

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ БАДРАНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (Якутия)

А.А. Оболенский, Л.В. Гущина, Г.С. Анисимова*, Е.С. Серкебаева*,
А.А. Томиленко, Н.А. Гибшер

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

**Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия*

Выполнено физико-химическое моделирование процессов минералообразования Бадранского Au-кварцевого поднадвигового месторождения, опирающееся на исследования флюидных включений в кварце методами КР-спектроскопии, газовой хроматографии, термо- и криометрии, которые показывают, что высокопродуктивные золоторудные кварцевые жилы (серый кварц) Бадранского месторождения на ранней I стадии были образованы из гетерогенного флюида при температурах ниже 320 °С и давлениях от 2.0 до 0.1 кбар и ниже при активном участии CO₂, N₂ и CH₄, а соленость этого раствора достигала 10 мас.% экв. NaCl. Минералообразование II стадии (продуктивной на Au) происходило из гомогенного умеренно хлоридно-сульфидного раствора, оставшегося после гетерогенизации исходного флюида, от температуры 300 до 100 °С при P = 0.1 кбар с образованием молочно-белого кварца. Минералообразование прозрачного кварца III стадии, малопродуктивной на Au, происходило также из гомогенных хлоридных растворов с соленостью ниже 4.5 мас.% экв. NaCl, при температурах ниже 200 °С и давлениях менее 0.1 кбар.

Приводятся результаты компьютерного моделирования физико-химических условий концентрированного отложения Au в рудах Бадранского месторождения в рамках сложной геохимической системы Au—Fe—Cu—Pb—Zn—As—Sb—Hg—Ag—H₂O—Cl—H₂S—CO₂ с помощью программного комплекса «Chiller». Для моделирования процессов минералообразования использованы модели: 1) взаимодействия раствор—порода; 2) конденсации газовой фазы (для I стадии); 3) простого охлаждения умеренно хлоридно-сульфидного раствора (для II стадии); 4) простого охлаждения; 5) смешения низохлоридно-сульфидного раствора с кислыми метеорными водами (для III стадии). Они отражают последовательность формирования жил рудообразующей системы и метасоматические изменения вмещающих пород на глубоких горизонтах месторождения.

Золоторудные месторождения, флюидные включения, состав гидротермальных растворов, термодинамические модели.

PHYSICOCHEMICAL MODELING OF MINERAL FORMATION PROCESSES AT THE BADRAN GOLD DEPOSIT (Yakutia)

A.A. Obolensky, L.V. Gushchina, G.S. Anisimova, E.S. Serkebaeva, A.A. Tomilenko, and N.A. Gibsher

The physicochemical modeling of mineral formation processes at the Badran subthrust gold-quartz deposit was performed, based on a study of fluid inclusions in quartz by Raman spectroscopy, gas chromatography, thermometry, and freezing. The results show that at stage I, highly productive gold-bearing quartz veins (gray quartz) of the deposit formed from heterogeneous fluid at <320 °C and 2.0–0.1 kbar with the active participation of CO₂, N₂, and CH₄; the salinity of this solution reached 10 wt.% NaCl-equiv. At stage II (Au-productive), milky-white quartz was produced from the homogeneous medium-chloride-sulfide solution which remained after the heterogenization of the initial fluid, at 300–100 °C and 0.1 kbar. At stage III (with low Au production), clear quartz formed from homogeneous chloride solutions with salinity of <4.5 wt.% NaCl-equiv. at <200 °C and <0.1 kbar.

The physicochemical conditions of Au concentration within the complex geochemical system Au—Fe—Cu—Pb—Zn—As—Sb—Hg—Ag—H₂O—Cl—H₂S—CO₂ at the Badran deposit was modeled using the Chiller software. The following models were used: (1) solution–rock interaction and (2) condensation of gas phase (for stage I); (3) simple cooling of medium-chloride-sulfide solution (for stage II); (4) simple cooling and (5) mixing of low-chloride-sulfide solution with acid meteoric waters (for stage III). The models show the sequence of vein formation in the ore-producing system and the host-rock metasomatism in the deep horizons of the deposit.

Gold deposit, fluid inclusion, composition of hydrothermal solution, thermodynamic model

складчато-надвигового пояса. Далее к СВ располагается Чыбагалахская металлогеническая зона, пространственно совпадающая с Главным батолитовым поясом в пределах Полоусно-Дебинского террейна аккреционного клина, сложенного преимущественно турбидитами. Формирование Главного батолитового пояса определяет металлогеническую специализацию этой зоны с развитием редкометалльных (Sn-W-кварцевых, Sn-кварцево-жильных, В-Sn-скарновых) и Au-редкометалльных месторождений [Тектоника..., 2001]. В отличие от Чыбагалахской зоны, в Адыча-Нерской зоне широко развиты Au-кварцевые малосульфидные метаморфогенно-гидротермальные месторождения, локализованные в надвиговых структурах, что позволяет отнести эти месторождения к типичным орогенным месторождениям в понимании Д. Гровса и др. [Groves et al., 1998]. Образование рудоконтролирующих и рудовмещающих надвиговых структур Адыча-Нерской металлогенической зоны связано с коллизией Колымо-Омолонского супертеррейна с Верхоянской пассивной континентальной окраиной Сибирского кратона в позднеюрско-раннемеловое время. Формирование складчато-надвигового пояса сопровождалось региональным метаморфизмом фации зеленых сланцев. Локально проявленный вдоль надвиговых структур коллизионный динамометаморфизм обусловил развитие метаморфогенно-гидротермального рудообразования с мобилизацией и частичным переотложением золота из углеродистых толщ верхоянского комплекса, для которых характерно его повышенное содержание за счет керогена углеродистого вещества ($Au = 0.24—0.33$ г/т) и марказита ($Au = 2$ г/т) [Кокин, 1985; Константинов, Косовец, 1996; Амузинский, 2005; Татарин, Яловик, 2006; и др.]. Породы верхоянского комплекса могут рассматриваться как один из возможных источников золота в процессах рудообразования.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бадранское золоторудное месторождение является эталонным модельным типом поднадвиговых Au-кварцевых малосульфидных орогенных месторождений новых для Якутии [Тектоника..., 2001; Амузинский, 2005]. Оно приурочено к Бадран-Эгеляхскому взбросовдвигу кулисного строения, общая протяженность которого составляет более 20 км, угол падения сместителя от 10 до 45° к СВ. Мощность зоны динамометаморфизма от 0.6 до 16.0 м, контакты четкие и сопровождаются глиной трения. Морфология зоны изменяется по падению и простиранию, образуя флексурные изгибы. Установленная амплитуда горизонтального перемещения блоков 600—1300 м [Неустроев, 2003]. Несущий золотое оруденение участок Бадран-Эгеляхского взбросовдвиг выделяется как минерализованная зона Надвиговая. Она прослежена по поверхности на 5—6 км, подземными горными выработками до глубины 360 м и скважинами до 1200 м. По данным Ю.В. Фридовского [1999], лежащее крыло надвига сложено обломочными породами норийского возраста, а висячее — преимущественно отложениями карнийского возраста. Связь месторождения с магматическими породами не установлена, так как ближайший массив гранитоидов расположен в 30 км к юго-востоку от месторождения. Кварцевые жилы плитообразной формы и прожилки приурочены к минерализованным зонам дробления в плоскости взбросовдвиг и прослежены по падению до 800 м, а по простиранию на 6 км. Кварцевые жилы в зоне разлома образуют разобщенные стержневые Au-рудные тела мощностью в раздувах до 4.2 м и длиной до 200 м. Жилы сопровождаются маломощными кварцевыми прожилками, количество которых резко возрастает в местах их выклинивания. При этом массивные и грубополосчатые текстуры жил сменяются прожилковыми и брекчиевыми. Наряду с жильными и прожилковыми рудными телами отмечается вкрапленное оруденение — минерализованные будины и тектониты. Максимальные концентрации Au приурочены к массивным кварцевым жилам [Фридовский, 1999]. Для массивных кварцевых руд характерно содержание золота более 100 г/т, для брекчиевых и полосчатых — 10—25 г/т. Наиболее низкими содержаниями до 1 г/т характеризуются метасоматические вкрапленные руды, содержащие не более 1—3 % сульфидов, в то время как в богатых рудах их около 10 % [Анисимова и др., 1998].

В целом в пределах зоны Надвиговая установлено неравномерное распределение Au-рудной минерализации. Выделены и с различной детальностью изучены четыре рудных столба. Согласно Р.Г. Неустроеву [2003], наиболее обогащен золотом рудный столб I. Обогащенные участки приурочены к его приосевой части, отличающейся повышенной мощностью кварцевых жил. В поперечном разрезе рудного тела содержание золота в кварцевых жилах выше, чем в оруденелых тектонитах, на 1—2 порядка. Положение рудного столба II контролируется участком повышенной мощности минерализованной зоны. Он представлен оруденелыми окварцованными милонитами и милонитизированными породами, которые вмещают кварцевые жилы. Рудный столб III фиксируется хорошо выраженным флексурным изгибом осевой плоскости зоны Надвиговая. В пределах структуры повышена мощность зоны и широко развиты короткие мощные кварцевые жилы, с которыми связано в основном золотое оруденение. Жилы сопровождаются слабооруденелыми окварцованными милонитами и милонитизированными породами. Наличие рудного столба IV прогнозируется по вскрытой в долине руч. Безводный кварцевой жиле. Мощность минерализованной зоны 6.0—7.0 м. Участки между рудными столбами сложены безрудными тектонитами.

ми и милонитами, а также милонитизированными и рассланцованными осадочными породами, несущими прожилковое окварцевание и иногда маломощные кварцевые жилы с рядовым содержанием золота [Неустроев, 2003].

