и ацетилен. Пределы обнаружения метода составляют (г/кг) 1 (H_2O), 0.01 (N_2 и CO), 0.03 (CO_2), $1.5 \cdot 10^{-5}$ (CH_4), $1.3 \cdot 10^{-5}$ (C_2H_4 и C_2H_6), $2 \cdot 10^{-5}$ (C_3H_6 , C_3H_8 , C_4H_8 , $i-C_4H_{10}$, $n-C_4H_{10}$) 0.08 (H_2).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Быньговское золото-теллуридное кварцевожильное месторождение локализуется в пределах Петрокаменской структурно-формационной зоны Среднего Урала и располагается в северном экзоконтакте Верх-Исетского массива, находясь среди вулканогенно-осадочных пород быньговской

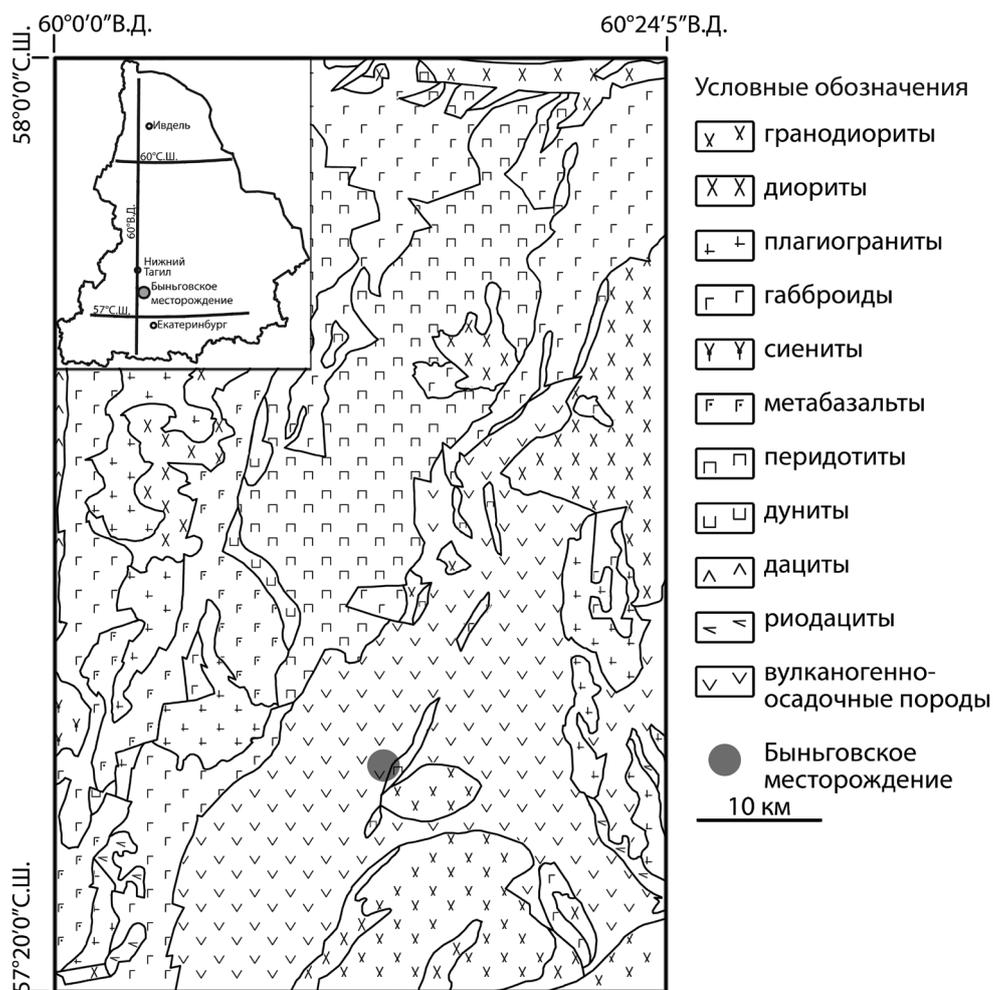


Рис. 1. Геологическая схема района месторождения, построена на основе карты геологического доизучения площадей (ГДП-200) лист О-41-ХІХ, 2001, автор Попова Н.В.

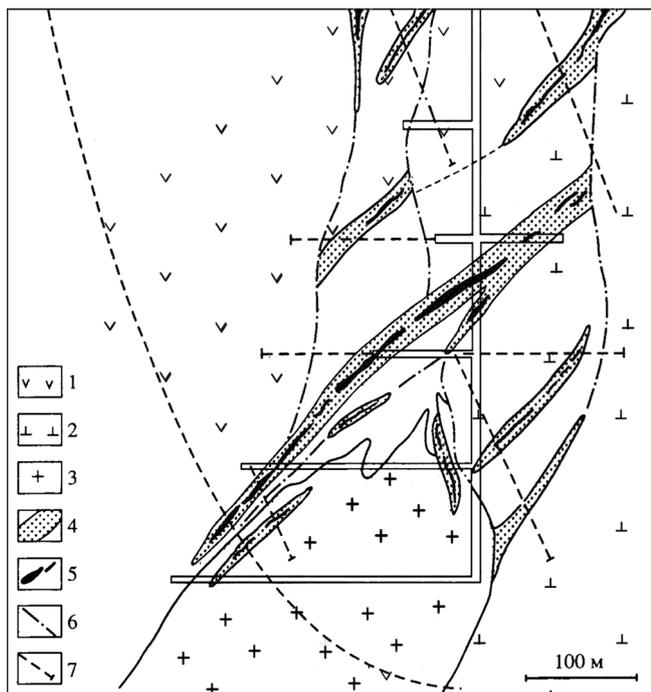


Рис. 2. Схематический геологический разрез через рудное поле Быньговского месторождения [3].

1 – породы обломочной толщи состава плагиоклаз-амфиболовых порфиритов с перслаиваниями порфиритов того же состава, 2 – тонкообломочные туфы андезит-базальтового состава, 3 – плагиогранит-порфиры, 4 – зоны березитизации, 5 – сульфидно-кварцевые жилы, 6 – разломы, 7 – буровые скважины.

