

ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ФЛЮИДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В РАЙОНЕ РАМАГИРИ-ПЕНАКАЧЕРЛА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КРАТОНА ДАРВАР: СВЯЗЬ С ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ

С. Бхаттачарайа, М.К. Паниграхи

Department of Geology & Geophysics, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India 721302

Золотоносный сланцевый пояс Рамагири-Пенакачерла входит в состав гранитно-зеленокаменного террейна восточной части кратона Дарвар. Он находится в окружении гнейсового фундамента и имеет тесную пространственную связь с более молодыми гранитными телами. Были изучены ассоциации флюидных включений в кварце из кварцевых жил, секущих кристаллосланцы и граниты, и из гранитов. Эти включения обнаруживают неоднородность характеристик флюидов, имеющих различный состав: водно-углекислотный с небольшим содержанием метана, углекислотный, богатый метаном, а также водный с низкой и высокой соленостью. Вряд ли во всех случаях сосуществующие водные и углекислотные включения являются результатом фазового разделения материнского водно-углекислотного флюида. Такое предположение подтверждается еще и тем фактом, что содержание метана в чистом углекислотном флюиде выше, чем в CO₂ составляющей водно-углекислотных включений. Этот факт свидетельствует о наличии отдельного источника для углекислотного флюида во время образования золото-кварцевых (±сульфид) жил. Маловероятно, что появление высокосоленной составляющей флюида в сланцевом поясе было связано только с метаморфизмом вмещающих вулканитов. Этот флюид с высокой соленостью по составу более сопоставим с флюидом из расположенных рядом гранитов. Таким образом, неоднородность флюидных характеристик для золотоносного сланцевого пояса Рамагири-Пенакачерла, скорее всего, свидетельствует о поступлении флюидов из нескольких источников, в том числе и из гранитоидов, а не только из метаморфитов.

Водно-углекислотный флюид, термобарометрия, КР-спектроскопия, метан, графит, гранит.

HETEROGENEITY IN FLUID CHARACTERISTICS IN THE RAMAGIRI-PENAKACHERLA SECTOR OF THE EASTERN DHARWAR CRATON: IMPLICATIONS TO GOLD METALLOGENY

S. Bhattacharya and M.K. Panigrahi

The auriferous Penakacherla-Ramagiri schist belt is a part of the granite-greenstone terrain of the Eastern Dharwar Craton. It is surrounded by gneissose basement and has a close spatial association with the younger granitoid units. Fluid inclusion assemblages studied from quartz veins in schists, quartz veins in granites and matrix quartz in granite indicate heterogeneity in fluid characteristics with methane-poor aqueous-carbonic, methane-rich carbonic, low-salinity aqueous, and high-salinity aqueous fluids. Coexisting aqueous and carbonic inclusions do not seem to be the product of phase separation of a parent aqueous-carbonic fluid on all instances. This is corroborated by the fact that the pure carbonic fluid is richer in methane than the carbonic component of the aqueous-carbonic inclusions. This warrants a separate source of carbonic fluid during deposition of the gold-quartz ± sulfide veins. A high-salinity component in the fluid in the schist belt is unlikely to be contributed by metamorphism of the host volcanic units; it is rather comparable to the high-salinity fluid present in the closely associated granites. Thus, it may be surmised that the heterogeneous-fluid characteristics in the auriferous Penakacherla-Ramagiri schist belt raises the possibility of fluid derivation from diverse sources, including the granitoids, rather than from a single metamorphogenic source.

Aqueous-carbonic fluid, thermobarometry, Raman spectroscopy, methane, graphite, granite

ВВЕДЕНИЕ

Происхождение и эволюция золотоносных рудных флюидов в гранитно-зеленокаменных поясах являются одними из самых спорных вопросов рудного генезиса. Дугообразные золотоносные сланцевые пояса (Колар, Хатти-Маски и Рамагири-Пенакачерла) восточной части кратона Дарвар имеют общее северо-южное направление. Они, как правило, приурочены к зонам смятия, проходящим через гнейсовый фундамент (гнейсовый комплекс Пенинсулар) [Chadwick et al., 2000; Manikyamba et al., 2004]. Из гранитных тел наибольшую площадь выхода имеют граниты комплекса Клозепет, который простирается параллельно золотоносным сланцевым поясам и прослеживается на 500 км. Становление и геохимическая эволюция этого комплекса в свое время были исследованы авторами работ [Moyen et al., 2001, 2003]. В обнажениях восточной части кратона Дарвар (EDC — Eastern Dharwar craton) присутствует ряд других

гранитных тел, их образование предположительно связано с ювенильным магматизмом, предшествующим основной фазе гранитной активности (комплекс Клозепет). Подобные тела были детально исследованы в южной части EDC [Jayananda et al., 2000]. Гранитоиды, находящиеся в непосредственной близости к сланцевым поясам Рамагири-Пенакачерла-Ханганд и Хатти-Маски, изучены намного хуже, и их временные взаимоотношения с золотоносными сланцевыми поясами пока неизвестны. Золотоносные сланцевые пояса Колар и Хатти были хорошо изучены в отношении флюидных характеристик включений и эволюции флюида [Mishra, Panigrahi, 1999; Mishra et al., 2005; Panigrahi, Gupta, 2007; Mishra, Pal, 2008]. М. Синха [Sinha, 1997] привел данные о флюидных включениях из западного блока Рамагири и показал, что преобладающим флюидом являлся углекислотный с незначительной водной составляющей. По нескольким водным и карбонатным включениям М. Синха определил узкий диапазон давлений (1450—1700 бар), соответствующий интервалу температур от 240 до 270 °С. К. Маникуямба с соавторами [Manikyamba et al., 2004] высказали свое предположение о природе рудного флюида по валовому химическому составу вмещающих метавулканических пород и полосчатых железистых кварцитов (BIF).

О характеристиках флюидных включений из сланцевого пояса Пенакачерла до сих пор нет никаких данных. В работе [Manikyamba et al., 2004] делается вывод о смешении флюидов из двух источников: мантийного и метаморфогенного, возникшего при дегидратации зеленокаменных пород. Перенос золота в сланцевом поясе EDC приписывается главным образом серосодержащему водно-углекислотному флюиду с низкой соленостью. Основным механизмом отложения золота считается фазовое отделение флюида при резком падении давления в результате циклического проявления разломной тектоники [Mishra, Pal, 2008]. Сопоставимость оценок *PT*-параметров для золоторудной минерализации в сланцевых поясах Хатти (1.0—1.7 кбар, 288—320 °С), Колар (1.8 кбар, 280 °С) и Рамагири (1.45—1.70 кбар, 240—267 °С) подразумевает, что эта минерализация является одним из периодов в истории кратона и имеет один источник флюида [Mishra, Pal, 2008]. Данное представление кажется упрощенным и неполным ввиду того, что для золоторудных проявлений, располагающихся в непосредственной близости к гранитоидам, характерен флюид, обедненный CO₂ и обогащенный магматической серой [Mishra et al., 2005; Saravanan et al., 2009]. Это повышает вероятность участия нескольких источников для рудного флюида. С учетом того, что во многих зеленокаменных террейнах золоторудные проявления пространственно приурочены к выходам гранитоидов, также необходимо детально изучить характеристики позднего флюида гранитоидов. Это требуется для того, чтобы проследить возможную взаимосвязь с золотоносными флюидами в других породах. В данной работе представлены результаты исследований флюидных включений сланцевого пояса Рамагири-Пенакачерла восточной части кратона Дарвар, а также обсуждается термобарометрическая эволюция флюидов.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Рамагири-Ханганд является крупнейшим зеленокаменным поясом в восточной части кратона Дарвар. Он простирается на С—ССЗ, и его длина составляет 350 км (рис. 1). Рамагири-Ханганд сложен двумя сланцевыми поясами: Ханганд и Рамагири-Пенакачерла, которые разделены маломощной зоной гранитоидов, идущей вдоль р. Тангабхабра [Ramakrishnan, Vaidyanadhan, 2008]. Рассмотрим последний более подробно. В районах Рамагири и Пенакачерла в начале прошлого века проводилась широкомасштабная подземная добыча золота. В области Рамагири пояс приобретает трехзубчатый облик, и золоторудная минерализация прослеживается с севера на запад на 15 км от Ченнабхави через Рамагири и до Джибутила. С 1910 по 1917 г. объем выработки крайне высококачественной руды золотого поля Рамагири составил 5000 кг золота при его концентрации 15 г/т [Vasudev, 2009]. В общем литология зеленокаменного пояса Рамагири-Пенакачерла включает метавулканиты и метаосадочные породы (в том числе амфиболиты, карбонатсодержащие филлиты и фельзитовые, мафитовые-ультрамафитовые и карбонатные сланцы), а также небольшие тела полосчатых железистых кварцитов. Через центральную часть пояса проходит зона смятия, которая маркируется милонитами. В основном золоторудная минерализация приурочена к сульфидсодержащим кварцевым жилам (±карбонат, ±серицит, ±хлорит — в качестве продуктов изменения средней или сильной интенсивности), секущим метабазитовые породы. Золото в кварцевых жилах встречается как в самородном виде, так и в качестве примесей в сульфидах.