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД И СТАДИИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

В последовательности процесса минералообразования на месторождении Бадран выделяются три стадии минерализации, в течение которых сформировались шесть минеральных ассоциаций. Всего в рудах диагностировано около 50 минералов. Умеренно продуктивная I стадия включает ассоциацию метасоматических высокозолотоносных пирита и арсенопирита в околорудно-измененных осадочных породах и высокосульфидную арсенопирит-карбонат-кварцевую ассоциацию жильного выполнения; II стадия объединяет наиболее продуктивные умеренно сульфидные ассоциации: халькопирит-галенит-альбит-доломит-кварцевую и сфалерит-тетраэдрит-серицит-кварцевую и III стадия представлена поздней непродуктивной на золото серебро-кварцевой и малосульфидной антимонит-кварцевой ассоциацией. Гипогенные руды содержат наибольшее количество сульфидов в пределах рудных столбов. Детально минеральный состав руд охарактеризован в работах Г.С. Анисимовой с соавторами [1983, 1993, 2008; Анисимова и др., 1998, 2006]. Необходимо подчеркнуть, что гипергенные преобразования руд прослеживаются по падению рудных тел до глубины 310 м от поверхности. Причем в зоне окисления сульфиды и жильные карбонаты полностью окислены, а также присутствует видимое самородное золото. В первичных рудах преобладает тонкодисперсное золото, связанное преимущественно с ранними пиритом и арсенопиритом [Анисимова и др., 1998, 2006; Анисимова, 2008].

В течение I стадии сформированы две взаимосвязанные минеральные ассоциации: вкрапленность высокозолотоносных пирита и арсенопирита в рудовмещающих березитах и карбонат-кварцевая в кварцевожильных зонах. Типоморфными минералами ранней ассоциации являются пирит и арсенопирит, отличающиеся высокой золотоносностью. Они образуют рассеянную вкрапленность во вмещающих породах. С пиритом и арсенопиритом ассоциируют кварц, хлорит и серицит. Данная ассоциация, несомненно, является самой ранней и она развита повсеместно в минерализованной зоне. Ассоциация жильного выполнения арсенопирит-пирит-карбонат-кварцевая по распространенности и количеству является ведущей для ранней стадии, развита она также повсеместно. Золото данной ассоциации представлено обычно идиоморфными кристаллами и комковидными скоплениями.

Во II стадию происходит формирование двух пространственно зонально-сопряженных минеральных ассоциаций: халькопирит-галенит-альбит-карбонатной и сфалерит-тетраэдрит-серицит-кварцевой. Ассоциация галенита и халькопирита на верхних горизонтах месторождения преимущественно распространена на флангах зоны Надвиговой, а с глубиной она установлена и в центральных частях рудных столбов. Ее типоморфными минералами являются халькопирит, галенит, золото, доломит, альбит. Самородное золото представлено преимущественно комковидными, реже интерстициальными агрегатами в микродрузовых полостях. Сфалерит-тетраэдрит-серицит-карбонатная минеральная ассоциация с включениями редких сульфоантимонитов приурочена к центральному наиболее рудоносному интервалу зоны Надвиговой. Локализация указанных минералов, как правило, определяется положением рудных столбов, представляющих собой милонитизированный до порошка кварц. Типоморфными минералами являются сфалерит, тетраэдрит, золото и серицит. Самородное золото ассоциации имеет интерстициальную форму, форму выполнения микродрузовых полостей, лентовидную и комковидную с ограниченными выступами.

В III стадию сформировались киноварь-антимонит-карбонат-кварцевая и серебро-кварцевая минеральные ассоциации, пользующиеся ограниченным распространением. Причем прожилки антимонита с водяно-прозрачным кварцем пересекают ранее отложенные руды. Зерна киновари были обнаружены лишь в приповерхностных горизонтах рудных столбов, а диккит замещает гидрослюды березитизированных пород. Самородное золото этой ассоциации не выявлено, однако в эту же стадию отлагается серебряная ассоциация, типоморфными минералами которой являются фрейбергит, аргентит, высокосеребристая блеклая руда и низкопробное ртутистое золото. Данная ассоциация развита локально в рудах рудных столбов месторождения.

Четкие взаимоотношения между минеральными ассоциациями установлены в частных случаях, поэтому последовательность рудообразования на приведенной парагенетической схеме (рис. 2) существенно генерализована. Наиболее продуктивными на золото являются ранняя пирит-арсенопирит-кварцевая с тонкодисперсным золотом, галенит-халькопирит-альбит-доломит-кварцевая и сфалерит-тетраэдрит-серицит-кварцевая минеральные ассоциации, а наиболее богатыми — рудные тела, сложенные этими последовательно отложенными минеральными ассоциациями.

На Бадранском месторождении широко проявлены зоны гипергенных изменений первичных руд, связанные с развитием двух главных минеральных ассоциаций: серно-сульфатного и окисного составов.

Минерал	Минеральная ассоциация					
	Метасом. пирит и арсенопирит	Арсенопирит-пирит-карбонат-кварцевая	Халькопирит-сфалерит-альбит-кварцевая	Тетраэдрит-серицит-кварцевая	Серебряно-кварцевая	Антимонит-карбонат-кварцевая
	Стадия I		Стадия II		Стадия III	
Золото	■	■	■	■	■	
Галенит			■	■	■	■
Сфалерит			■	■	■	■
Халькопирит			■	■	■	■
Пирит	■	■	■	■	■	■
Марказит	■	■				
Арсенопирит	■	■	■	■	■	■
Тетраэдрит			■	■	■	
Фрейбергит				■	■	
Бурнонит				■	■	
Буланжерит				■	■	■
Рутил	■	■				
Кварц	■	■	■	■	■	■
Кальцит	■	■	■	■	■	■
Доломит	■					
Серицит	■	■	■	■		
Хлорит	■	■				
Альбит		■	■			
Ортоклаз		■	■			
Температура гомогенизации ГЖВ, °С	180–320		100–180		< 200	
Изотопный состав углерода карбонатов, ‰		7.82		3.3		
Проба Au, ‰		656–900	607–920	750–998	553–832	

Рис. 2. Парагенетическая схема последовательности образования основных минералов месторождения Бадран, по [Анисимова, 1998].

Ассоциация серно-сульфатного состава широко развита в центральной части рудного поля по зоне Надвиговой. Типоморфными минералами данной ассоциации являются гипс, ярозит, ковеллин и халькозин. По результатам бурения наличие этих минералов фиксируется повсеместно в рудах зоны Надвиговой до самых глубоких разведанных горизонтов, т.е. до глубины 240 м. Гипс широко развит и в породах висячего крыла этой зоны, где наблюдается обычно в виде тонких прожилков и вкраплений в цементе обломочных пород. Ярозит образует разрозненные мелкозернистые агрегаты. В этой ассоциации отмечаются скородит, который замещает арсенопирит, и переотложенное самородное золото губчатого строения, имеющее весьма высокую пробу (997).

Значительно интенсивнее развита ассоциация оксидного состава. Минералы этой ассоциации представлены гетитом, гидрогетитом, каолинитом, малахитом, азуритом и сервантитом. Типоморфные минералы этой ассоциации обычно развиваются при замещении пирита, арсенопирита, халькопирита, доломита, слюдяных минералов. По пириту иногда развиваются псевдоморфозы, состоящие из смеси гетита, гидрогетита и лепидокрокита. Малахит и азурит замещают блеклую руду и халькопирит, а сервантит развивается по антимониту. Каолинит образует обычно прожилки и прожилковидные неправиль-

ные выделения во вмещающих породах, причем характерна его избирательная приуроченность к карбонату, который он обычно замещает. К данной ассоциации, возможно, относится и полианит, который встречен в жилах субширотного простирания на правобережье руч. Бадран, в его верховьях. Полианит отмечается в хлорит-карбонат-кварцевых прожилках и маломощных жилах. Кварц представлен крупношестоватым агрегатом, который из-за примеси полианита имеет грязно-серый цвет. Кальцит образует в кварце гнезда размером до 10 см, белого или кремового цветов. На глубоких горизонтах из гипергенных минералов отмечаются гидроксиды и оксиды железа и гипс.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДРАН

На месторождении Бадран главным жильным минералом является кварц, на долю которого приходится от 70 до 90 % жильной массы. Флюидные включения изучались в кварце I, наиболее крупном, и III рудных столбов. Из 22 образцов кварца было изготовлено 44 кварцевых пластинки толщиной 0.3—0.5 мм, полированных с двух сторон. При исследовании пластинок под микроскопом в проходящем свете было установлено, что кварц представлен тремя генерациями: серым кварцем-I, молочно-белым кварцем-II и прозрачным кварцем-III.

Серый кварц-I, как правило, слагает ядерную часть зональных зерен кварца и, по-видимому, является ранним образованием. Этот кварц насыщен флюидными включениями и твердыми частичками вещества черного цвета, которые и определяют его серую окраску. Размер и форма твердых частичек в сером кварце самая разнообразная. Совместно с твердыми частичками в нем присутствуют и флюидные включения, которые встречены в виде изолированных отдельных включений либо их групп, не приуроченных к трещинам. Эти включения отнесены к первичным, они имеют форму негативного кристалла, округлые или неправильные, размер их колеблется от 5 до 15 мкм. В двух образцах № 8 и № 10 размер флюидных включений не превышает 3 мкм, что не позволило провести в них термометрические исследования. Вторичные включения приурочены к залеченным трещинам, которые секут границы кварцевых зерен, имеют округлую форму и размер их редко превышает 3—5 мкм.

Серый и молочно-белый кварц-II отчетливо различаются только под микроскопом. В сером кварце-I на основании фазовых соотношений во флюидных включениях при комнатной температуре и ниже 0 °C включения подразделены на три типа: углекислотно-водные с переменным соотношением фаз; существенно газовые (газовая фаза преобладает, а вода присутствует в виде каемок у стенок вакуолей) и существенно водные (водная фаза преобладает над газовой). Выделенные типы флюидных включений могут присутствовать как в одной группе, так и отдельно, тяготея к зонам роста либо к внутризерновым трещинам, что свидетельствует об их первичном образовании из двухфазного флюида.