серии общей мощностью 1800–2000 м (рис. 1). На площади месторождения эти породы прорваны слепым Быньговским штоком плагиогранит-порфиритов мощностью около 200 м, прослеженным по простиранию на 650 м (рис. 2). Апикальная часть штока вскрыта на глубине 350–500 м горными выработками и буровыми скважинами. С внедрением магматического тела связаны основные рудовмещающие нарушения, которые являлись путями следования и разгрузки гидротермальных растворов [3]. Формационная принадлежность пород Быньговского штока рассматривается по-разному. Одними исследователями шток относится к пановской габбро-диорит-гранитной раннеэфельской серии [8, 21], другими – к гранодиорит-гранитовой ассоциации позднего визе-серпухова [17].

В пределах рудного поля закартировано множество даек [3], разнообразных по составу и возрасту. Дорудные дайки: диабазы, диабазовые порфириты, габбро-порфириты, роговообманково-плагиоклазовые порфириты и микрограниты подверглись зеленокаменному изменению. Некоторые из них превращены в кварц-альбит-серицитовые породы. Пострудные дайки – лам-

профиры, кварцевые диорит-порфиры и диориты – пересекают рудные тела, иногда со смещением до двух метров. Мощность даек – от долей метра до нескольких метров. Разрывные нарушения в рудном поле подчинены трем пересекающимся направлениям.

В пределах месторождения также закартировано большое количество рудных зон, наиболее крупными из которых являются: Афанасьевская, № 10, Восточная, Попутная, Слепая, Надежда. Они приурочены к серии круто- и пологопадающих разрывных нарушений в экзоконтактовой части Быньговского штока.

Рудные тела месторождения представлены кварцевыми жилами и линзами, залегающими в метасоматически измененных породах, нередко превращенных в сланцы. У жил сложная форма с раздувами и пережимами, с включениями вмещающих пород. Зоны имеют, как правило, субмеридиональное простирание с углами падения более 70°.

Минерализованные зоны, обогащенные золотом, в породах штока приурочены к приконтактовым зонам брекчирования. Породы здесь интенсивно изменены гидротермальными растворами, окварцованы и минерализованы. Мощность таких зон – от 0.5 до 10 м, в среднем – 3 м, по простиранию они прослеживаются на 50–180 м.

На месторождении проявлена установленная В.Н. Сазоновым [19] закономерность, при которой эндогенное оруденение, сопряженное с метасоматитами стадии кислотного выщелачивания, размещается в предварительно пропилитизированных породах. Пропилитизация вулканогенных пород месторождения имеет площадной характер, выражена в их эпидотизации, хлоритизации, альбитизации и всегда сопровождается появлением небольшого количества карбоната в виде скоплений мелких зерен в массе породы, а на завершении процесса – тонких прожилков кварц-карбонатного состава. Процесс березитизации-лиственитизации проявлен около трещин и кварцевых жил, распространяясь от них на расстояние до 4–6 м в обе стороны. Березиты-листвениты на месторождении имеют стандартную зональность: от внешней их зоны к внутренней и к кварцевой жиле происходит последовательное исчезновение в метасоматических колонках хлорита, альбита, серицита [18]. Карбонат при этом является сквозным минералом, присутствующим также и в кварцевой жиле. Особую позицию занимают породы, сложенные крупными агрегатами кварца, хлорита и карбоната. Пространственная локализация их отчетливо не установлена. Представляется, что эти метасоматиты являются продуктом осаждения оснований (Mg, Fe, Ca и др.), вынесенных при развитии березитизации пород и обычно занимающих позицию в верхних частях вертикального метасоматического ореола [1, 23].

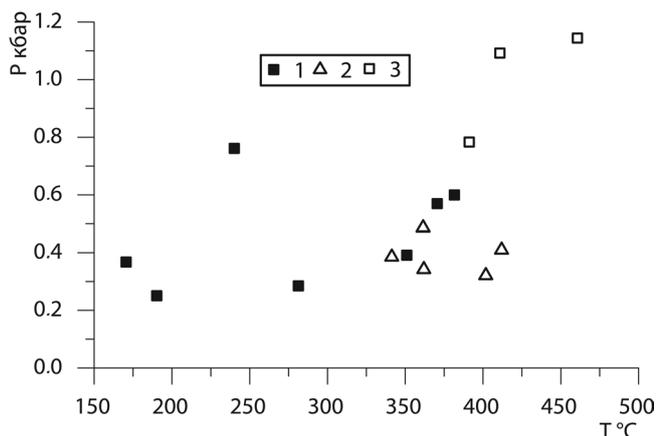


Рис. 4. *P-T* условия образования карбонатных парагенезисов, по данным доломит-кальцитового геотермобарометра [22].

1 – березиты, 2 – кварцевые жилы, 3 – березиты по [20].

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ В ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ГАЗОВО-ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЯХ

Исследованы индивидуальные включения в жильном кварце, в кварце из брекчированного березита и из кварц-карбонат-хлоритового метасоматита. Результаты исследования индивидуальных включений на термодриостолике приведены в табл. 1. Основным газовым компонентом является CO₂. Ввиду того, что включения с CO₂ часто вскрываются, не достигнув гомогенизации, из более чем 200 изученных включений температура гомогенизации (*T*_{гом}) была измерена лишь для нескольких десятков из них. Измеренные значения температуры эвтектики (*T*_{эвт} = 20–24°C) соответствуют ряду систем [6], но точку эвтектики во время криометрических измерений не всегда возможно точно установить, и замеренная *T*_{эвт} обычно выше истинной, поэтому тип солевой системы определен как H₂O–

NaCl–KCl – наиболее широко распространенной из солевых систем, присутствующих в данном диапазоне температур.

Включения в кварце брекчированного березита имеют форму отрицательного кристалла, удлиненную или близкую к изометричной, реже более сложную, размеры включений 15–20 мкм. Доля газового пузырька меняется в широких пределах, от 15 до 90 об. %, что, возможно, свидетельствует о состоянии гетерогенности флюида в результате его вскипания при захвате включений. Включения в кварц-карбонат-хлоритовом метасоматите имеют призматическую или изометричную форму и размеры, редко превышающие 7 мкм (до 10 мкм). Размер газового пузырька 10–40 об. %. Жильный кварц насыщен включениями, однако их отбор для исследования осложняется проявленными в кварце процессами пластической и хрупкой деформации, которые могут изменить как объем включений, так и их состав. Форма включений в жильном кварце разнообразна – от изометричной до призматической, удлиненной и уплощенной. Размер включений варьирует от 5 до 40 мкм. Размер газового пузырька изменяется от 10 до 40 об. %.