В Рамагири и Пенакачерле наиболее богатыми Au являются голубовато-серые, дымчатые, серовато-белые и кремнисто-сульфидные кварцевые жилы. Жилы с белым кварцем в районе Пенакачерла, напротив, не содержат никакой минерализации. Пояс окружен гнейсами фундамента (Peninsular Gneiss), которые являются самой распространенной литологической единицей в рассматриваемой зоне и имеют четкие признаки мигматизации. Более молодые гранитные тела (2.7—2.5 млрд лет) рассматриваются как часть баголита Дарвар [Chadwick et al., 2000]. Их спорадические выходы пространственно связаны с кристаллическим поясом Рамагири-Пенакачерла (см. рис. 1). В состав этих гранитных тел входят различные генерации даек/жил мелкозернистых аплитов, а также сеть более поздних пегматитов и кварц-

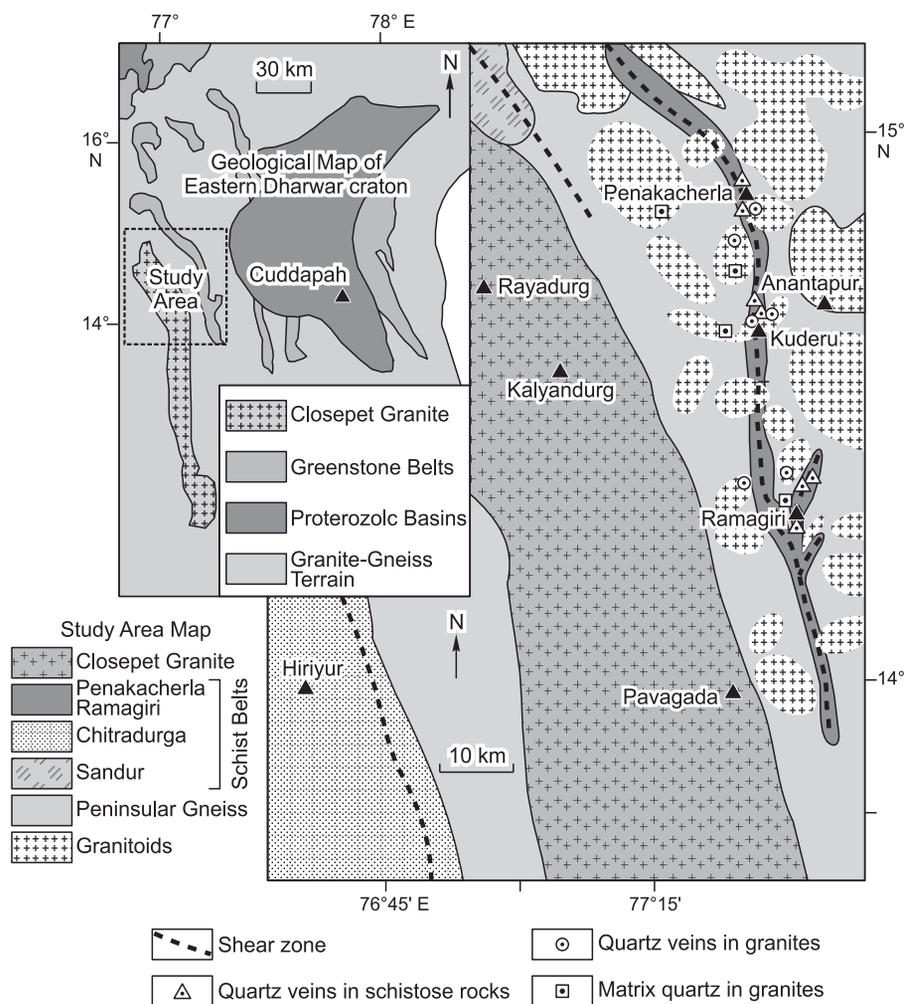


Рис. 1. Геологическая карта района исследований, на которой изображены пояс Рамагири-Пенакачерла, часть гранитов Клозепет, гнейсы Пенинсулар и более молодые тела гранитоидов, по [Manikamba et al., 2004] с изменениями.

Точки пробоотбора, отмеченные за пределами сланцевого пояса, соответствуют более молодым гранитам.

полевошпатовых жил, что указывает на продолжительную фельзитовую магматическую и гидротермальную активность флюидов. Именно этим гранитным телам наряду с кварцевыми жилами золотоносного сланцевого пояса Рамагири-Пенакачерла было уделено особое внимание, и из них был произведен отбор образцов.

ПЕТРОГРАФИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Четыре образца гранитов (включения в первичном кварце), семь образцов кварцевых жил, секущих граниты, и двенадцать образцов кварцевых жил, секущих сланцеватые метавулканические породы, содержащие золоторудную минерализацию, были рассмотрены на предмет наличия флюидных включений. Семнадцать образцов содержали подходящие для исследований включения (четыре, шесть и семь образцов из гранитоидов, кварцевых жил в гранитоидах и кварцевых жил в сланцах соответственно). Из этих образцов были сделаны двусторонне полированные пластинки (~200—300 мкм толщиной). Согласно стандартным критериям [Roedder, 1984], первичные и первично-вторичные включения были выделены во всех трех вышеперечисленных типах пород. Для выделения ассоциаций флюидных включений в кварцевых зернах проводились их петрографические исследования. Включения были определены и разделены на категории по идентифицируемым в них фазам, таким как H_2O_l , $H_2O_{ж}$, CO_{2l} , $CO_{2ж}$ и твердые фазы. Определение фаз производилось с помощью оптического микроскопа в проходящем свете.

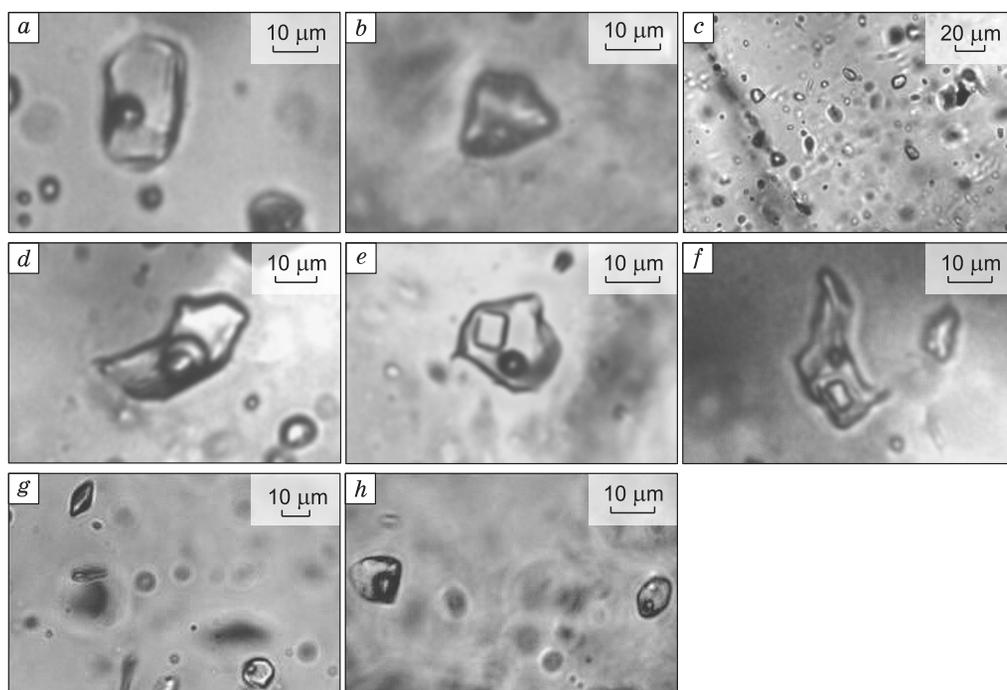


Рис. 2. Представительные флюидные включения.

a — I типа из обр. qvg-типа; *b* — II типа из обр. qvg-типа; *c* — II типа из обр. qvs-типа; *d* — III типа из обр. qvs-типа; *e* — IV типа из обр. qg-типа (дочерняя фаза — галит); *f* — IV типа из обр. qvs-типа (дочерняя фаза — галит); *g* — I и II типов из обр. qvs-типа; *h* — III и IV типов из обр. qvs-типа.

I тип (водные двухфазные включения). При комнатной температуре во включениях I типа присутствуют две фазы ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$). Этот тип включений является самым распространенным для всех образцов (см. рис. 2, *a*). Размер включений варьирует, достигая 15 мкм в длину. В пластинках из кварцевых жил, секущих сланцеватые метавулканиды, включения часто имеют форму отрицательных кристаллов. Некоторые однофазовые включения находились в метастабильном состоянии и после того, как были заморожены, а затем вновь нагреты до комнатной температуры, они становились двухфазовыми.