Молочно-белый кварц-II выделяется либо в пространстве между зернами кварца-I, либо слагает периферические зоны роста крупных зерен кварца, ядерная часть которых представлена серым кварцем. В молочно-белом кварце твердые частички черного цвета встречаются редко. Во флюидных существенно водных включениях объем жидкой фазы всегда преобладает над газовой. Соотношение фаз (жидкость—газ) практически сохраняется постоянным.

Прозрачный кварц-III в ассоциации с карбонатами выделяется в виде тонких прожилков, секущих как серый, так и молочно-белый кварц. В минералах этих прожилков захвачены мельчайшие существенно водные включения, в которых водная фаза значительно преобладает над газовой. Из-за мельчайших размеров флюидных включений в кварце-II не удалось провести термометрических исследований.

Методы исследования флюидных включений. Микротермометрические исследования индивидуальных флюидных включений проводились в микротермокамере конструкции Н.Ю. Осоргина и А.А. Томиленко [А.с., 1990]. Точность термометрических замеров контролировалась регулярной калибровкой термо- и криокамер, используя стандартные флюидные включения и синтетические вещества. Температуры в интервале от 31 до 150 °C замерялись с точностью ± 0.1 °C, а в интервале от 100 до 700 °C с точностью ± 5 °C. Концентрация и солевой состав водной фазы флюидных включений определялись методом криометрии [Борисенко, 1977; Roedder, 1984].

Микро-КР анализ газовой фазы индивидуальных флюидных включений был выполнен в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) на одноканальном КР-спектрометре RAMANOR U-1000, фирмы «Jobin Yvon» с использованием аргонового лазера по методике, описанной Ж. Дюбесси [Dubessy et al., 1989].

Давление минералообразующих флюидов определялось по диаграммам, построенным по программе расчета критических параметров и изохор захвата флюидных включений смеси $\text{CO}_2\text{—CH}_4\text{—N}_2$ в минералах [Свердлова и др., 1999]. Используя результаты КР-анализа состава индивидуальных включений и температуры частичной гомогенизации в системе $\text{CO}_2\text{—CH}_4\text{—N}_2$, программа позволяет определять плотность минералообразующего флюида, а через этот параметр и температуры кристаллизации минералов, определенные методом гомогенизации, а также оценить давление [Roedder, Bodnar, 1980].

Изохоры для углекислотных включений определялись по температуре их частичной гомогенизации [Варгафтик, 1972].

Валовый состав летучих во включениях определялся методом газовой хроматографии из навески кварца весом 300 мг. Газы извлекались методом декрепитации при нагревании фракции кварца до температуры 600 °С. Под бинокулярной лупой отбирали чистые зерна кварца (размер фракции 0.5—0.25 мм) без видимых включений нерудных и рудных минералов. Отобранные пробы обрабатывались слабоконцентрированной соляной и азотной кислотами. Затем пробы тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали при температуре 105 °С. Схема установки и ход анализа описан в работе [Осоргин, 1990].

Температура и давление минералообразующего флюида. Температура минералообразования кварцевых жил месторождения Бадран оценена по результатам гомогенизации флюидных включений (рис. 3). Отчетливо видно, что температура флюидов, формирующих молочно-белый кварц-II, не поднималась выше 180—200 °С. Максимальное количество замеров попадает в достаточно узкий интервал от 120 до 140 °С. Гомогенизация во всех включениях протекала только в жидкую фазу (см. рис. 3).

Для серого кварца-I характерны более высокие температуры гомогенизации флюидных включений. Общий интервал температуры гомогенизации составляет 180—320 °С при гомогенизации как в жидкую, так и газовую фазы в интервале температур от 280 до 320 °С. Этот факт свидетельствует о том, что кварц-I кристаллизовался из гетерогенного флюида. Плотность флюидов, определенная по температурам гомогенизации углекислоты во включениях, менялась от 0.064 до 0.96 г/см³ при гомогенизации, соответственно, в газовую и жидкую фазы. При температурах формирования серого кварца рудных столбов I и III в интервале от 180 до 320 °С давление флюида варьирует от 0.1 до 2.0 кбар.

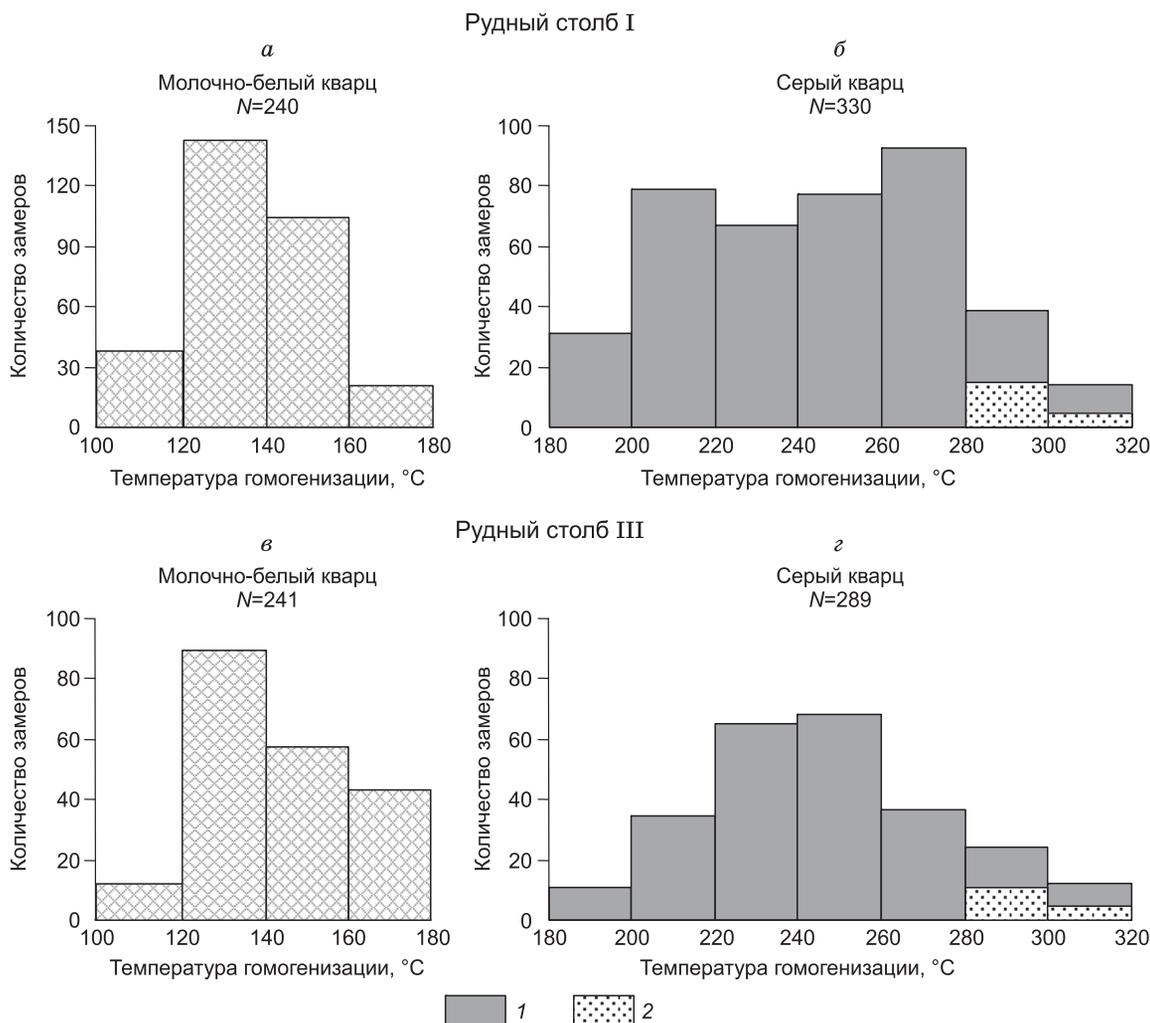


Рис. 3. Гистограммы температур гомогенизации флюидных включений в молочно-белом (а, в) и сером кварце (б, г) из Рудных столбов I и III месторождения Бадран.

N — количество определений. Гомогенизация в жидкость (1), в газ (2).

По данным криометрии и КР-спектроскопии, во флюидных включениях в молочно-белом кварце-II CO_2 не обнаружена.

Соленость и состав минералообразующих флюидов. Согласно криометрическим данным, состав и концентрация солей во флюидных включениях в сером и молочно-белом кварце различаются. Соленость флюидов, формирующих серый кварц, достигала 10 мас.% экв. NaCl , а в молочно-белом кварце она не превышала 4.5 мас.% экв. NaCl . При этом состав флюидов серого кварца определяют хлориды Na и Mg , а молочно-белого — хлориды K и Na .

Газовая составляющая флюидов. Газовый состав флюидных включений исследовался тремя методами: КР-спектроскопическим и криометрическим в индивидуальных флюидных включениях из кварца кварцевых жил и хроматографическим — валовый состав летучих из флюидных включений в кварцевых жилах, окварцованных милонитах, милонитах висячего и лежащего бортов (табл. 1).

В индивидуальных существенно газовых включениях установлено, что они заполнены малоплотным флюидом, содержащим CO_2 , CH_4 и N_2 . При понижении температуры в криокамере до -180°C во включениях появляется (в результате конденсации) жидкая фаза, которая гомогенизируется в газовую фазу в интервале температур от -147.0 до -153.4°C . Эти температуры близки к критической температуре азота, которая равна -146.9°C [Варгафтик, 1972]. В этих же существенно газовых включениях замерзает твердая фаза, которая плавится в интервале температур от -57.9 до -63.4°C , указывая на то, что она представлена углекислотой с примесью метана. Примесь метана, критическая температура которого равна -82.6°C [Варгафтик, 1972], может существенно понижать температуру плавления чистой углекислоты (-56.6°C) [Вукалович, Алтунин, 1965].