Включения жильного кварца и брекчированного березита при комнатной температуре трехфазные – Ж_{H₂O} + Ж_{CO₂} + Г_{CO₂} или двухфазные – Ж_{H₂O} + Ж_{CO₂}. Включения из кварц-карбонат-хлоритового метасоматита по фазовому составу определены как Ж_{H₂O} + Г_{H₂O}, присутствие CO₂ не зафиксировано.

Рассчитанная соленость флюида низкая и умеренная – от 2 до 8 мас. % экв. NaCl (рис. 5). Зависимость между соленостью и температурой гомогенизации отсутствует. По величине солености включения из брекчированных березитов и жильного кварца близки. Для кварц-карбонат-хлоритового метасоматита соленость определена по температуре таяния последней льдинки и составила 5.6–10.5 мас. % экв. NaCl (по 4 определениям).

Ранее были проведены исследования газово-жидких включений в кристалле кварца из полости в жильном кварце ж. Восточная [5]. Включения в кри-

Таблица 1. Значения температур гомогенизации и эвтектики газово-жидких включений и результаты расчета их состава

Тип породы (кол-во включений)	Брекчированный березит (13)	Кварц-карбонат-хлоритовый метасоматит (16)	Кварцевая жила (45)
Интервал <i>T</i> _{эвт} , °C	–22.7...–23.1	–22.2...–24	–20...–23.5
Интервал <i>T</i> _{гом} , °C	210–240	120–400	180–220
Vm (см ³ /моль)	25.5 ± 2.6 38.1 ± 2.6	6.1 ± 0.5	24.1 ± 3
P (г/см ³)	0.95 ± 0.04	0.87 ± 0.07	0.95 ± 0.04
xCO ₂	0.64 ± 0.06 0.26 ± 0.05	н.о.	0.17 ± 0.09
xH ₂ O	0.32 ± 0.02 0.71 ± 0.03	0.975 ± 0.007	0.82 ± 0.09
xNaCl	0.018 ± 0.005	0.025 ± 0.007	0.01 ± 0.05

Примечание. Vm – мольный объем включений, P – плотность включений, xCO₂, xH₂O, xNaCl – мольная доля соответствующих компонентов. Расчет мольной доли NaCl для кварц-карбонат-хлоритового метасоматита проведен по 4 включениям, в которых удалось измерить температуру плавления льда.

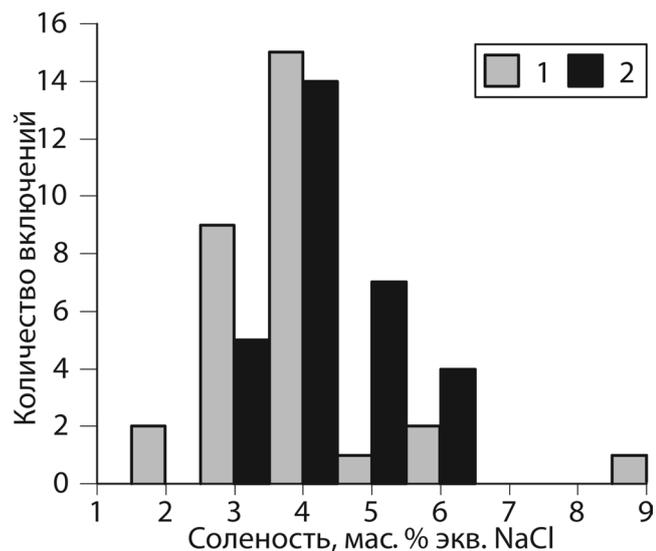


Рис. 5. Соленость жидкой фазы включений из брекчированного березита (1) и кварцевых жил (2).

сталле локализованы зонально, с увеличением количества от головки к основанию. Морфология включений разнообразна: призматические отрицательные кристаллы, овальные, реже правильные или таблитчатые. Размер их варьирует в пределах от 5 до 100 мкм, реже более. Они также принадлежат к системе H_2O-CO_2 , температура гомогенизации указана на 120–160°C для включений с низкоплотной фазой CO_2 и 230–270°C для включений с высокой плотностью CO_2 . Тип солевой системы в работе не указан.

Один из образцов жильного кварца был исследован более детально с учетом времени захвата скопления включений относительно друг друга. В этом образце были выделены скопления газовой-жидких включений и единичные включения, характеризующие различные этапы формирования образца. Скопления включений – это группа включений, захваченных в одно время, характеризующихся единством состава и очень близкими температурами гомогенизации в пределах одного скопления [27, 28]. Они локализуются в залеченных трещинах или зонах роста кристаллов.

Изученный жильный кварц содержит наложенные на него сульфиды – пирит и халькопирит, приуроченные к трещине. Пирит представлен двумя генерациями: ранней – в виде идиоморфных кристаллов с выделениями кварца и халькопирита вдоль зон роста и залеченных микротрещин, и поздней – в виде ксеноморфных агрегатов, обрастающих кристаллы первой генерации. По оптическим свойствам выделяется кварц недеформированный и деформированный (с волнистым угасанием). Недеформированный кварц присутствует в тенях давления кристаллов пирита, а также в зернах кварца, заключенных внутри пирита. Пригодные для исследований газовой-жидкие включения заключены только в недеформированном кварце (рис. 6).