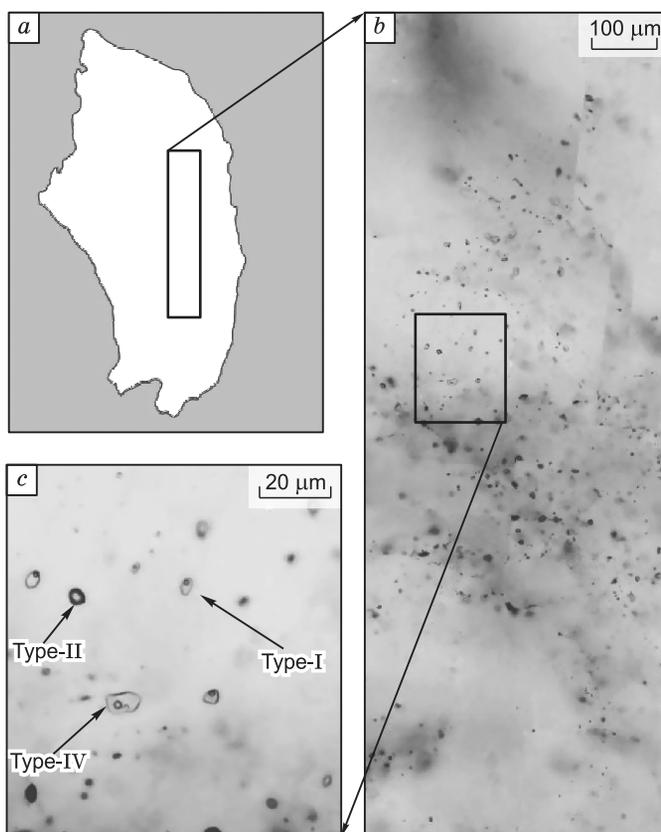
II тип (включения чистой CO_2). Включения II типа более темные, чем остальные. При комнатной температуре они могут быть как однофазовыми (Ж_{CO_2}), так и двухфазовыми ($\text{Ж}_{\text{CO}_2} + \Gamma_{\text{CO}_2}$). В пластинках из кварцевых жил, секущих кристаллические сланцы, большинство включений, за редким исключением, являются однофазовыми (см. рис. 2, *b*). Значимая часть включений из зерен кварца гранитов является двухфазовыми. Включения II типа в большинстве случаев являются первичными, кроме нескольких штук, которые образуют связанные между собой цепочки. Их размер варьирует от < 5 до 30 мкм. Эти включения, особенно в образцах из кварцевых жил, секущих сланцеватые породы, содержат графит в виде твердой фазы, имеющей волокнистый габитус. Присутствие графита было подтверждено КР-спектроскопией.

III тип (водно-углекислотные включения). Включения III типа при комнатной температуре могут быть как двух- ($\text{Ж}_{\text{CO}_2} + \text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}$), так и трехфазными ($\text{Ж}_{\text{CO}_2} + \Gamma_{\text{CO}_2} + \text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}$) (см. рис. 2, *c, d*). Во включениях из кварцевых жил, секущих гранит, и из кварца гранита углекислотная фаза представлена $\text{Ж} + \Gamma$, в то время как во включениях из кварцевых жил в сланцеватых породах она встречается только в жидком состоянии. Эти включения имеют различную морфологию: от округлой до формы отрицательного кристалла. Объемная доля CO_2 варьирует в значительной степени, хотя и остается постоянной в пределах отдельных кластеров.

IV тип (водные многофазовые включения). Во включениях IV типа наряду с $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ присутствуют дочерние кристаллы галита (см. рис. 2, *e*). Эти включения наиболее распространены в образцах из кварцевых жил в сланцеватых породах, также они часто встречаются в кварцевых жилах, секущих гранит. Многие включения кварцевых жил из сланцев района Пенакачерла расшнурованы (см. рис. 2, *f*). Скорее всего, это результат девиаторного напряжения [Tarantola et al., 2010; Diamond et al., 2010], а не то, что включения прошли неизохорный путь, как это было показано в работе [Vityk, Vodnar, 1995].

Рис. 3. Микрофотографии ассоциации флюидных включений из зерна кварца qvs-типа.

a — контур зоны; *b* — увеличенная прямоугольная врезка, на которой показаны включения в одной плоскости фокуса; *c* — увеличенное изображение прямоугольной врезки (*b*) с ассоциацией включений I, II и IV типов.



Четыре типа включений присутствуют в трех образцах, где также были выявлены сингенетичные включения разного состава (рис. 3), что служит показателем разнообразия флюидной активности во всех породах изучаемого района. Какая-то определенная временная последовательность захвата разных типов включений практически не прослеживается. Включения I и II типов существуют как в кварцевых жилах, секущих сланцы (рис. 2, *g*), так и в гранитах. Также обычным явлением можно считать присутствие I и III типов включений в зернах кварца из гранитов. Включения I типа могут встречаться как в виде отдельных линейных цепочек, так и в виде трехмерной сетки без каких-либо заметных отличий их характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Микротермометрические измерения 387 включений осуществлялись с помощью термокриокамеры THMSG-600 фирмы Linkam. Точность прибора калибровалась по включениям чистой H_2O и природным включениям H_2O-CO_2 . Температуры криоизмерений воспроизводились с точностью ± 0.1 °C, термоизмерений — с точностью ± 1 °C. Измерения выполнялись только для первичных и первично-вторичных (псевдвторичных) включений. Из микротермометрических исследований исключались включения: расшнурованные; из которых, вероятно, произошла утечка вещества и похожие на вторичные в залеченных трещинах.

I и IV типы включений. Для включений I типа во всех образцах T_{fm} (температура первого плавления) варьирует в широких пределах. 90 % значений попадают в интервалы от -52 до -64 °C и от -20 до -32 °C (рис. 4). Их наличие предполагает присутствие электролитов как обогащенных, так и обедненных Са. Примечательно, что Са-содержащие включения имеют низкое Г/Ж отношение и для повторного появления газового пузырька после гомогенизации требуют более сильного переохлаждения. Не было обнаружено обогащенных Са включений, сингенетичных углекислотным. Соленость включений I типа, рассчитанная по T_m (температура плавления), колеблется между 1—26, 1—33 и 2—28 мас. % NaCl-экв. для образцов из кварцевых жил в сланцеватых породах (qvs-тип) и гранитах (qvg-тип) и из кварца гранита (qg-тип) соответственно. T_h для включений I типа изменяется от 90 до 296 °C, от 80 до 413 °C и от 104 до 230 °C в соответствии с тремя вышеперечисленными типами кварца. Все эти включения гомогенизовались в жидкую фазу, что исключает кипение в любой точке времени захвата. На рис. 5 *a, b*; 6, *a, b*; 7, *a, b* представлены гистограммы солености (в мас. % NaCl-экв.) и температуры гомогенизации для трех разных типов исследованных образцов. Соленость водных включений (I и IV типы) из кварцевых жил, секущих сланцы, заметно выше, чем из других типов пород. Не было выявлено какого-либо значимого максимума в распределении солености водных включений в других образцах. И в кварцевых жилах, и в кварце гранита наблюдается непрерывный ряд значений солености. Меньшую долю в нем составляют включения с более высокой соленостью. T_h водных включений имеют наименьшие значения в образцах qg-типа (см. рис. 7, *b*), умеренно высокие — в образцах qvs-типа (см. рис. 5, *b*) и более высокие — в образцах qvg-типа (см. рис. 6, *b*). Во многих включениях IV типа из кварцевых жил, секущих сланцы, наблюдается растворение кристалликов галита до гомогенизации газ—жидкость (см. рис. 5, *b*).

II и III типы включений. Существует заметная разница в характеристиках углекислотного флюида в образцах из кварцевых жил, секущих сланцы, и из гранитов. В первых жилах (qvs) значения T_m

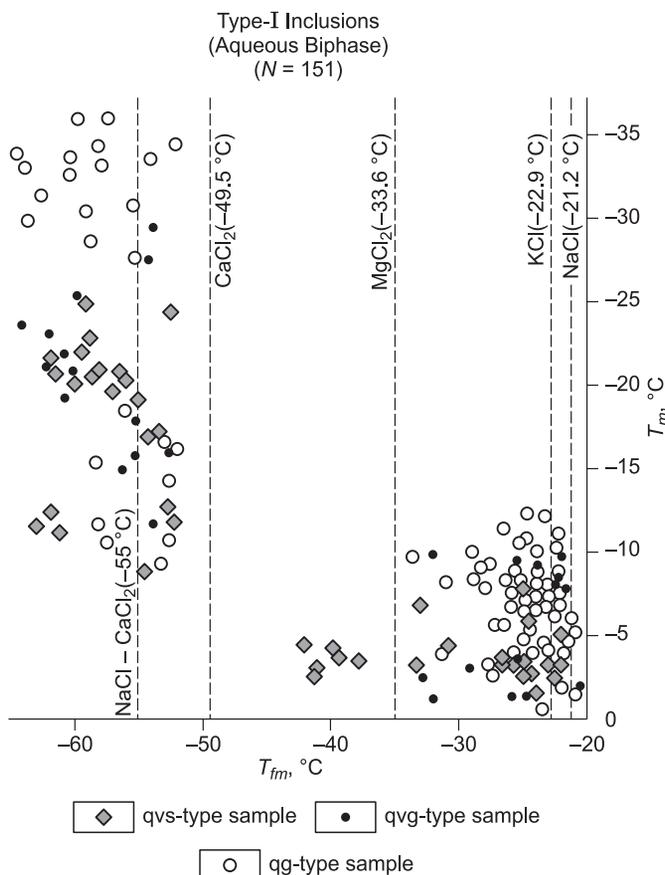


Рис. 4. График T_m-T_{fm} для включений I типа.