В газовой фазе улекислотно-водных включений при понижении температуры ниже $+20^\circ\text{C}$ появляется жидкая CO_2 , которая плавится при температуре от -56.9 до -62.1°C при гомогенизации в газ от $+10.0$ до $+18.7^\circ\text{C}$, а гомогенизация в жидкую фазу CO_2 происходит при температуре от -3.0 до -3.8°C . Температура плавления твердой фазы углекислоты ниже -56.6°C указывает также на присутствие метана и азота, которые понижают температуру плавления чистой углекислоты. По данным КР-анализа, в составе флюидных включений наряду с CO_2 обнаружены различные количества N_2 и CH_4 .

Валовый анализ летучих компонентов флюидов также показал, что они представлены водой, углекислотой, азотом и метаном в разных количествах и различных соотношениях (рис. 4—6).

Суммарная флюидонасыщенность кварцев из милонитов лежащего и висячего бортов не превышала 1200 мг/кг как в I, так и в III рудных столбах. В III рудном столбе в окварцованных милонитах она достигала 2000 мг/кг, а в кварцевых жилах этого же столба она была еще выше и достигала уже 2600 мг/кг.

Повышенное содержание углекислоты до 700 (обр. 271) и 200 (19 штуф) мг/кг зафиксировано во флюидах кварцевых жил I и III рудных столбов соответственно (см. табл. 1).

Достаточно высокие содержания азота (до 20 мг/кг) определены во флюидах кварцевых жил IV рудного столба на западе рудного поля месторождения Бадран, а в кварцевых жилах участка Восточный во флюидах обнаружены лишь его следы (см. рис. 6, табл. 1). Таким образом, наблюдается повышение содержания азота во флюидах кварцевых жил с востока на запад по зоне Надвиговая. В целом во флюидах кварцевых жил рудных столбов I и III содержание азота выше, чем во флюидах милонитов этих же столбов, а метана же больше во флюидах милонитов по сравнению с флюидами кварцевых жил.

Таким образом, микротермометрические исследования флюидных включений в кварце показали, что формирование рудных столбов I и III кварц-золоторудного месторождения Бадран происходило при участии трех типов флюидов, различающихся по составу. Первый флюид — высокотемпературный углекислотно-водный с $\text{CH}_4 + \text{N}_2$, соленостью до 10 мас.% экв. NaCl с хлоридами Na и Mg . Второй флюид — существенно газовый, состоящий из $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Третий — существенно водный, низкотемпературный, малосоленый (соленость ниже 4.5 мас.% экв. NaCl) флюид, содержащий хлориды Na и K . Первые два флюида, скорее всего, образовались в процессе гетерогенизации исходного флюида.

Присутствие во флюидах месторождения Бадран в ошутимых концентрациях CO_2 , CH_4 и N_2 (до 700, 9 и 20 мг/кг соответственно) указывает на интенсивное взаимодействие минералообразующего флюида с вмещающими породами, которые содержат до 3—4 % углистого органического вещества и имеют повышенную карбонатность [Анисимова и др., 1998]. Молекулярный азот, обнаруженный во флюидах месторождения Бадран, мог образоваться при разрушении аммонийсодержащих силикатов вмещающих пород. Наличие высокотемпературного флюида, содержащего CO_2 , CH_4 и N_2 , захваченного включениями кварца-I, является потенциально перспективным признаком его золотоносности [Томиленко, Гибшер, 2001]. Формирование месторождения Бадран на заключительной стадии происходило из существенно водных растворов низкой концентрации при температуре ниже 200°C .

Отметим, что исследованиями флюидных включений в кварце рудных столбов I и III золоторудного месторождения Бадран установлено:

Таблица. 1. Результаты хроматографического анализа летучих из кварцев, окварцованных милонитов и милонитов висячего и лежащего бортов золоторудного месторождения Бадран, Якутия

Номер образца	Содержание, мг/кг				Флюидонасыщенность, мг/кг
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄	
Рудный столб I, кварцевые жилы					
4	40	620	9	3	670
50	140	760	0	2	900
51	220	610	6	4	840
168	50	530	6	2	588
170	50	500	6	2	558
173	60	730	5	2	797
175	70	630	6	2	708
178	70	670	4	4	748
180	60	3	3	0	666
186	140	800	10	4	954
263	60	720	5	2	787
265	70	330	4	3	407
267	70	780	12	3	865
269	120	600	14	3	737
270	180	590	0	3	773
271	700	740	0	4	1444
272	370	520	6	4	900
274	300	420	3	3	726
275	150	290	2	4	446
276	70	520	4	3	557
278	70	860	0	3	933
281	100	950	7	2	1059
1 (штуф)	40	780	4	1	825
2 (штуф)	30	1000	4	1	1035
3 (штуф)	40	740	4	2	786
4 (штуф)	20	500	3	1	524
5 (штуф)	120	1100	9	3	1232
6 (штуф)	40	1200	8	9	1257
7 (штуф)	40	1100	6	1	1147
8 (штуф)	20	540	5	1	566
9 (штуф)	20	1600	4	1	1625
10 (штуф)	20	1200	3	1	1224
11 (штуф)	20	1300	8	1	1329
12 (штуф)	20	710	5	8	742
Рудный столб I, окварцованные милониты					
16	180	610	4	3	797
17	220	1200	4	4	1428
18	150	580	0	4	734
19	80	620	0	3	703
20	230	590	0	3	823
49	540	680	0	6	1226
174	370	340	5	5	720
273	110	440	5	3	558
279	190	550	9	3	752
280	370	450	5	4	829

Номер образца	Содержание, мг/кг				Флюидонасыщенность, мг/кг
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄	
Рудный столб I, милониты висячего борта					
5	90	670	10	2	772
171	270	500	7	6	783
172	180	400	5	3	588
177	360	830	8	6	1204
264	80	300	0	2	382
266	120	380	7	2	509
277	210	700	5	4	919
Рудный столб I, милониты лежащего борта					
169	180	310	3	5	498
176	120	580	5	3	708
179	70	440	6	4	520
268	110	560	6	3	679
Рудный столб III, кварцевые жилы					
6	70	680	5	2	757
10	100	870	8	2	980
14	50	740	5	2	800
15	80	890	8	5	983
21	70	610	4	2	686
23	70	420	4	3	497
24	70	690	7	2	769
25	50	690	5	2	747
26	80	1000	5	3	1088
28	50	760	7	3	820
29	60	2500	5	4	2569
30	90	820	6	3	919
31	70	800	4	2	876
32	80	1200	7	2	1289
33	70	1100	7	2	1179
34	70	1000	8	2	1080
35	50	670	4	2	726
36	90	1100	9	3	1202
37	40	430	4	2	476
42	80	930	6	2	1018
119	80	740	5	2	827
121	80	800	4	2	886
123	90	740	6	2	838
127	90	920	6	2	1018
128	50	610	4	1	665
129	80	550	4	2	636
132	60	580	3	1	644
133	40	580	0	1	621
134	80	580	3	2	665
137	50	740	3	1	794
143	60	430	6	2	498
144	70	330	3	2	405
146	50	320	4	1	375
147	90	260	6	2	358

Номер образца	Содержание, мг/кг				Флюидонасыщенность, мг/кг
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄	
148	150	600	6	3	759
149	60	250	5	1	316
150	90	650	7	2	749
151	110	620	7	3	740
152	110	930	9	3	1052
153	110	1200	10	3	1323
154	160	940	10	4	1114
155	60	670	7	2	739
156	50	490	7	2	549
157	100	1000	9	3	1112
158	50	520	4	2	576
159	90	800	8	2	900
160	110	820	8	3	941
162	120	870	10	3	1003
163	70	420	3	2	495
164	110	750	7	3	870
165	160	880	10	3	1053
166	130	1000	9	4	1143
167	20	150	0	1	171
182	90	1100	10	3	1203
183	80	400	4	2	486
259	120	480	6	4	610
260	70	650	7	3	730
261	110	400	8	3	521
262	230	350	9	3	592
13 (штуф)	40	880	4	1	925
14 (штуф)	70	1300	10	2	1382
15 (штуф)	190	1200	10	3	1403
16 (штуф)	150	1300	10	7	1467
17 (штуф)	150	1200	20	6	1376
19 (штуф)	200	840	7	6	1053
20 (штуф)	30	1230	3	1	1264
21 (штуф)	60	1200	10	1	1271
22 (штуф)	100	1800	20	3	1923

Рудный столб III, окварцованные милониты

27	70	450	0	2	522
43	90	1800	0	8	1898
122	80	820	5	2	907
135	70	770	3	1	844
136	70	1100	4	2	1176
138	80	500	7	2	589
139	330	1000	20	6	1356
140	70	1000	5	2	1077
141	60	520	4	2	586
142	70	670	6	2	748
181	210	570	4	6	790
256	240	880	9	6	1135
258	340	720	9	7	1076

Номер образца	Содержание, мг/кг				Флюидонасыщенность, мг/кг
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄	
Рудный столб III, милониты висячего борта					
7	70	540	5	20	635
11	160	1000	6	6	1172
12	70	790	5	8	873
13	270	630	6	6	912
120	90	910	9	3	1012
124	80	1000	6	3	1089
131	90	640	7	3	740
Рудный столб III, милониты лежащего борта					
8	30	490	0	2	522
9	50	560	0	2	612
118	140	520	4	3	667
125	90	650	4	3	747
126	130	770	5	3	908
130	70	630	3	1	704
161	150	1000	10	4	1164
257	110	250	6	4	370
Рудный столб IV, кварцевые жилы					
1	80	540	20	4	644
2	80	400	20	4	504
3	120	490	10	4	624
Рудный столб IV, окварцованные милониты					
44	690	600	5	5	1300
45	160	620	7	3	790
46	340	670	3	8	1021
47	160	1400	6	5	1571
Участок Восточный, кварцевые жилы					
38	50	1900	0	3	1953
39	50	2300	0	4	2354
40	40	1200	0	4	1244
Участок Восточный, окварцованные милониты					
41	390	580	0	6	976

— кварцевые жилы месторождения на ранних стадиях формировались из гетерогенного флюида при температурах ниже 320 °С и давлениях от 2.0 до 0.1 кбар при активном участии углекислоты, азота и метана, соленость минералообразующего раствора достигала 10 мас.% экв. NaCl;

— молочно-белый кварц-II формировался при температурах ниже 200 °С и давлениях менее 0.1 кбар из гомогенных хлоридных растворов с соленостью не выше 4.5 мас.% экв. NaCl;

— увеличение с востока на запад содержания азота во флюидах из кварцевых жил по зоне Надвиговая, вероятнее всего, связано с усилением проявления коллизионного метаморфизма в зоне надвига.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДРАН

Приведенные выше данные о минеральном составе руд, последовательности их формирования, термобарогеохимические параметры процессов минералообразования позволяют представить генетическую модель формирования Бадранского золоторудного месторождения.