Фазовый и компонентный состав включений данного образца оказался близким к данным характеристикам включений из жильного кварца. Газовая фаза во включениях занимает примерно 20–30 об. %. Плавление CO_2 происходит при температурах от –57.1 до –58.9°C. Это дает основание

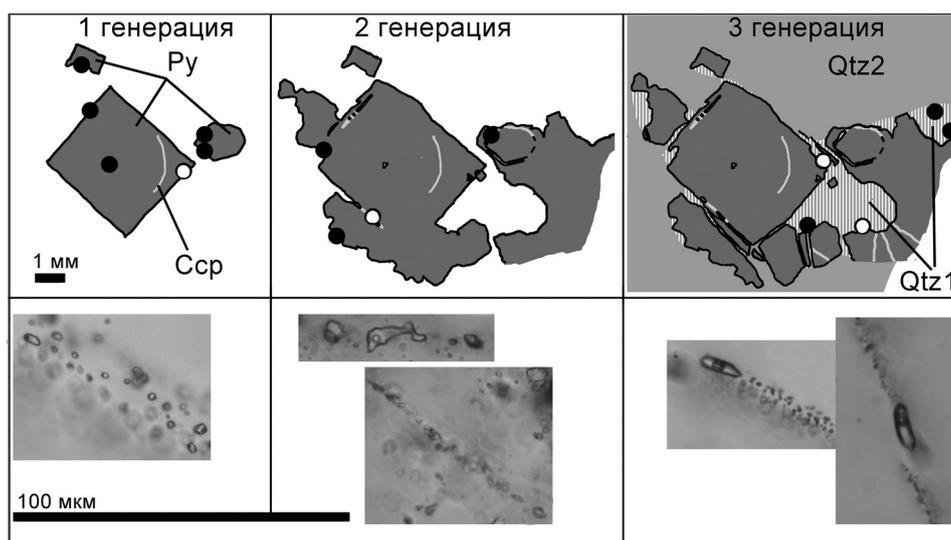


Рис. 6. Схема, демонстрирующая последовательность захвата газовой-жидких включений в кварце относительно зарождения различных генераций пирита.

Py – пирит, Csp – халькопирит, Qtz1 – недеформированный кварц, Qtz2 – рекристаллизованный кварц, закрашенный кружок – скопление ГЖВ, незакрашенный кружок – единичное ГЖВ.

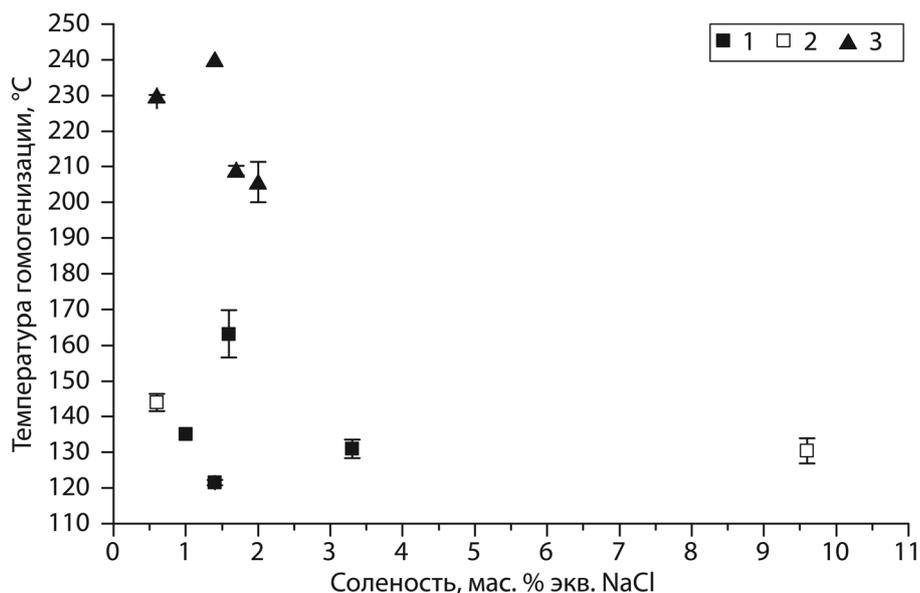


Рис. 7. Диаграмма соленость–температура гомогенизации для первой (1), второй (2) и третьей (3) генерации скоплений ГЖВ.

предположить наличие небольшой доли газов с более низкой температурой плавления, возможно CH_4 или N_2 , но КР-спектроскопия не выявила их наличия. Гомогенизация CO_2 происходила при температурах от 10.5 до 30.1 °C в жидкую фазу, следовательно, плотность CO_2 варьирует от 0.55 до 0.87 г/см³, при этом общая плотность флюида включений изменяется от 0.88 до 0.97 г/см³. Средняя плотность для флюида скоплений ГЖВ различных генераций понижается с 0.95 и 0.94 г/см³ для скоплений ранней и промежуточной генерации (1 и 2) до 0.91 г/см³ в скоплениях ГЖВ поздней генерации.

На рис. 7 приведены значения температуры гомогенизации и солености во включениях в различные периоды их захвата. Видно, что соленость от температуры гомогенизации не зависит, а темпера-

тура гомогенизации увеличивается от ранней генерации 1 к поздней 3.

Микроэлементный состав флюида во включениях по данным LA-ICP-MS (табл. 2) отражает наибольшую обогащенность его натрием, что соответствует хлоридно-натриевому типу солевой системы, установленной по температуре эвтектики. Видно также, что флюид был богат такими рудными элементами, как Cu, Fe, Zn, Pb, что отражает состав сульфидов первой и начала второй стадий минералообразования на месторождении. Более высокая концентрация Mg, Ca, и Ba во включениях генерации 1 по сравнению с генерацией 3 свидетельствует о выпадении из раствора этих элементов при отложении карбонатных минералов.

Таблица 2. Катионный состав жидкой фазы флюидных включений генераций 1 и 3 в жильном кварце по данным LA-ICP-MS, г/т

	Na	Mg	Ca	Fe	Cu	Zn	As	Sb	Ba	Pb	Bi
Генерация 1	8 031	1 152	833	509	56	652			16	34	14
	4 368	4 372	229	30		296			9	19	
	2 040	379	6 359	1 424	417	615			47	139	
	10 920		670	17					30	11	
Генерация 3	6 728			57	303	338		155			46
	5 082			1 665		1 900				893	38
	1 709		174	40	112	220				5	
	4 778	637	833	157	527	673			8	27	11
	5 687		540	304	539	847			6	37	
	5 324	325	632	61	941	585			5	23	
	5 597	283	453	69	690	768			3	20	40
	7 361	20	382	4		20	19		1	21	

Примечание. К не измерялся, Ag не обнаружено.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА
МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ ВО
ВКЛЮЧЕНИЯХ МЕТОДАМИ ВАЛОВОГО
АНАЛИЗА**

Валовые методы анализа отражают усредненный состав компонентов флюида, высвобождающегося при вскрытии включений, захваченных в различные периоды эволюции минерала-хозяина, а также, возможно, и разложения минеральных примесей в анализируемой навеске минерала. Результаты определения валового состава методом сопряженного установления солевого, газового и микроэлементного состава минералообразующей среды, извлеченной при термическом вскрытии включений в кварце метасоматитов и жил, приведены в табл. 3.