Пояснение см. в тексте.

CO_2 варьируют от -64.9 до -56.6 °C (см. рис. 5, c), в то время как во вторых жилах (qvg) эти значения группируются около -56.6 °C (см. рис. 6, c; 7, c). Подобные низкие значения T_m для кварцевых жил в сланцах свидетельствуют о том, что во включениях помимо CO_2 присутствуют другие неполярные газы (в основном CH_4). Это также подтверждается данными КР-спектроскопии. Во включениях II и III типов от северной части зеленокаменного пояса в районе Пенакачерлы через Кудеру и до южной части в районе Рамагири наблюдается пространственная вариация значений T_m CO_2 (рис. 8). На рисунке видно, что количество включений II и III типов с самыми низкими значениями T_m и T_h CO_2 в районе Рамагири заметно выше. На рисунках 6, c-f; 7, c-f представлены результаты криометрических измерений включений II и III типов из образцов qvg- и qg-типов (кварцевых жил из гранитов и из кварца самих гранитов). Интервалы T_h CO_2 для включений II типа из образцов qvs-, qvg- и qg-типов (кварцевых жил в сланцах и гранитах, и из кварца гранитов) составляют от -52.8

до 31.1 °C (см. рис. 5, d), от -10 до 28 °C (см. рис. 6, d) и от -3.4 до 31.1 °C (см. рис. 7, d) соответственно. Этот же параметр для включений III типа варьирует от -15.3 до 31.1 °C (см. рис. 5, f), от 17.5 до 31.1 °C (см. рис. 6, f) и от 28.9 до 30.8 °C (см. рис. 7, f) в соответствии с указанным выше порядком типов исследованных пород. T_h CO_2 для включений II и III типов из кварцевых жил, секущих сланцы, тоже имеют пространственные вариации с севера на восток от Пенакачерлы через Кудеру и до Рамагири (см. рис. 8, c, d).

Авторы работы [Panigrahi, Gupta, 2007] отметили, что для углекислотных включений из образцов перспективных площадей сланцевого пояса Хатти-Маски характерно обогащение метаном. Б. Мишра и Н. Пал [Mishra, Pal, 2008] пришли к выводу, что отложение золота происходило в условиях низкой фугтивности кислорода (f_{O_2}) и pH. Это, вероятно, отражается в более высоком содержании метана в углекислотном компоненте флюида из богатых золотом территорий. В области наших исследований сланцевого пояса наиболее золотоносным до сих пор является район Рамагири. За ним следует район Пенакачерла, а затем незолотоносные (пустые) участки около Кудеру. Самые низкие значения T_m и T_h CO_2 наблюдались во включениях II и III типов района Рамагири, в то время как в других двух районах эти два параметра имеют средние значения (см. рис. 8). Наименьшая T_h CO_2 отмечена для включений II типа. Ее значение составляет -52.8 °C и согласуется с самым высоким содержанием CH_4 , что подтверждается результатами лазерной КР-спектроскопии. Во включениях II и III типов углекислая фаза гомогенизируется в жидкость. Практически во всех включениях III типа (особенно для включений с высоким содержанием CO_2) перед полной гомогенизацией происходила разгерметизация. Это связано с нарастанием высокого внутреннего давления.

ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ

В данной работе мы попытались оценить давления по полной гомогенизации включений III типа. Для этого была использована методика, описанная в статье [Panigrahi, Mookherjee, 1997]. Метод сочетает в себе модифицированное уравнение состояний Редлича-Квонга (modified Redlich-Kwong — MRK) для системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ [Bowers, Helgeson, 1983] и способ оценки объемной доли углекислого компонента в водно-углекислотных включениях [Parry, 1986]. Необходимо отметить, что из 69 включений III типа из разных пород только 17 включений (10, 5 и 2 включения из образцов qvs-, qvg- и qg-ти-

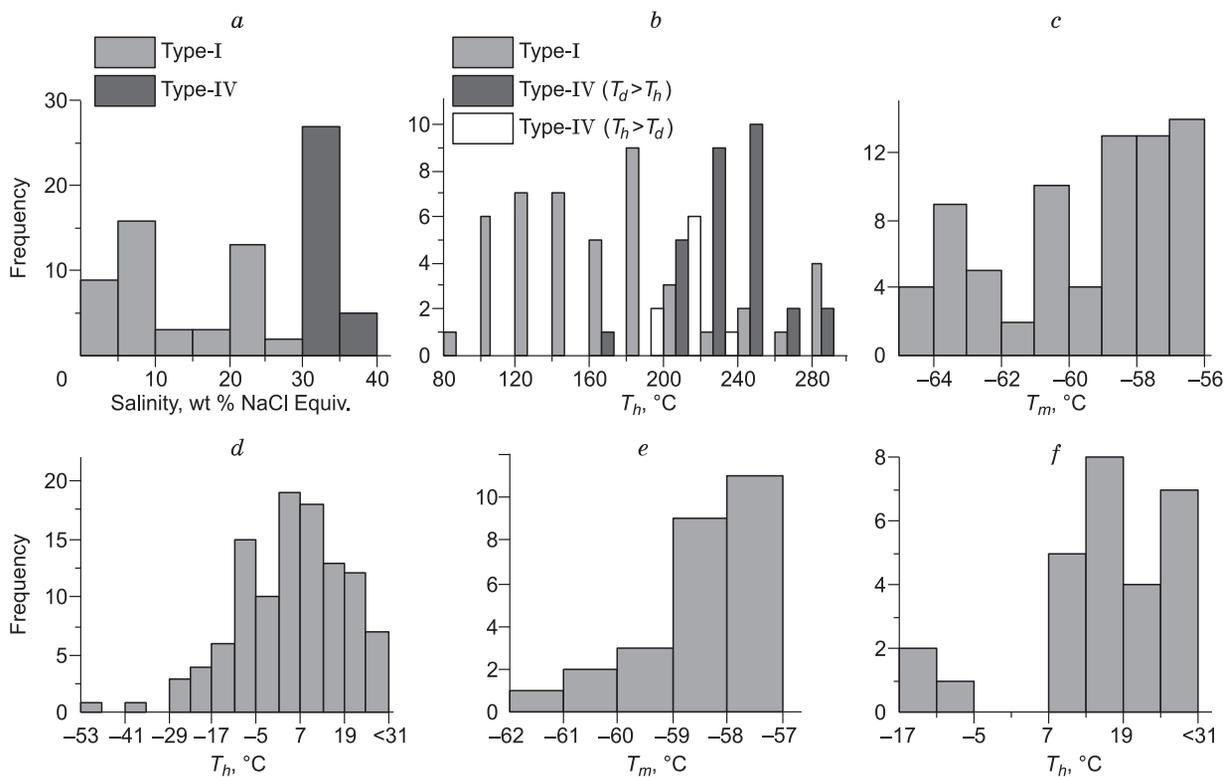


Рис. 5. Гистограммы для включений из образцов qvs-типа.

a, b — соленость и T_h включений I и IV типов; *c, d* — T_m и T_h CO_2 включений II типа; *e, f* — T_m и T_h CO_2 включений III типа. T_d — температура декрепитации.