В качестве основных элементов модели выделяются:

— развитие прерудного метасоматоза вмещающих пород, выраженного в их березитизации и формировании пирит-арсенипиритового парагенезиса с богатым невидимым золотом;

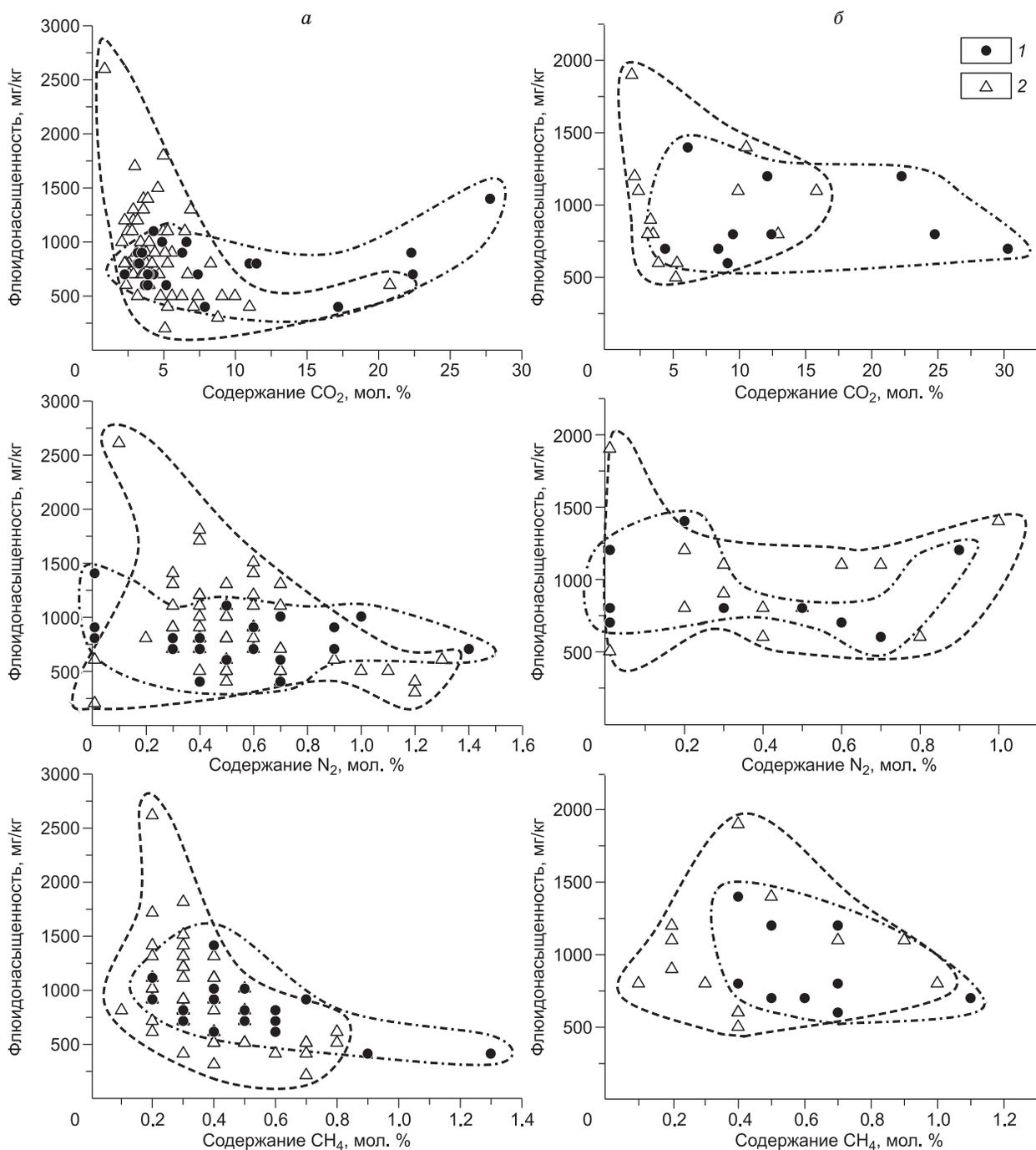


Рис. 4. Содержание CO_2 , N_2 и CH_4 во флюидах кварцевых жил (а) и во флюидах окварцованных милонитов (б) из Рудных столбов I и III месторождения Бадран (по данным газовой хроматографии).

1, 2 — рудные столбы I и III соответственно. Оконтурены поля для рудных столбов.

— формирование жильного выполнения с развитием арсенопирит-пирит-карбонат-кварцевой минеральной ассоциации I стадии;

— формирование двух пространственно зонально сопряженных минеральных ассоциаций II стадии: халькопирит-галенит-альбит-карбонатной на верхних горизонтах и флангах зоны Надвиговая и сфалерит-тетраэдрит-серицит-карбонатной, приуроченной к центральному наиболее рудоносному ее интервалу;

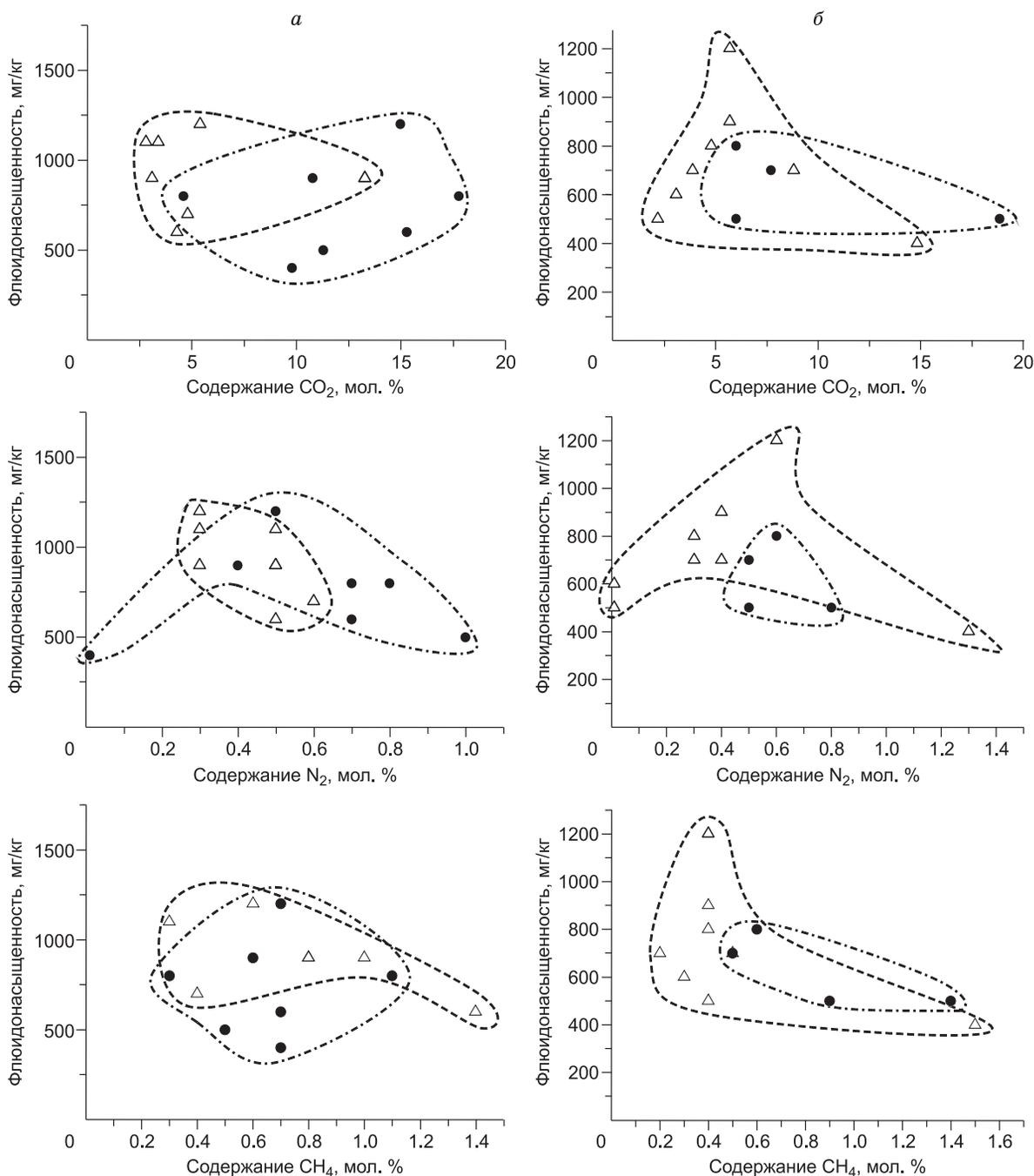


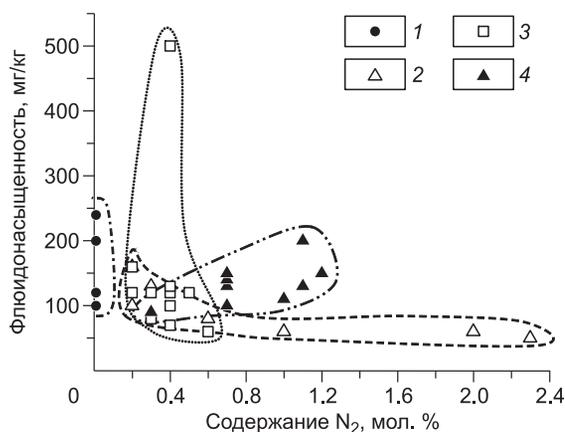
Рис. 5. Содержание CO_2 , N_2 и CH_4 во флюидах кварцев милонитов всячего (а) и лежащего (б) бортов из Рудных столбов I и III месторождения Бадран (по данным газовой хроматографии).