Анализ этих результатов показывает, что валовый состав водной вытяжки в пробе жильного кварца описывается системой $H_2O-NaCl-NaSO_4$, а из кварца метасоматита – $H_2O-NaCl-NaHCO_3$. Не исключено при этом, что наличие сульфат- и гидрокарбонат-ионов в вытяжке жильного кварца обусловлено растворением минеральных включений (сульфидов или сульфатов), а в вытяжке пробы кварц-хлорит-карбонатного метасоматита – карбонатов. Доминирующими микрокомпонентами флюида являются **B, Sb, As, Fe, Zn, Sr**, что соответствует присутствию в жилах турмалина и блеклых руд.

Газовый состав минералообразующего флюида определялся методом газовой хроматографии проб кварца при термодесорбции в диапазоне температур 150–500°C. Пересчет данных термодесорбции на количество выделившейся при этом воды приведен в табл. 4. Доминирующим газом во всех образцах является CO_2 , второстепенными газами являются CO , N_2 , CH_4 . Содержание тяжелых углеводородов в сумме сопоставимо с содержанием CO (рис 8). По степени окисленности газовых компонентов наиболее низкие значения имеет флюид кварца образцов, характеризующих завершающую стадию минералообразования – кварц-хлорит-карбонатный метасоматит и кристалл кварца из полости. Для двух других выделенных групп – брекчированных березитов и кварцевых жил – характерно более высокое значение степени окисленности с частичным перекрытием.

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

Приведенные выше данные показывают основные характеристики магматогенного флюида, сформировавшего Быньговское месторождение – состав флюида был $H_2O-CO_2-NaCl + (KCl \pm CH_4 \pm N_2)$,

Таблица 3. Валовый солевой, газовый и микроэлементный состав минералообразующей среды, извлеченной из включений в кварце при термическом их вскрытии в диапазоне температур 110–400°C

Тип образца	Кварц-хлорит-карбонатный метасоматит		Жильный кварц			Кварц-хлорит-карбонатный метасоматит		Жильный кварц	
	№34	№93	№93	№110		№34	№93	№110	
Образец	№34	№93	№93	№110		№34	№93	№110	
H_2O , г/г	727	1024	1024	1031					
главные компоненты, г/кг H_2O					микроэлементы, г/г				
CO_2	2.53	255.26	255.26	73.73	B	694.1	670.3	657.7	
CH_4	0.058	0.108	0.108	0.012	Sb	130.6	96.3	470.8	
Cl	14.38	4.89	4.89	4.54	As	165.5	50.3	75.7	
SO_4	0.98	13.18	13.18	10.89	Fe	109.8	52	49.7	
HCO_3	15.44	1.54	1.54	0.91	Zn	85.8	0	124.5	
Na	13.45	9.92	9.92	8.45	Sr	132.5	1.6	0	
K	0.54	0.33	0.33	0.15	Cu	0.9	0	12.1	
Ca	1.69	0	0	0	Ba	4.8	0	0	
Mg	0.02	0	0	0	Li	3.9	0.5	0.3	
CO_2/H_2O	0.001	0.104	0.104	0.03	Mn	3.6	0	0	
CO_2/CH_4	16	861	861	2225	Ni	2.2	0	0.4	
Na/K	42	51	51	93	Cr	1.3	0	0.5	
Σ солей					Rb	1.1	0.6	0	
г/кг H_2O	47	30	30	25	Mo	1.2	0.3	0.1	
мольные доли					Cs	1.3	0.3	0	
Na	0.91	0.98	0.98	0.99	W	0	1	0	
K	0.02	0.02	0.02	0.01	Tl	0.2	0	0	
Ca	0.07	0	0	0	Ag	0	0.1	0	
Cl	0.61	0.46	0.46	0.5	Sn	0	0.1	0	
SO_4	0.015	0.454	0.454	0.44	Co	0.1	0	0	
HCO_3	0.38	0.08	0.08	0.06	Pb	0	0	0.1	
					Ge	0	0.1	0	

Таблица 4. Газовый состав флюида при формировании метасоматитов и кварцевых жил Быньговского месторождения, из кварца, г/кг H₂O

Образец	H ₂ O г/кг обр	N ₂	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	СОГ
брекчированный березит													
I № 7	991	0.17	32.65	0.23	0.14	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.977
I № 11	749	0.49	17.58	2.00	0.24	0.350	0.196	0.391	0.194	0.088	0.003	0.031	0.767
I № 13	216	0.28	71.30	1.62	0.46	0.958	0.380	0.708	0.213	0.134	0.005	0.028	0.911
I № 21	96	0.63	95.10	4.58	0.94	1.365	0.500	1.063	0.313	0.240	0.010	0.125	0.869
кварц-хлорит-карбонатный метасоматит													
II № 34	1679	0.11	3.69	0.14	0.05	0.082	0.034	0.072	0.019	0.013	0.001	0.002	0.851
II № 39	59	5.93	36.95	3.90	1.19	1.864	0.729	1.492	0.508	0.271	н.о.	0.051	0.702
кристалл кварца из полости в кварцевой жиле													
III № 88	22	н.о.	141.36	26.36	3.18	4.227	1.773	3.136	1.136	0.500	н.о.	0.045	0.687
кварцевые жилы													
IV № 89	1787	0.16	16.26	0.17	0.03	0.030	0.010	0.034	н.о.	неразделенные пики		0.974	
IV № 90	2269	0.15	25.02	0.11	0.02	0.033	0.015	0.026	0.009	0.004	н.о.	0.001	0.986
IV № 91	110	н.о.	27.18	н.о.	1.09	0.782	0.236	0.791	0.364	0.155	0.009	0.027	0.821
IV № 92	3389	0.17	16.13	0.03	0.03	0.048	0.017	0.035	0.012	0.008	0.001	0.002	0.982
IV № 93	2214	0.22	23.02	0.10	0.16	0.058	0.033	0.056	0.041	0.010	0.001	0.002	0.964
IV № 94	4697	0.09	8.27	0.06	0.01	0.019	0.005	0.016	0.007	0.003	0.000	0.000	0.978
IV № 95	1154	0.33	6.89	0.24	0.07	0.076	0.030	0.063	0.021	неразделенные пики		0.893	
IV № 99	54	н.о.	61.48	6.67	1.85	2.185	0.963	1.833	0.685	неразделенные пики		0.728	
IV № 105	72	н.о.	57.36	6.53	0.56	0.625	0.361	0.597	0.069	0.097	н.о.	0.014	0.803
IV № 109	83	0.36	132.05	6.02	2.17	4.072	1.723	3.301	1.096	0.590	0.012	0.108	0.818
IV № 110	3577	н.о.	10.17	н.о.	0.02	0.024	0.006	0.020	0.009	0.003	н.о.	0.001	0.988