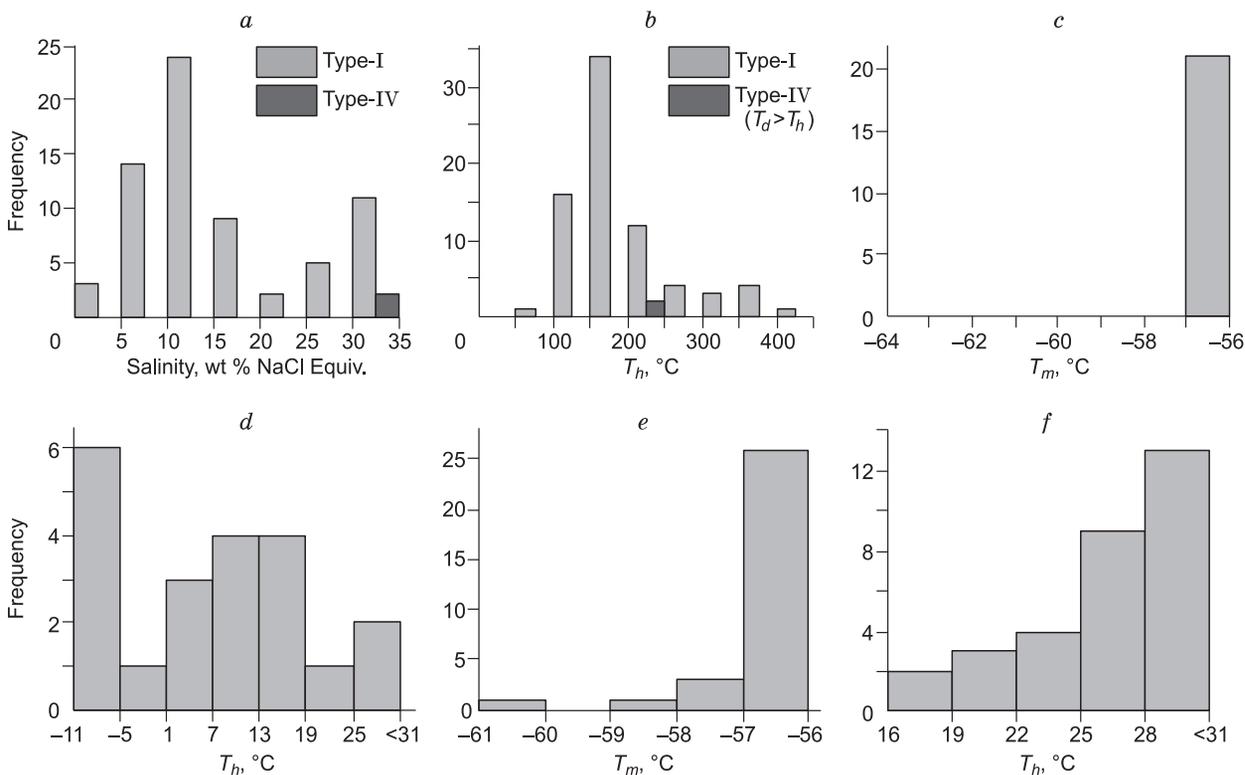


Рис. 6. Гистограммы для включений из образцов qvg-типа.

a-f — см. на рис. 5.

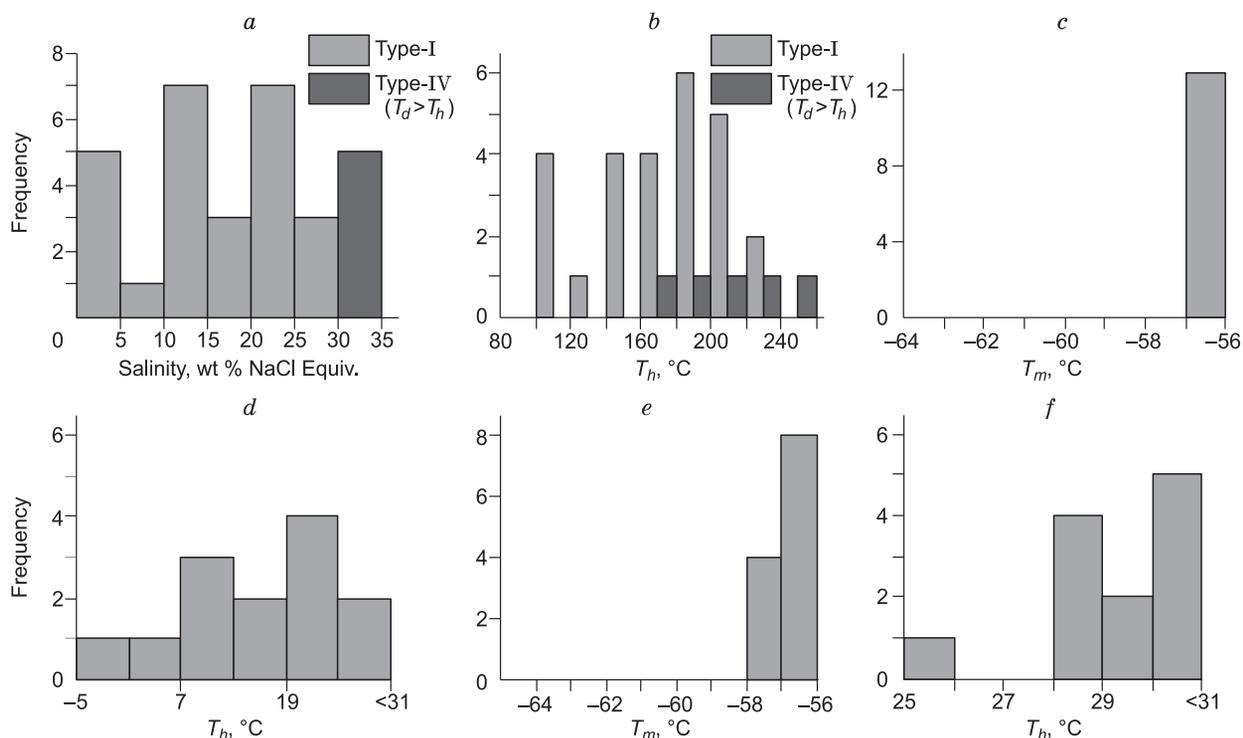


Рис. 7. Гистограммы для включений из образцов qg-типа.

a—f— см. на рис. 5.

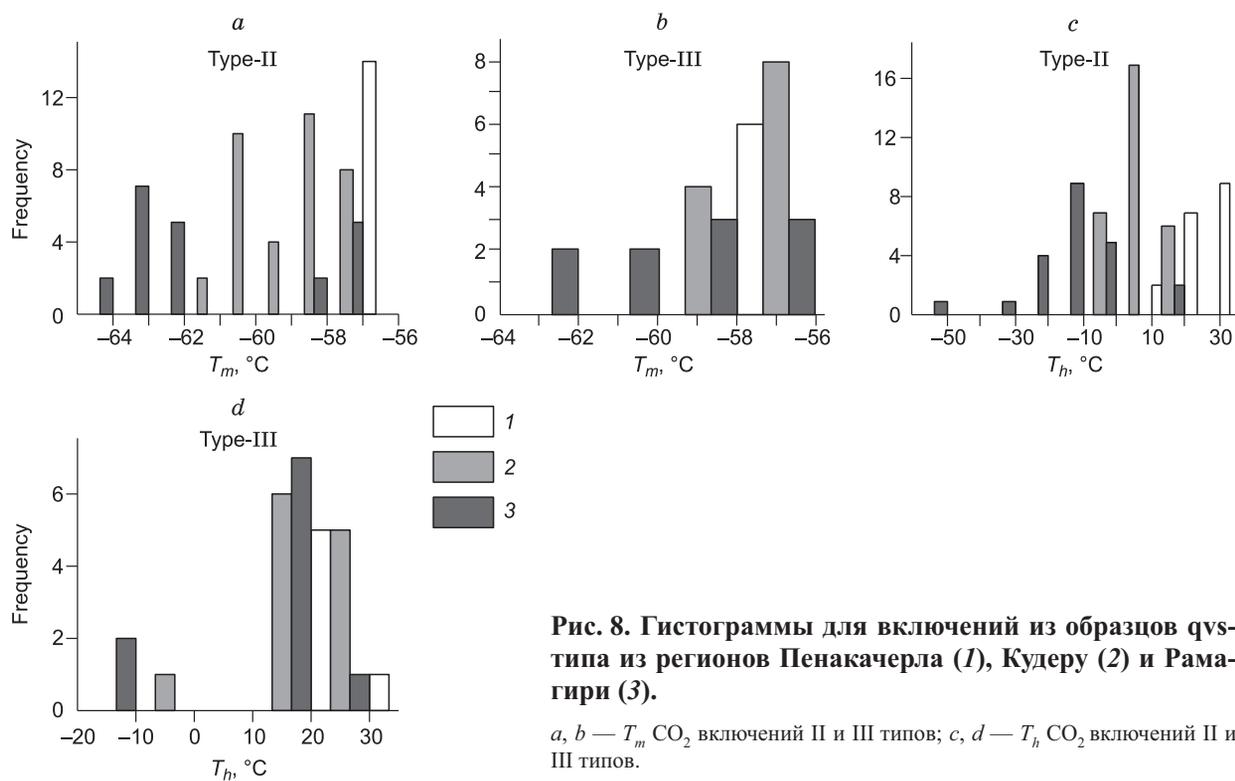


Рис. 8. Гистограммы для включений из образцов qvs-типа из регионов Пенакачерла (1), Кудеру (2) и Рамагири (3).

a, b — T_m CO₂ включений II и III типов; c, d — T_h CO₂ включений II и III типов.