Усл. обозн. см. на рис. 4.

— формирование киноварь-антимонит-карбонат-кварцевой и серебро-кварцевой минеральных ассоциаций III стадии, пользующихся ограниченным распространением, преимущественно в приповерхностных частях рудных столбов.

Для количественной оценки процессов минералообразования и выявления физико-химических условий концентрированного отложения золотых руд Бадранского месторождения, изучения общей эволюции гидротермальной рудообразующей системы, сформировавшей это месторождение, нами предпринято компьютерное термодинамическое моделирование отдельных элементов генетической модели,

Рис. 6. Содержание N₂ во флюидах кварцевых жил из рудных столбов I, III (1, 2) и IV (3) и участка Восточный (4) в зоне Надвиговая месторождения Бадран (по данным газовой хроматографии).



перечисленных выше, с использованием программного комплекса «Chiller» (Solveq) [Reed, 1982, 1998] и сопутствующей ей термодинамической базы данных «Soltherm-98», составленной на основе базы данных SUPCRT'92 [Johnson et al., 1992] и дополненной термодинамическими параметрами хлоридных, сульфидных и смешанных комплексов сурьмы [Белеванцев и др., 1998а,б]. Состав модельной термодинамической системы определялся особенностями минерального состава руд кварц-золоторудного месторождения Бадран и данными исследования флюидных включений в сером и молочно-белом кварце рудных жил с использованием методов КР-спектроскопии, газовой хроматографии, термо- и криометрии. Таким образом, поведение Au(I) было рассмотрено в рамках сложной геохимической системы Au—Fe—Cu—Pb—Zn—As—Sb—Hg—Ag—H₂O—Cl—H₂S—CO₂. Для моделирования процессов рудообразования использованы модели: 1) взаимодействия растворов—порода; 2) конденсации газовой фазы (для I стадии); 3) простого охлаждения умеренно хлоридно-сульфидного раствора (для II стадии); 4) простого охлаждения; 5) смешения низкохлоридно-сульфидного раствора с кислыми метеорными водами (для III стадии), отражающие формирование жил рудообразующей системы и интенсивного метасоматического изменения пород на глубоких горизонтах.

Таблица 2. Равновесные концентрации (моль/кг Н₂О) химических форм в исходных модельных растворах

Компонент	Концентрация при 300 °С		Концентрация при 200 °С
	Раствор I	Раствор II	
	pH = 3.9	5.5	6.5
HS ⁻	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻²
SO ₄ ²⁻	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁵
Na ⁺	1.00	1.50	7.00·10 ⁻¹
Cl ⁻	1.73	1.70	1.00
Au ⁺	2.00·10 ⁻⁵ —2.00·10 ⁻³	2.00·10 ⁻⁵ —2.00·10 ⁻³	2.00·10 ⁻⁶
HCO ₃ ⁻	1.57·10 ⁻²	1.60·10 ⁻²	1.09·10 ⁻²
Fe ⁺⁺	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³
SiO ₂	9.24·10 ⁻³	9.28·10 ⁻³	3.45·10 ⁻³
H ₃ AsO ₃	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻⁴
Pb ⁺⁺	2.00·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁶
Zn ⁺⁺	2.00·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁶
Cu ⁺	2.00·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁶	1.00·10 ⁻⁶
Ca ⁺⁺	1.00·10 ⁻¹	5.00·10 ⁻²	—
NH ₄ ⁺	1.00·10 ⁻⁴	—	—
K ⁺	5.00·10 ⁻¹	—	3.00·10 ⁻¹
Al ⁺⁺⁺	1.00·10 ⁻²	—	—
Mg ⁺⁺	1.00·10 ⁻²	5.00·10 ⁻²	—
Ti(OH) ₄	1.00·10 ⁻⁴	—	—
Sb(OH) ₃	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻²
Hg ⁺⁺	—	—	1.00·10 ⁻⁴
Ag ⁺	—	—	2.00·10 ⁻⁵

Для формирования рудных парагенезисов I и II стадий золоторудного месторождения Бадран из флюидов с умеренной ($m_{Cl} = 1.7$) концентрацией солей состав системы задавали 1м раствором NaCl, содержащим Mg, Ca, K, Fe, Si, As, Pb, Zn, Cu, S и Au ($2 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-3}$ м) и преобладающими, по данным изучения газовой-жидких включений, CO₂ и CH₄. Растворы принятого состава ($m_{HS^-} = 0.01$) при температуре 300 °С находились в равновесии (программа «Solveq») с кварцем и характеризовались значениями: pH = 3.9, Eh = -0.31 В (раствор I) и pH = 5.5, Eh = -0.52 В (табл. 2, раствор II).

Поскольку гидротермальные рудообразующие системы являются динамическими, использование аппарата равновесной термодинамики для расчета химических взаимодействий в таких системах базируется на основе «локально-мозаичного равновесия» [Коржинский, 1969]. В неравновесной системе раствор—порода выделяются пространственные резервуары, характеризующиеся постоянными температурой, давлением и валовым химическим составом и в каждом из них достигается равновесие. Расчет равновесного состава гетерогенной многокомпонентной системы раствор—порода—газовая фаза на каждой ступени и является основным фактором термодинамического моделирования гидротермальных процессов.

Таблица 3. Химический состав (мас.%) аргиллита золоторудного месторождения Бадран

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	Σ
52.43	1.18	18.98	2.75	3.30	2.90	0.87	2.39	4.32	0.45	2.21	7.32	99.10

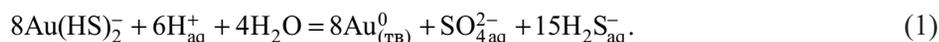
Таблица 4. Концентрация (–lg m) газов в газовой фазе, образующейся при воздействии раствора I (T = 300 °C) на аргиллит месторождения Бадран

Компонент	Давление, бар	
	100	82.75
H ₂ O	0.39	+0.12
CO ₂	1.17	+0.31
CH ₄	3.58	2.64
H ₂	3.95	1.73
NH ₃	6.21	5.62
N ₂	4.57	4.33
H ₂ S	3.18	2.00

Для термодинамического моделирования формирования раннего золотоносного пирит-арсенопиритового парагенезиса с применением модели 1 взаимодействия раствор–порода (для стадии I — предрудного метасоматоза) нами был взят гомогенный кислый умеренный хлоридно-сульфидный раствор при воздействии его на аргиллит (коэффициент пористости 4 %) месторождения Бадран (табл. 3).

Моделирование состава метасоматической колонки проходило с использованием метода «проточного реактора», когда изменение состава системы выражается как функция отношения раствор/порода, являющаяся отношением общего количества исходного раствора к общему количеству прореагировавшей породы (*w/r*, [Reed, 1998]). Обычная модель «проточного реактора» включает несколько последовательных резервуаров, в которых флюид реагирует с вмещающей породой, в результате чего изменяется состав самого флюида и изменяется состав отлагающейся минеральной ассоциации.

При воздействии кислого (углекислого) (pH = 3.9, Eh = –0.31В) умеренно хлоридно-сульфидного (m_{Cl⁻} = 1.7; m_{HS⁻} = 0.01) модельного раствора (I) при T = 300 °C и P = 2000 бар (табл. 4) на вмещающую породу (от 1 до 10 г), отмечается осаждение пирротина, пирита, арсенопирита и кварца при снижении pH раствора до 3.5, что приводит к отложению золота (в основном за счет комплекса Au(HS)₂⁻) (рис. 7), увеличивая его содержание во вмещающей породе, согласно уравнению реакции:



При прохождении последующих порций этого раствора через породу (до 1000 г) отмечается повышение pH раствора до 5.5 при последовательном отложении хлоритов Fe (клинохлор и дафнит), доломита, халькопирита и альбита (см. рис. 7). Взаимодействие раствора с породой приводит не только к ее метасоматическому изменению, но и к понижению давления раствора до 100 бар и ниже, до газового насыщения этого раствора (P = 82.75 бар) в связи с интенсивным развитием трещинообразования в зоне рудоотложения и обособлению газовой фазы, содержащей CO₂, CH₄, H₂, N₂, H₂S и др. (см. табл. 4). Вместе с тем при продвижении раствора через породу происходили его охлаждение, дальнейшее осаждение Au и околорудные изменения вмещающих пород: окварцевание и карбонатизация (березитизация), серицитизация, сульфидизация (золотоносный пирит-арсенопиритовый парагенезис, галенит и сфалерит) (см. рис. 7). Конденсация (модель 2) при охлаждении (T < 100 °C) газовой фазы приводит к осаждению за счет углерода метана, графита и к образованию серого кварца.

Для стадии (II) (жильного выполнения) нами была применена модель 3 простого охлаждения близнеитрального (pH = 5.5, Eh = –0.52В) умеренно хлоридно-сульфидного раствора (II) (см. табл. 2), оставшегося после гетерогенизации исходного флюида, от температуры 300 до 100 °C при P = 100 бар. При понижении температуры из раствора (II) осаждаются пирит, арсенопирит, халькопирит (с понижением pH до 3.4), золото, молочно-белый кварц и галенит, а при дальнейшем охлаждении модельного раствора до 180 °C — сфалерит, тетраэдрит и буланжерит (рис. 8). Золото в рассматриваемых растворах находится в основном в дигидросульфидной форме, Au(HS)₂⁻, и его осаждение в кислой среде при 300 °C происходит по уравнению реакции (1).