Примечание. N₂ не обнаружен ни в одном образце; СОГ – степень окисленности газовых компонентов CO₂/(CO₂ + CO + CH₄ + C₂H₄ + C₂H₆ + C₃H₆ + C₃H₈ + C₄H₈ + i-C₄H₁₀ + n-C₄H₁₀)

умеренной и низкой солености. КР-спектроскопия не подтвердила наличия CH₄ и N₂, что вероятно связано с недостаточным содержанием этих газов для проявления на спектре, так как наличие низкоки-

пящих газов отражено в пониженной температуре тройной точки CO₂.

Развитие месторождения характеризуется понижением температуры минералообразования от 465°C и давления 1.2 кбар до 170°C и давления 0.20–0.34 кбар. Минимальная температура минералообразования оценена по температуре гомогенизации включений для кварцевых жил как 180–220°C. Условия отложения карбонатов из кварцевых жил, оцененные по доломит-кальцитовому геотермометру, составляют 360–410°C и 0.3–0.5 кбар. Состояние флюида при указанных P-T параметрах и составе – мольной доли CO₂ более 0.17 и солености примерно 4 мас. % экв. NaCl (табл. 1) можно охарактеризовать как гетерогенное (рис. 9). Из-за ограниченной смесимости CO₂ и H₂O в системе H₂O–CO₂–NaCl ± KCl жидкая фаза представляла собой H₂O + NaCl + KCl с растворенным CO₂, а газовая фаза состава CO₂ с растворенным водным паром – газами CO, N₂, CH₄ и низкими концентрациями растворенных солей. Степень окисленности газовых компонентов флюида при минералообразовании варьировала в пределах 0.7–1. Наиболее восстановленным был флюид при отложении кварц-хлорит-карбонатного метасоматита, а также свободного роста кристаллов кварца в полостях (табл. 4).

Кварц-карбонат-хлоритовый метасоматит образовался из менее углекислотного флюида по сравнению с флюидом, из которого отлагался

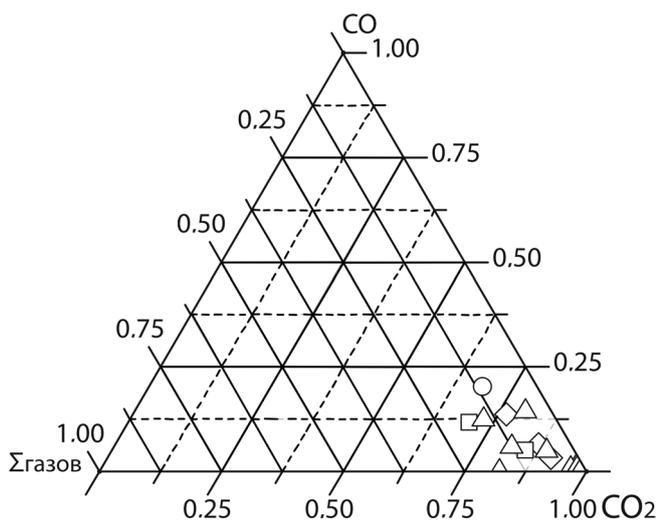


Рис. 8. Диаграмма состава мольных долей газовой фазы включений в координатах CO₂–CO–Σ(CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈, C₄H₈, i-C₄H₁₀, n-C₄H₁₀).

Кружок – кристалл кварца, квадрат – кварц-хлорит-карбонатный метасоматит, треугольник – кварцевая жила

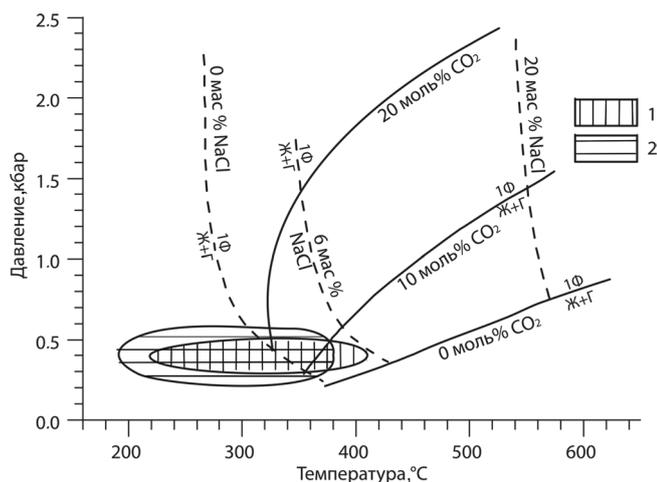


Рис. 9. *P-T* диаграмма критической поверхности системы H_2O-CO_2-NaCl при составе флюида 0, 6 и 20 масс % $NaCl$ и 0, 10 и 20 моль % CO_2 по [32].

Ж – жидкая фаза, Г – газовая фаза, 1Ф – гомогенная фаза. На диаграмму нанесены поля *P-T* параметров образования кварцевых жил (1) и брекчированных безрезитов (2) по данным определения температуры гомогенизации газовой-жидких включений и доломит-кальцитовому геотермобарометру.

жильный кварц – содержание углекислоты составило, соответственно, 2,53 г/кг и более 75 г/кг в кварц-хлорит-карбонатном метасоматите и жильном кварце (табл. 3). Низкая распространенность этого метасоматита в совокупности с его составом и локализацией в верхних частях вертикального метасоматического ореола дает основание полагать, что он формировался из остаточного флюида.