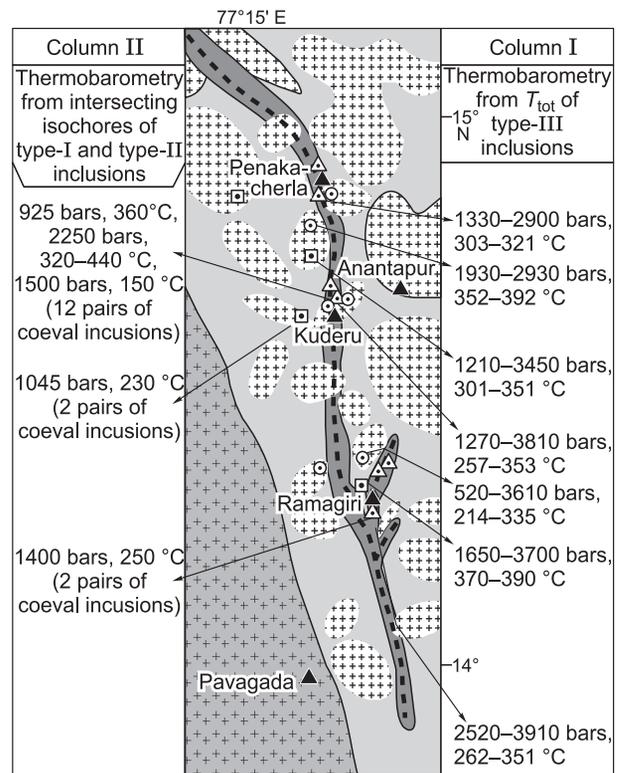
Рис. 9. Пространственные изменения давления, определенные по термобарометрическим данным для включений III типа и сингенетических включений I и II типов.

Пояснение см. в тексте. Усл. обозн. см. на рис. 1.

пов соответственно) показали воспроизводимые температуры полной гомогенизации. Одно включение III типа из образца qvs-типа и все включения III типа из qvg-типа гомогенизировались в водную фазу. Остальные включения III типа гомогенизировались в углекислую фазу. Оцененные по этим включениям давления являются минимальными давлениями захвата. На рис. 9 (колонка I) наглядно показана вариация этих значений в пространстве на ~ 120 км вдоль сланцевого пояса Рамагири-Пенакачерла. Температура полной гомогенизации для этих включений изменяется от < 250 до > 400 °C.

Несмотря на значительные колебания давлений в каждой точке пробоотбора сланцевого пояса, видимых закономерностей в вариации давлений в пространстве не наблюдается. Разница между минимальным и максимальным рассчитанным давлением составляет ~ 1 кбар, что, возможно, указывает на разницу глубины около 3 км в пределах от самой северной до самой южной части рассматриваемой области сланцевого пояса. Хотя эта разница означает выход на дневную поверхность более глубоких пород в южном направлении, что в целом согласуется с синклиальной структурой с погружением на юг для кратона Дарвар [Ramakrishnan, Vaidyanadhan, 2008]. Но это требует больше данных для подтверждения подобной интерпретации. В пределах ограничения метода измерений давлений можно предполагать, что структурный уровень всех выходов пород сланцевого пояса примерно одинаков, а все колебания давлений связаны с изменением характера давления, переходного от литостатического к гидростатическому [Roedder, Bodnar, 1980]. Давления и температуры (см. рис. 9, колонка I) соответствуют значениям солености водного компонента от ~ 8 мас. % NaCl-экв. до нуля и не выходят за рамки возможности применения формул Т.С. Боверса и Х.К. Хелгесона [Bowers, Helgeson, 1983]. При внимательном рассмотрении максимальных значений давлений, рассчитанных для разных точек пробоотбора с севера на юг, означающих минимальную глубину в 9—12 км, можно допустить, что давление было литостатическим. Минимальное давление, рассчитанное для этих образцов, значительно выше вероятного гидростатического давления этих глубин. Минимальное давление в одной из точек сланцевого пояса Рамагири составляет 520 бар, что гораздо меньше, чем предполагаемое для этой глубины гидростатическое давление. Возможно, это связано с использованием экстраполяции для температур, значения которых были ниже допустимой границы применяемой формулы.

Как уже упоминалось в разделе «Петрография», ассоциации первичных флюидных включений содержат зоны включений III типа и зоны сингенетических включений I и II типов. Независимо от происхождения включений I и II типов (фазовая сепарация материнского водно-углекислотного флюида или захват флюидов из различных источников в месте кристаллизации или перекристаллизации) можно их совместно использовать для оценок давления, существовавшего в момент их захвата. Было выбрано 16 подобных пар из образцов сланцевого пояса и из примыкающих к сланцевому поясу гранитов (см. рис. 9, колонка II). Давление 1045 бар при температуре 230 °C в районе Кудеру находится в пределах двухфазового поля смешанного водно-углекислотного флюида. Значения 1400 бар при 250 °C в районе Рамагири, так же как и 1500 бар при 150 °C в районе Кудеру, возможно, указывают на то, что вероятной причиной несмесимости послужило снижение температуры материнского флюида. Однако более высокие значения давлений и температур (более 2 кбар и 300 °C), полученные для пар включений I и II типов, не совсем согласуются с режимом несмесимости, соответствующим валовому составу. Такие значения могут свидетельствовать о других процессах, отличных от фазового разделения. Один из них был предложен в работе [Manikyamba et al., 2004] для углекислотного флюида Пенакачерлы, и заключается он в возможном захвате высокоплотного углекислотного флюида из других источников.



КР-СПЕКТРОСКОПИЯ

Предварительные исследования с помощью КР-спектроскопии были выполнены для представительных включений всех типов во всех изученных в данной работе образцах. КР-спектры флюида включений были получены с помощью Renishaw System RM 1000B Laser Raman Microspectrometer. Для работы использовался аргоновый ионный лазер мощностью 20 мВт, длиной волны 514 нм с сеткой 1800 л/мм и краевым фильтром с отсечением волн $< 200 \text{ см}^{-1}$. Были получены спектры в расширенном диапазоне от 1000 до 3000 см^{-1} . В этот интервал попадают основные пики CO_2 , CH_4 , N_2 и большинства водно-сернистых соединений. Результаты спектрометрических измерений представлены на рис. 10. Спектры включений чистой углекислоты (II тип) из образцов кварцевых жил, секущих сланцы (qvs-типа), показаны на рис. 10, *a—d*. На спектрах хорошо проявлены два пика CO_2 (~ 1280 и 1386 см^{-1}), единичный пик CH_4 ($2911—2916 \text{ см}^{-1}$) и три пика графита (S — 2700, O — 1586, D — 1350 см^{-1}). Полуколичественные оценки молярной доли газовой фазы в работе не приводятся. Все спектры рассматриваются качественно. Из графиков видно, что углекислотные включения варьируют по составу в основном от метановых \pm графит (см. рис. 10, *a, b*), $\text{CO}_2 \pm$ метан \pm графит (см. рис. 10, *c*) и преимущественно до CO_2 с незначительной долей метана \pm графит (см. рис. 10, *d*).

Водно-углекислотные включения (III тип) из образцов qvs- и qg-типов содержат только подчиненное количество метана с его незначительными вариациями, но графита в этих включениях обнаружено не было (см. рис. 10, *e, f*). Ранее уже рассматривалась важность графитосодержащих включений для золоторудных сланцевых поясов восточной части кратона Дарвар [Pal, 2003; Panigrahi, Gupta, 2007; Mishra, Pal, 2008]. Считается, что отложение графита во включениях происходит из флюида $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ при реакции $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 = 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$. Это связано со снижением давления при изотермической декомпрессии. Подобные изменения давления после захвата в зависимости от молярного отношения CO_2/CH_4 во флюиде включения могли привести к любой из четырех ситуаций: метан + графит (см. рис. 10, *b*), метан + $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ (см. рис. 10, *c*), $\text{CO}_2 +$ графит и вода + графит. Во всех случаях кроме последнего пленка воды смачивает стенки включения и зачастую оптически не видна, но определяется по КР-спектрам. Включения состава $\text{CO}_2 +$ графит и вода + графит в данной работе отмечены не были. В то время как первая из описанных выше четырех ситуаций будет означать, что $\text{CO}_2 < \text{CH}_4$, а третья будет указывать на обратное соотношение. Вторая ситуация является признаком незавершенной реакции, а четвертая означает эквимоллярные доли двух газовых фаз. Несмотря на то, что изотермическая декомпрессия, вероятно, была более поздним явлением, разнообразие соотношений CO_2 и CH_4 во флюиде имеет важное значение для золотоносной минерализации, так как отражает окислительно-восстановительные характеристики флюида.