Для формирования поздней (III) киноварь-антимонит-карбонат-кварцевой и серебро-кварцевой стадии была так же, как и для предыдущей стадии, применена модель 4 простого охлаждения модель-

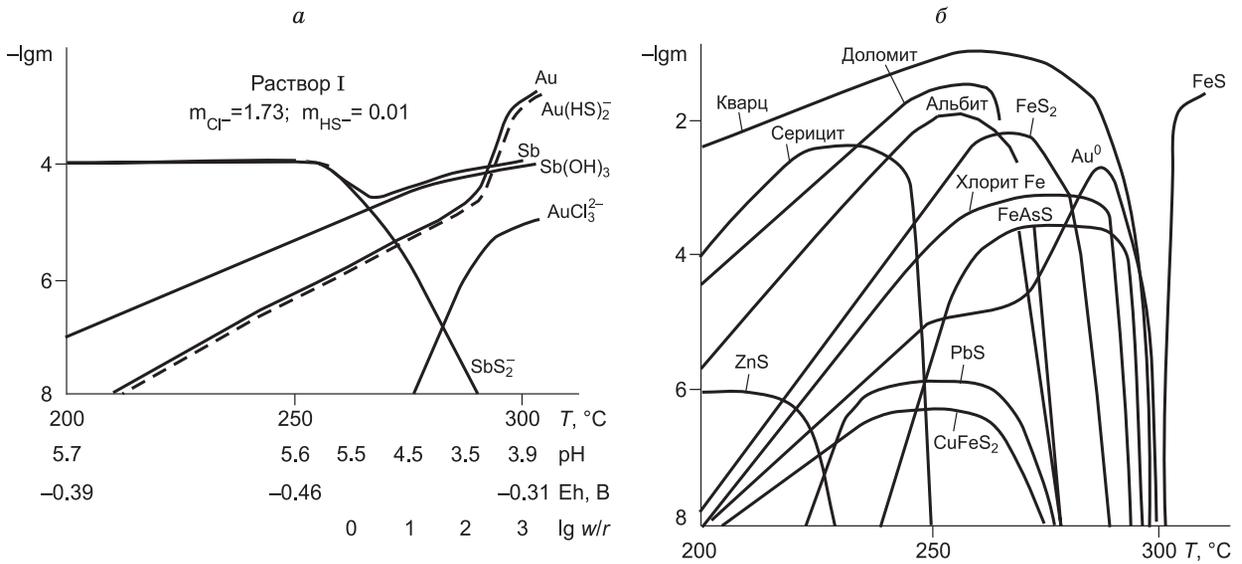


Рис. 7. Концентрация Au в умеренно хлоридно-сульфидном растворе I (см. табл. 4) при $m_{\text{Cl}^-} = 1.73$; $m_{\text{HS}^-} = 0.01$ в зависимости от pH и температуры (модель взаимодействия раствор—порода, где (w) — раствор, кг, (r) — порода, кг с шагом ее титрования 1г) (а). Отложение минеральных фаз золотоносного пирит-арсенипиритового парагенезиса (б).

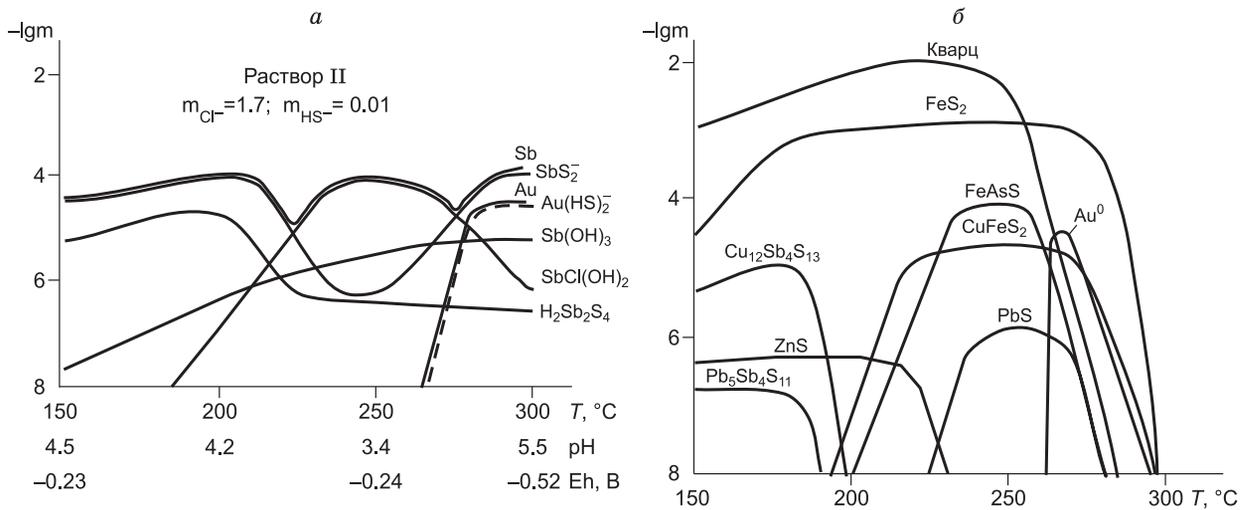


Рис. 8. Концентрации Au и Sb в умеренно хлоридно-сульфидном растворе II, оставшемся после гетерогенизации (см. табл. 4) при $m_{\text{Cl}^-} = 1.7$; $m_{\text{HS}^-} = 0.01$ в зависимости от pH и температуры (модель простого охлаждения) (а); отложение минеральных фаз жильного выполнения (б).

ного, но уже слабощелочного ($\text{pH} = 6.5$, $\text{Eh} = -0.46\text{В}$) низкохлоридно-сульфидного ($m_{\text{Cl}^-} = 1.0$; $m_{\text{HS}^-} = 0.01$) раствора (III) с T от 200 до 110 °С при $P = 100$ бар, содержащего кроме Au, As, Sb еще и Hg, Ag с дополнением Sb (см. табл. 2, раствор III), которые, возможно, были привнесены при разбавлении умеренно хлоридно-сульфидного раствора (II). При охлаждении раствора (III) осаждаются халькопирит, акантит, сидерит, галенит, самородные золото, согласно уравнению реакции:



серебро (за счет химических форм AgHS и AgCl_2^-) и ртуть (за счет насыщения раствора атомарной формой $\text{Hg}_{\text{ақ}}^0$), антимонит (доминирующими формами привноса Sb в зону отложения являются сульфидные формы SbS_2^- , HSb_2S_4^- , $\text{Sb}_2\text{S}_4^{2-}$ и гидроксокомплекс $\text{Sb}(\text{OH})_3$), буланжерит, пирит, киноварь (за счет суль-

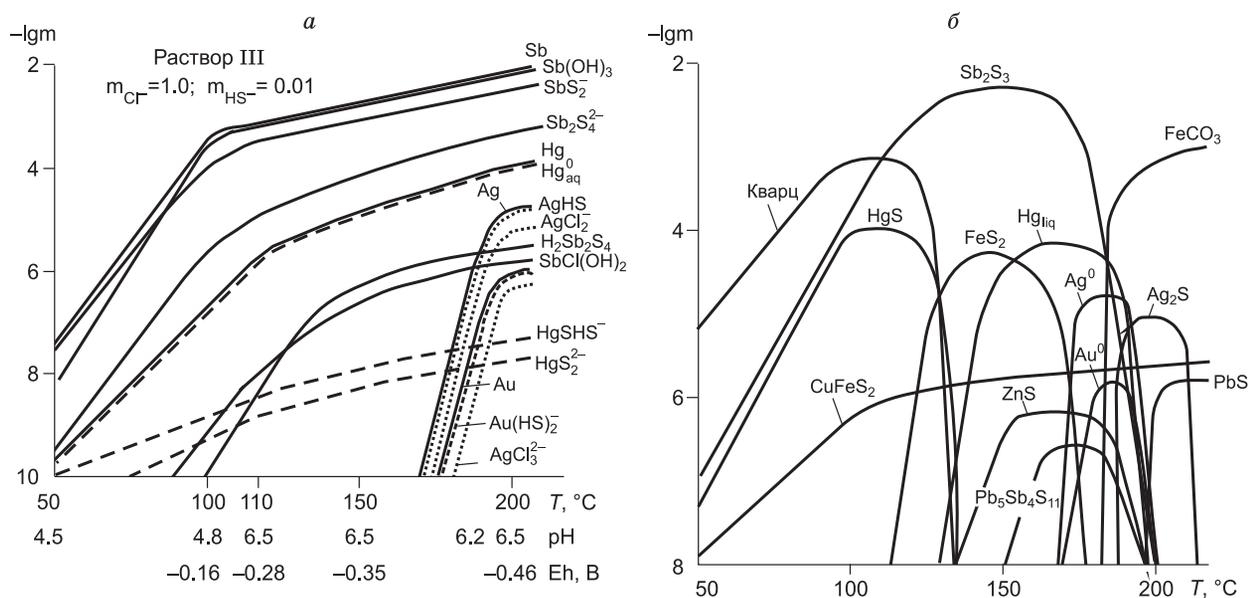


Рис. 9. Концентрации Au, Sb, Ag и Hg в низкохлоридно-сульфидном растворе (III) (см. табл. 4) при $m_{Cl^-} = 1.0$; $m_{HS^-} = 0.01$ в зависимости от pH и температуры (модели простого охлаждения и смешения) (а); отложение киноварь-антимонит-карбонат-кварцевого и серебро-кварцевого минеральных парагенезисов (б).

фидных форм HgS_2^{2-} , $HgSHS^-$ и прозрачный кварц-III (рис. 9). При простом охлаждении раствора (III) до 110 °C (pH = 6.5) в нем остаются довольно существенные концентрации сурьмы, в виде комплексов SbS_2^- , $Sb(OH)_3$, и ртути, за счет атомарной формы Hg_{aq}^0 . Для понижения значения pH раствора была применена модель 5 смешения его с холодными (25 °C) кислыми (pH = 5) метеорными водами, что приводит к понижению температуры и pH раствора до 4.8 и осаждению антимонита и киновари (см. рис. 9).