Наличие сульфат- и гидрокарбонат ионов, полученное в результате валового анализа (табл. 3), не подтверждается анализами КР-спектроскопии, проведенными более чем в 50 включениях из кварцевых жил. Возможно, появление этих ионов связано с термическим разложением микроминеральных примесей в кварце в процессе пробоподготовки, или же сульфат- и гидрокарбонат-ионы присутствуют в наиболее мелких включениях, исследование которых оптическими методами невозможно. В то же время, известно, что при понижении температуры ниже $350^\circ C$ **главная роль транспорта золота** переходит от комплекса $AuCl_2$ к комплексам $Au(HS)_2$, $AuHS$ и $AuOH$ [33].

Результаты измерений температуры гомогенизации и солёности флюидных включений в минералах Быньговского месторождения были сопоставлены с аналогичными данными для различных мезотермальных золоторудных месторождений [9, 25, 30, 34, 35], а также Березняковского золото-теллуридного месторождения эпитеpмального уровня становления [16, 31] (рис. 10).

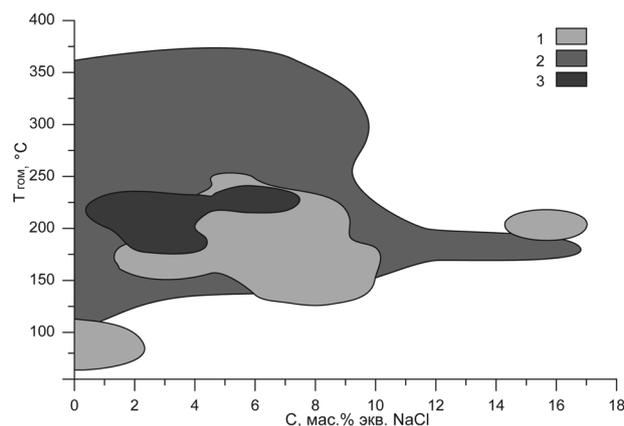


Рис. 10. Диаграмма температура гомогенизации ($T_{\text{гом}}$)–солёность (C) газовой-жидких включений из минералов золоторудных мезо- и эпитеpмальных месторождений.

1 – Березняковское эпитеpмальное месторождение, 166 точек; 2 – мезотермальные месторождения Березовское (Урал), Флин Флон (Канада), Гибонг, Самгванг (Южная Корея), Сао Луи Кратон (Бразилия), 576 точек; 3 – Быньговское месторождение, 37 точек.

Как видно на рис. 10, поля мезо- и эпитеpмальных месторождений значительно перекрываются, что говорит о схожих параметрах минералообразующей среды. Быньговское месторождение на диаграмме находится в поле мезотермальных месторождений и значительно перекрывается с полем эпитеpмального Березняковского месторождения, характеризующаясь более низкими значениями солёности.

Основные рудообразующие компоненты флюидов мезотермальных золоторудных месторождений описываются системой $H_2O-CO_2-NaCl \pm CH_4 \pm N_2$ [9, 25, 30, 34, 35]. В процессе эволюции флюида наблюдается снижение доли CO_2 во флюиде и переход его в водно-солевой на заключительных стадиях формирования месторождений [7]. В целом очевидно, что по составу флюида Быньговское месторождение соответствует месторождениям мезотермального уровня. По сравнению с эпитеpмальным Березняковским месторождением, Быньговское сформировано из менее углекислотного флюида. Так, в работе [16] указано, что в Березняковском месторождении углекислотные включения встречаются крайне редко, что показывает наличие менее углекислотного флюида у эпитеpмальных месторождений по сравнению с мезотермальными.

Таким образом, образование Быньговского месторождения происходило при понижении температуры с 465 до $170^\circ C$ и давления с 1.2 до 0.2 кбар из гетерогенного флюида, принадлежащего системе $H_2O-CO_2-NaCl (+KCl \pm CH_4 \pm N_2)$, возможно в присутствии сульфат- и гидрокарбонат-ионов. Кварцевые жилы сформированы при следующих *P-T* параметрах – $360-410^\circ C$ и 0.3–0.5кбар.