В работе [Panigrahi, Gupta, 2007] показано, что отложение графита при снижении давления более вероятно для смеси двух газообразных компонентов, захваченных при более высоких температурах. Авторы статьи [Mishra, Pal, 2008] сделали вывод о том, что во включениях для отложения графита в углекислотном флюиде температуры захвата должны быть выше $400 \text{ }^\circ\text{C}$. КР-спектры водных включений и водного компонента включений III типа не обнаруживают каких-либо фаз, содержащих серу. Во многих включениях II и III типов отмечаются следы азота (пик 2330 см^{-1}) (см. рис. 10, *a, d*).

ЭВОЛЮЦИЯ ФЛЮИДА

На рис. 11 представлены парные графики солености и гомогенизации водных включений (I и IV типы). Следует отметить, что значения солености многих включений I типа (особенно из кварцевых жил в гранитах) не находятся на кривой насыщения галита, что свидетельствует о присутствии Са в системе. Такие включения имеют самую высокую температуру гомогенизации, сопоставимую с T_h водно-углекислотных включений из тех же образцов. На графике температура—соленость включения I типа из кварцевых жил, секущих сланцы, распределены равномерно, хотя и имеют ограничения по температуре. Несмотря на то, что наблюдается общее сходство включений из кварцевых жил, секущих сланцы, и из кварца гранитов, данных для последних недостаточно.

Как уже было изложено ранее, для включений I типа не было отмечено богатых газом включений и гомогенизации в газовую фазу, что исключает кипение флюида и сопутствующее увеличение солености. Таким образом, различие в солености при схожих температурах гомогенизации включений всех типов пород (особенно кварцевых жил, секущих сланцы и граниты) не может быть связано с кипением. Такой тренд можно отнести на счет смешения высокосолевого флюида с компонентом низкой солености, природа которого пока не может быть точно установлена. Низкотемпературный флюид с низкой соленостью из гранитов (кварца гранитов), возможно, является метеорным флюидом, который просачивался на стадии отложения/перекристаллизации кварца. Для кварцевых жил, секущих сланцы, и граниты, более высокая температура, возможно, означает присутствие либо нагретой метеорной воды,

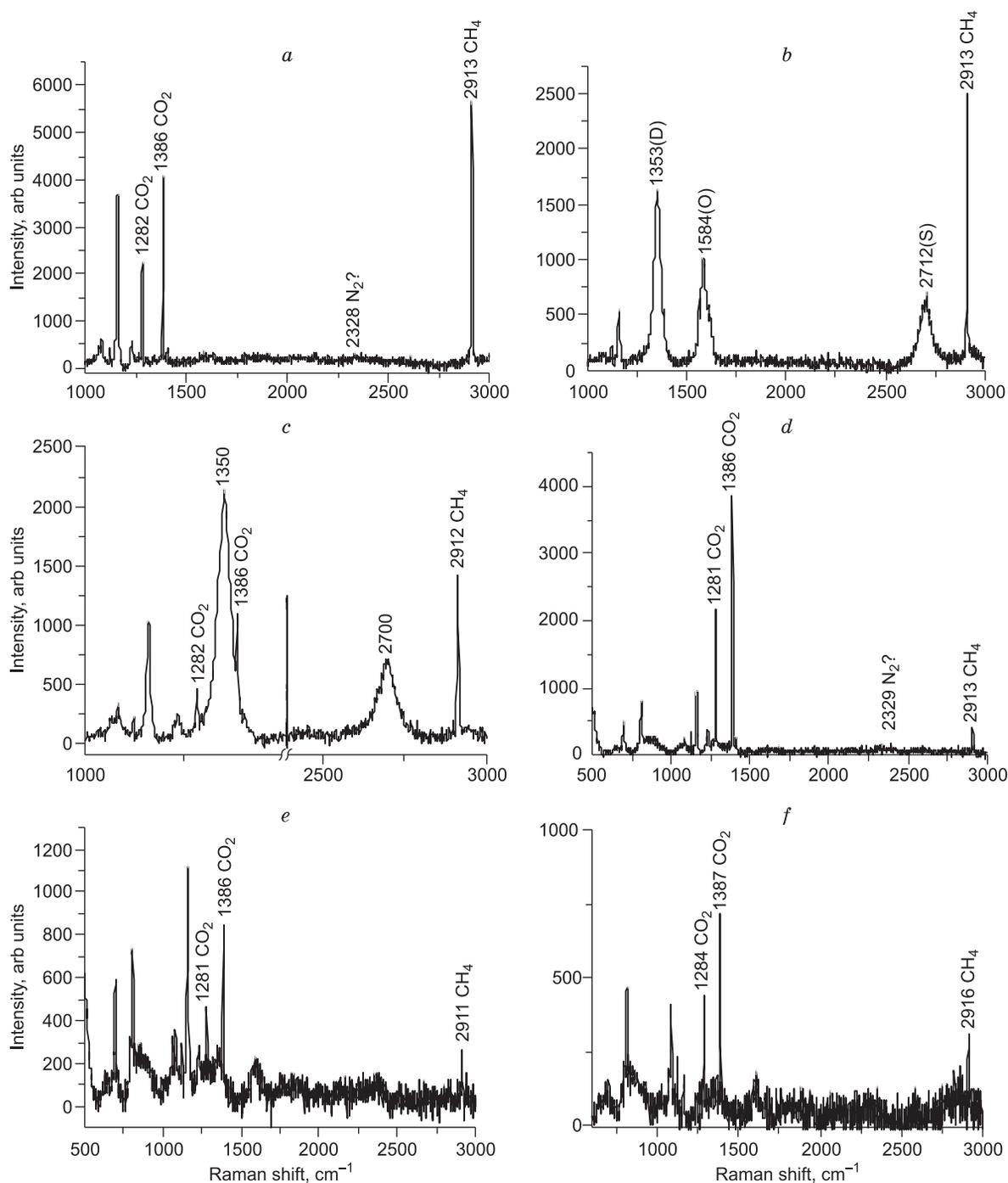


Рис. 10. Характерные КР-спектры включений II и III типов.

a–c — включения II типа из вмещающих сланцев; *d* — включения III типа из вмещающих сланцев; *e* — включения III типа из кварцевых жил в гранитах; *f* — включения III типа из кварцевых зерен гранитов. Колебание пика CH_4 (2911—2916 cm^{-1}) указывает на различие в концентрации углекислотного компонента [Lin et al., 2007].

либо водного флюида, отделившегося от гранита во время поздней стадии магматогенно-гидротермальной активности. Поскольку появление флюидов с высокой соленостью вряд ли возможно за счет удаления летучих при метаморфизме, то их присутствие в кварце из сланцев в сочетании с относительно высокосоленным флюидом в гранитах, вероятно, взаимосвязано. Нужно отметить, что температуры гомогенизации водных включений не были откорректированы по давлению. Если оценивать качественно, то включения с низкой соленостью (будучи менее плотными и более сжимаемыми), очевидно, требуют более значительных поправок по давлению, чем включения с высокой соленостью. В этом случае захват

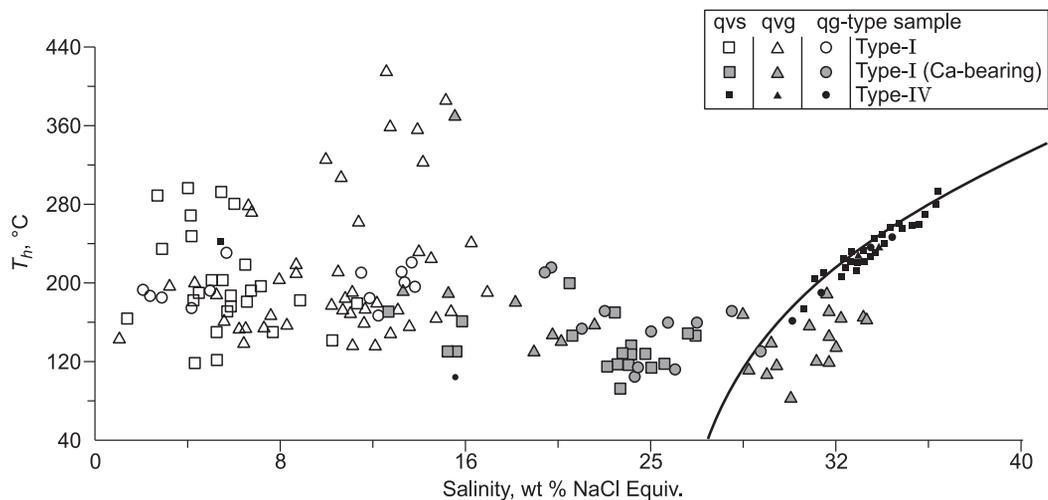


Рис. 11. Графики T_h — соленость для включений I и IV типов.

qvs — образцы кварцевых жил, секущих сланцеватые породы, qvg — образцы кварцевых жил, секущих граниты, qg — образцы кварца из гранитов.