Уравнения реакций, ответственных за привнос серебра, ртути и сурьмы в зону отложения самородных Ag и Hg, антимонита и киновари, приведены в наших предыдущих работах, рассматривающих физико-химические модели процессов рудообразования на Ag-Sb, Hg, Sb-Hg и Au-Sb месторождениях [Gushchina, Obolenskiy, 2003; Павлова и др., 2004; Оболенский и др., 2006, 2007, 2008, 2009].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение закономерностей локализации и условий образования Бадранского золото-кварцевого малосульфидного месторождения в структурах Верхоянского складчато-надвигового пояса обнаруживает четкую металлогеническую зональность в размещении Au-редкометалльных, Au-сурьмяных и Au-кварцевых малосульфидных месторождений, которые преимущественно формируются в пределах площадных Чыбагалахской и Адыча-Нерской зон и разделяющей их линейной Адыча-Тарынской зоне. Ведущая роль в локализации Au-кварцевых месторождений Бадранского типа принадлежит надвиговым структурам, которые сопровождаются локальным развитием коллизионного метаморфизма и формированием рудоносных метаморфогенно-гидротермальных систем, предположительно, с участием глубоких мантийных флюидов [Ridley et al., 2000], обеспечивающих их высокую рудопродуктивность.

Проведенные исследования минерального состава руд и окколорудных изменений и данные по составу гидротермальных рудоносных растворов кварц-золоторудного месторождения Бадран (Якутия) позволяют рассматривать его образование в ходе эволюционного развития, из сложной гидротермальной рудообразующей системы Au—Fe—Cu—Pb—Zn—As—Sb—Hg—Ag—H₂O—Cl—H₂S—CO₂.

Характерным для формирования I стадии (ранней высокопродуктивной) золоторудных парагенезисов был гомогенный кислый (углекислый) умеренно хлоридно-сульфидный раствор, который взаимодействовал с вмещающими породами, что приводило не только к их метасоматическому изменению, но и к охлаждению, осаждению Au, понижению давления и к гетерогенизации раствора с обособлением газовой фазы, которая при дальнейшем охлаждении конденсировалась с осаждением графита, что придавало серую окраску кварцу.

Формирование II стадии (продуктивной на Au) происходило из гомогенного близнеутрального умеренно хлоридно-сульфидного раствора, оставшегося после гетерогенизации исходного флюида, при простом охлаждении от 300 до 180 °С с образованием молочно-белого кварца.

III стадия (поздняя малопродуктивная на золото) сформирована при охлаждении от 200 °С уже из низкохлоридно-сульфидного слабощелочного раствора III, содержащего кроме Au, As, Sb еще и Hg, Ag с дополнением Sb, которые могли быть привнесены при разбавлении хлоридно-сульфидного раствора II. В этой стадии, по данным исследований флюидных включений, образуется прозрачный кварц.

Золото в рассматриваемых растворах находится в основном в дигидросульфидной форме $Au(HS)_2^-$, и его осаждение в кислой среде при 300 °С происходит по уравнению реакции (1), а в слабощелочной — по уравнению реакции (2).

Выполненные расчеты позволили обнаружить значительную зависимость содержания Au в растворах от T, Eh, pH, m_{Cl^-} , m_{HS^-} , а изменение этих параметров вызывает отложение золота при формировании руд на геохимических барьерах.

Если предлагаемая генетическая модель адекватно отражает последовательность процессов минералообразования на Бадранском месторождении, то, опираясь на результаты модельных построений, перспективной является оценка золотоносности зон метасоматитов на его глубоких горизонтах.

Авторы выражают благодарность профессору Орегонского университета (США) М. Риду за возможность использования компьютерной программы «Chiller».

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (07-05-00803, 08-05-00915) и Минобрнауки РФ РНП.2.1.1.702.

ЛИТЕРАТУРА

Амузинский В.А. Металлогенетические эпохи и золотоносность рудных комплексов Верхоянской складчатой системы. Якутск, ИГАБМ СО РАН, 2005, 247 с.

Анисимова Г.С. Зональность золоторудного поля Якутии на основе минералогического картирования // Минералогическое картирование как метод исследования рудоносных территорий. Миасс, УНЦ АН СССР, 1983, с. 164—165.

Анисимова Г.С. Минералогические критерии локального прогнозирования золотого оруденения на основе топоминералогического картирования Бадранского рудного поля // Минералого-генетические аспекты магматизма и оруденения Якутии. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1993, с. 49—53.

Анисимова Г.С. Микроминеральные парагенезисы золоторудных месторождений // Материалы Международной конференции «Рудогенез». Миасс, 2008, с. 7—11.

Анисимова Г.С., Амузинский В.А., Баландин В.А. Сульфидно-кварцевые залежи в пологих разломах — новый тип месторождений золота // Отечественная геология, 1998, № 6, с. 65—70.

Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Серкебаева Е.С. Самородное золото месторождения Бадран // Отечественная геология, 2006, № 5, с. 38—47.

А.с. 1562816 СССР. Микротермокамера / Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А. Опубл. в Б.И., 1990.

Белеванцев В.И., Гущина Л.В., Оболенский А.А. Растворимость антимонита Sb_2S_3 : экспертиза известных интерпретаций и уточнения // Геохимия, 1998а, № 1, с. 65—72.

Белеванцев В.И., Гущина Л.В., Оболенский А.А. Сурьма в гидротермальных растворах: анализ и обобщение данных о хлорокомплексах сурьмы (III) // Геохимия, 1998б, № 10, с. 1033—1038.

Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика, 1977 (8), с. 16—27.

Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972, 239 с.

Вукалович М.П., Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М., Атомиздат, 1965, 455 с.

Жокин А.В. Мышьяковая Южно-Верхоянская геохимическая провинция // Геология и геофизика, 1985 (1), с. 74—81.

Константинов М.М., Косовец Т.Н. Золото-кварцевые месторождения в турбидитах Якутии // Руды и металлы, 1996, № 3, с. 5—20.

Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М., Наука, 1969, 111 с.

Неустроев Р.Г. Морфогенетические типы рудных тел месторождения Бадран // Отечественная геология, 2003, № 3, с. 33—38.

Оболенский А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. Физико-химические модели процессов рудообразования на ртутных месторождениях // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1344—1359.

Оболенский А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С., Боровиков А.А., Павлова Г.Г. Сурьма в гидротермальных процессах: растворимость, условия переноса, металлоносность растворов // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (12), с. 1276—1288.

Оболенский А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С., Боровиков А.А. Система $Sb-Cl-H_2S-H_2O$ и физико-химические модели рудообразования Au-Sb месторождений // Материалы Международной конференции «Рудогенез». Миасс, 2008, с. 209—212.

Оболенский А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С., Боровиков А.А., Неволько П.А. Компьютерное термодинамическое моделирование переноса и отложения сурьмы и золота при формировании Au-Sb месторождений // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (11), с. 1227—1245.

Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах. Новосибирск, 1990, 32 с. (Препринт / ИГиГ СО АН СССР; № 11).

Павлова Г.Г., Гущина Л.В., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Оболенский А.А. Серебро и сурьма в гидротермальных растворах Ag-Sb месторождений // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (10), с. 1186—1197.

Свердлова В.Г., Шведенков Г.Ю., Томиленко А.А., Савинов А.В., Гибшер Н.А. Определение объемов фазового перехода газ—жидкость в системе $CO_2-CH_4-N_2$ в связи с задачами термобарогеохимии // Геохимия, 1999, № 5, с. 494—505.

Татаринов А.И., Яловик Л.И. Динамометаморфизм — главный фактор формирования коллизионных месторождений золота. Магадан, СВНИЦ ДВО РАН, 2006, с. 32—49.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., Маик, Наука/Интерпериодика, 2001, 571 с.

Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Особенности состава флюида в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения, Енисейский край (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия, 2001, № 2, с. 167—177.

Фридовский В.Ю. Сдвиговые дуплексы месторождения Бадран // Изв. вузов. Геология и разведка, 1999, № 1, с. 60—65.

Dubessy J., Poty B., Ramboz C. Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on Raman analysis of fluid inclusions // Eur. J. Miner., 1989, v. 1, № 3, p. 517—534.

Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // Ore Geol. Rev., 1998, № 13, p. 7—27.

Gushchina L.V., Obolenskiy A.A. Computer modeling of mercury transfer in hydrothermal conditions. Proceeding of the Seventh International Symposium on Hydrothermal Reaction / Eds. S.H. Feng, J.S. Chen, Z. Shi. Changchun, China // WSPC, 2003, p. 461—470.

Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT92, a software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 to 1000 °C // Comput. Geosci., 1992, v. 18, p. 899—947.

Nokleberg W.J., Bundzen T.K., Eremin R.A., Ratkin V.V., Dawson K.M., Shpikerman V.I., Goryachev N.F., Byalobzhsky S.A., Frolov Y.E., Khanchuk A.I., Koch R.D., Monger J.W.H., Pozdeev A.I., Ronzenblum J.S., Rodionov S.M., Parfenov L.M., Scotese C.R., Sidorov A.A. Metallogenesis and tectonics of the Russian Far East, Alaska, and Canadian Cordilleras: U.S. Geological Survey Professional Paper 1697, 2005, 397 p.

Reed M.H. Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase // Geochim. Cosmochim. Acta, 1982, v. 85, № 2, p. 312—327.

Reed M.H. Calculation of simultaneous chemical equilibria in aqueous—mineral—gas systems and application to modeling hydrothermal process / Techniques in hydrothermal ore deposits geology // Rev. Econ. Geol., 1998, v. 10, p. 109—124.

Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // SEG Rev., 2000, v. 13, p. 141—162.

Roedder E. Fluid inclusion evidence bearing on the environments of gold deposition // Proc. Symp. Gold-82. Geol. Soc. Zumbabwe Spec. Pub. № 1. Balkema. Rotterdam, The Netherlands, 1984, p. 129—162.

Roedder E., Bodnar R. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies // Ann. Rev. Earth. Planet. Sci., 1980, № 8, p. 263—301.