Автор выражает благодарность профессору Р. Дж. Боднару за возможность проведения исследований в лаборатории флюида Вирджинского Политехнического Университета, и заведующему лабораторией геохимии и рудообразующих процессов В.В. Мурзину за предоставление коллекции образцов и поддержку работы на всех стадиях ее выполнения.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 27 (проект 12-П-5-2015) и молодежного гранта № 10-5-НП-400, финансируемых УрО РАН и гранта РФФИ 12-05-00132а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтина А.П., Сазонов В.Н. Околорудный метасоматоз на одном золоторудном месторождении // Рудоносные метасоматиты Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 52–67.
2. Берзон Р.О. Особенности геологического строения. Минералогия и геохимия Быньговского золоторудного месторождения. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГиГ УНЦ АН СССР, 1973. 251 с.
3. Берзон Р.О. Быньговское месторождение золото-сульфидно-кварцевой рудной формации (Урал) // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37, № 5. С. 417–426.
4. Берзон Р.О., Бушляков И.Н. О связи оруденения с плагиогранит-порфирами (на примере Быньговского золоторудного месторождения) // Тр. ИГиГ УНЦ АН СССР. Вып. 97. 1973. С. 56–62.
5. Берлимбае О.М., Мурзин В.В., Петров Е.А. Термодинамические условия формирования жильного кварца Быньговского золоторудного месторождения (Средний Урал) по данным исследования газожидких включений // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2002. С. 170–172.
6. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газожидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
7. Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных регионах // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. С. 3–28.
8. Ведерников В.В. О возрасте вмещающих пород Быньговского месторождения // Ежегодник-1981. Екатеринбург: ИГиГ УНЦ АН СССР, 1982. С. 121–122.
9. Викентьева О.В., Бортников Н.С., Мурзин В.В., Намумов В.Б. Флюидный режим минералообразования на Березовском золоторудном месторождении // Ежегодник-1999. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 224–227.
10. Грабежесев А.И. Об одинаковом интервале температур формирования уральских золоторудных и редкометалльных гидротермальных месторождений и соответственно березитов и грейзенов // Ежегодник-1972. Свердловск: ИГиГ УНЦ АН СССР, 1973. С. 154–157.
11. Грабежесев А.И., Сазонов В.Н., Мурзин В.В. и др. Березняковское золоторудное месторождение (Южный Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. С. 38–52.
12. Клюкин Ю.И., Мурзин В.В. Карбонаты Быньговского золоторудного месторождения на Среднем Урале и P-T условия их образования // Уральская минералогическая школа-2009. Под знаком халькофильных элементов. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2009. С. 109–113.
13. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2006. № 4. С. 30–36.
14. Мурзин В.В., Смирнов В.Н., Сазонов В.Н. и др. Минералогические особенности золотого оруденения, связанного с магматизмом габбро-гранитоидного и тоналит-гранодиоритового типов (на примере Петрокаменско-Верхотурской структурно-формационной зоны, Средний Урал) // Известия УТГГА. 1996. С. 45–48.
15. Плотинская О.Ю., Грознова Е.О. Условия рудообразования на эпитермальном Au-Ag-Se-Te месторождении Березняковское, Южный Урал // Материалы XIII международной конференции по термобарогеохимии и IV Симпозиума APFIS. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 101–103.
16. Плотинская О.Ю., Грознова Е.О., Коваленкер В.А. и др. Минералогия и условия образования руд Березняковского рудного поля (Южный Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. С. 414–443.
17. Рапопорт М.С. Гранитоидный магматизм и золотое оруденение Среднего Урала // Мат.-лы Всерос. научн. конф. студентов, аспирантов, научных сотрудников и преподавателей ВУЗов. Екатеринбург: УТГГА, 1996. С. 7–10.
18. Сазонов В.Н. Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение. Свердловск: УрО АН СССР, 1984. 208 с.
19. Сазонов В.Н. Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов (геодинамические обстановки и РТХ-параметры формирования, прогностическое значение). Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1998. 181 с.
20. Сазонов В.Н., Таланцев А.С., Илясова Л.К. РТХ-условия формирования месторождений золото-сульфидно-кварцевой формации Урала // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. Новосибирск: Наука, 1979. С. 145–154.
21. Смирнов В.Н., Ведерников В.В. Магматизм Петрокаменской структурно-формационной зоны (Средний Урал). Свердловск: УрО АН СССР, 1987. 71 с.
22. Таланцев А.С. Геотермобарометрия по доломит-кальцитовым парагенезисам. М.: Наука, 1981. 136 с.
23. Чекваидзе В.Б. Вертикальная метасоматическая зональность березитов на золоторудных месторождениях // Отечественная геология, 2009. № 2. С. 42–46.
24. Angus S. Armstrong B., de Reuk K.M. et al. International thermodynamic tables of the fluid state: Carbon dioxide. Pergamon, 1976. 385 p.
25. Ansdell K.M., Kyser T.K. Mesothermal gold mineralization in a Proterozoic greenstone belt; western Flin Flon Domain, Saskatchewan, Canada // Econ. Geol. 1992. V. 87. P. 1496–1524.
26. Diamond L.W. Stability of CO₂ clathrate hydrate + CO₂ liquid + CO₂ vapour + aqueous KCl-NaCl solutions:

- Experimental determination and application to salinity estimates of fluid inclusions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. P. 273–280.
27. *Goldstein R.H.* Petrographic analysis of fluid inclusions // *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*. Mineralogical Association of Canada., Short course series / ed. I. Samson, A. Anderson, D.D. Marshall. 2003. V. 32. P. 9–53.
 28. *Goldstein R.H., Reynolds T.J.* Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals, *SEPM short course 31*. SEPM, 1994. 199 p.
 29. *Gunther D., Frischknecht R., Heinrich C.A., Kahlert H.J.* Capabilities of an Argon Fluoride 193 nm Excimer Laser for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Microanalysis of Geological Materials // *J. Anal. At. Spectrom.* 1997. № 12. P. 939–944.
 30. *Klein E.L., Fuzikawa K., Koppe J.C., Dantas M.S.S.* Fluids associated with the caxias mesothermal gold mineralization, São Luis Craton, northern Brazil: a fluid inclusion study // *Revista Brasileira de Geociências*. 2008. V. 30. P. 322–326.
 31. *Lehmann B., Heinhorst J., Hein U. et al.* The Bereznjakovskoje gold trend, Southern Urals, Russia // *Mineral. Depos.* 1999. V. 34. P. 241–249.
 32. *Schmidt C., Bodnar R.J.* Synthetic fluid inclusions: XVI. *PVTX* properties in the system H₂O–NaCl–CO₂ at elevated temperatures, pressures, and salinities // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000. V. 64. P. 1853–3869.
 33. *Williams-Jones A.E., Bowell R.J., Migdisov A.A.* Gold in Solution // *Elements*. 2009. № 5. P. 281–287.
 34. *Yoo B.C., Lee H.K., White N.C.* Gold-Bearing Mesothermal Veins from the Gubong Mine, Cheongyang Gold District, Republic of Korea: Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies // *Econ. Geol.* 2006. V. 101. P. 883–901.
 35. *Yoo B.C., Lee H.K., White N.C.* Mineralogical, fluid inclusion, and stable isotope constraints on mechanisms of ore deposition at the Samgwang mine (Republic of Korea) – a mesothermal, vein-hosted gold-silver deposit, // *Mineral. Depos.* 2010. V. 45. P. 161–187.

Рецензент Н.Н. Анкушева

Fluid condition of formation of Byngi deposit gold-tellurium mineralization (Middle Ural)

Y. I. Klyukin

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

The Byngi deposit consists of several gold-bearing mesothermal quartz veins with the tellurium mineralization. The results of bulk and individual analyses of fluid inclusions, and the estimation of deposit forming *P-T* conditions determined by dolomite-calcite geothermobarometer are considered in the article. The mineral-forming environment was heterogeneous and described by the system H₂O–CO₂–NaCl + KCl ± CH₄ ± N₂. *P-T* parameters during the formation was reduced from 465 to 170°C and from 1.2 to 0.2 kbar. The quartz veins were formed under the temperature of 360–410°C and pressure 0.3–0.5 kbar.

Key words: composition of mineragenesis environment, genesis of deposit, vapor-liguvua inclusions, mesothermale gold deposit.