включений с низкой соленостью из сланцев и гранитов происходил бы при температурах, которые больше согласуются с отделившимся магматическим флюидом, чем с метеорным. Большое количество водных включений с низкой соленостью по температурному режиму близко соответствует водно-углекислотным включениям, и, следовательно, они могут являться результатом фазового разделения.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Ассоциации флюидных включений, изученные в золоторудных сланцевых поясах района Рамагири-Пенакачерла, свидетельствуют об общей неоднородности флюида, который просачивался по крупномасштабной зоне смятия и служил причиной отложения золота. Водно-углекислотный флюид с низкой соленостью, вероятно, имел метаморфогенный источник. Фазовое разделение этого метаморфогенного флюида привело к появлению чистого водного флюида с низкой соленостью и углекислотного флюида. Включения средней и высокой солености (часто содержащие значимое количество Ca) вряд ли имеют тот же метаморфогенный источник. В статье [Yardley, 2005] рассмотрена возможность того, что образование рассолов могло происходить при низкоградном или ретроградном метаморфизме. В нашем случае трудно представить, что происхождение водно-соленого флюида было метаморфогенным, так как маловероятно, что метаморфизм одних и тех же материнских пород привел к образованию двух разных флюидов.

Другим возможным вариантом источника таких флюидов могли служить близлежащие гранитоиды. Водносольевой флюид, наблюдаемый в золоторудном сланцевом поясе Рамагири-Пенакачерла, имеет большое сходство с водно-солевым флюидом гранитов. Это позволяет предположить тесную генетическую связь между золоторудной минерализацией и гранитоидами. В обзоре [Ridley, Diamond, 2000] рассмотрена возможность близкой генетической взаимосвязи между гранитоидами и золоторудной минерализацией. Такую генетическую связь часто трудно установить, если вблизи золоторудных зеленокаменных поясов гранитоиды отсутствуют. В восточной части кратона Дарвар было несколько фаз гранитной активности, и эти гранитоиды находятся в близкой пространственной ассоциации с золоторудными сланцевыми поясами. Несмотря на такие близкие временные и пространственные соотношения, с точки зрения взаимосвязи источника флюидов и металла гранитоидам не было уделено достаточно внимания.

В работах [Cassidy et al., 1998; Bucci et al., 2002] описаны золоторудные месторождения блока Уилгарн в Западной Австралии. Для этого месторождения допускается четкая генетическая связь между минерализацией и гранитоидами. Авторы статьи [Panigrahi, Gupta, 2007] из сравнения флюидных характеристик сделали предположение о возможной связи между золоторудной минерализацией сланцевого пояса Хатти-Маски и более поздней фазой гранитной активности (граниты Кавитал). Э.Дж. Роджерс с соавторами [Rogers et al., 2007] и Д.С. Сарма с коллегами [Sarma et al., 2009] предоставили геохронологические данные для золоторудного месторождения Хатти, находящегося рядом с гранитами Кавитал. Эти данные точно указывают на одинаковые временные соотношения.

Таким образом, связь гранит—золото кажется правдоподобной и требует более детального исследования с точки зрения изучения рудного флюида. Это вовсе не исключает участия в процессах метаморфогенного флюида, источником которого могли служить вмещающие метавулканисты. Напротив, как уже отмечалось многими авторами [Manikyamba et al., 2004; Kolb et al., 2005; Saravanan, Mishra, 2009], присутствие нескольких источников флюида (либо одновременных, либо с некоторым временным интервалом) кажется более правдоподобным и требует проведения дальнейших исследований. До тех пор, пока не будут сделаны мультиэлементные анализы флюидных включений всех типов, сложно сказать, был ли источник металла один или их было несколько.

Авторы выражают свою признательность за поддержку в проведении работ Департаменту науки и технологии правительства Индии (проект ESS/16/328/2007), благодарят Совет научных и промышленных исследований правительства Индии за финансовую поддержку, Департамент геологии и геофизики нашего института за предоставление аппаратурной базы для микротермометрии и КР-спектроскопии флюидных включений, организаторов ACROFI 3 за предложение участвовать в этом специализированном выпуске журнала. Большое спасибо Дж. Ридли и анонимному рецензенту за их конструктивные замечания и советы по улучшению статьи, С.З. Смирнову за редакционную поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

Bowers T.S., Helgeson H.C. Calculation of the thermodynamic and geological consequences of non-ideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geologic systems: equation of state for H_2O-CO_2-NaCl fluids at high pressures and temperatures // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1983, v. 47, p. 1247—1275.

Bucci L.A., Hagemann S.G., Groves D.I., Standing J.G. The Archean Chalice gold deposit: a record of complex, multistage, high temperature hydrothermal activity and gold mineralization associated with granitic rocks in the Yilgarn Craton, Western Australia // *Ore Geol. Rev.*, 2002, v. 19, p. 23—67.

Cassidy K.F., Groves D.I., McNaughton N.J. Late-Archean granitoid-hosted lode-gold deposits, Yilgarn craton, Western Australia: deposit characteristics, crustal architecture and implications for ore genesis // *Ore Geol. Rev.*, 1998, v. 13, p. 65—102.

Chadwick B., Vasudev V.N., Hegde G.V. The Dharwar craton, southern India, interpreted as the result of Late Archaean oblique convergence // *Precam. Res.*, 2002, v. 99, p. 91—111.

Diamond L.W., Tarantola A., Stunitz H. Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress II: Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress. II: Experimentally induced changes in inclusion volume and composition // *Contr. Miner. Petrol.*, 2010, v. 160, № 6, p. 845—864.

Haynes F.M. Fluid inclusion evidence of basinal brines in Archean basement, Thunder Bay Pb-Zn-Ba district, Ontario, Canada // *Canad. J. Earth Sci.*, 1988, v. 25, p. 1884—1894.

Jayananda M., Moye J.F., Martin H., Peucat J.J., Auvray B., Mahabaleswar B. Late Archaean (2550—2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry // *Precam. Res.*, 2000, v. 99, № 3—4, p. 225—254.

Kolb J., Rogers A., Meyer F.M. Relative timing of deformation and two-stage gold mineralization at the Hutti Mine, Dharwar Craton, India // *Miner. Depos.*, 2005, v. 40, p. 156—174.

Lin F., Sum A.K., Bodnar R.J. Correlation of methane Raman ν_1 band position with fluid density and interactions at the molecular level // *J. Raman Spectrosc.*, 2007, v. 38, p. 1510—1515.

Manikyamba C., Naqvi S.M., Ram Mohan M., Gnaneshwar Rao T. Gold mineralisation and alteration of Penakacherla schist belt, India, constraints on Archaean subduction and fluid processes // *Ore Geol. Rev.*, 2004, v. 24, № 3—4, p. 199—227.

Mishra B., Panigrahi M.K. Fluid evolution in the Kolar Gold Field: evidence from fluid inclusion studies // *Miner. Depos.*, 1999, v. 34, № 2, p. 173—181.

Mishra B., Pal N. Metamorphism, fluid flux and fluid evolution relative to gold mineralization in the Hutti-Maski Schist Belt, Eastern Dharwar Craton, India // *Econ. Geol.*, 2008, v. 103, № 4, p. 801—827.

Mishra B., Pal N., Sarbadhikari A.B. Fluid inclusion characteristics of the Uti gold deposit, Hutti-Maski greenstone belt, Southern India // *Ore Geol. Rev.*, 2005, v. 26, p. 1—16.

Moye J.F., Martin H., Jayananda M. Multi-element geochemical modelling of crust-mantle interactions during late-Archaean crustal growth: the Closepet granite (South India) // *Precam. Res.*, 2001, v. 112, № 1—2, p. 87—105.

Moye J.F., Nedelec A., Martin H., Jayananda M. Syntectonic granite emplacement at different structural levels: the Closepet granite, South India // *J. Struc. Geol.*, 2003, v. 25, p. 611—631.

Pal N. Genesis of gold mineralization in the Hutti-Maski greenstone belt, Eastern Dharwar Craton, India: constraints from metamorphism, ore mineralogy and fluid evolution. Ph.D. thesis, IIT Kharagpur, 2003, 254 p.

- Panigrahi M.K., Mookherjee A.** The Malanjhand copper (+molybdenum) deposit, India: mineralization from a low-temperature fluid of granitoid affiliation // *Miner. Depos.*, 1997, v. 32, p. 133—148.
- Panigrahi M.K., Gupta S.** Graphite bearing fluid inclusions and their implications to late-stage exhumation processes: case studies from two disparate terrains in India // *Acta Petrol. Sin.*, 2007, v. 23, p. 53—64.
- Parry W.T.** Estimation of X_{CO_2} , P and fluid inclusion volume from fluid inclusion temperature measurements in the system $\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ // *Econ. Geol.*, 1986, v. 81, p. 1009—1013.
- Ramakrishnan M., Vaidyanadhan R.** *Geology of India* // *Geol. Soc. India, Bangalore*, 2008, 1, p. 151—152.
- 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 inclusions: reviews in mineralogy. *Miner. Soc. America*, 1984, v. 12, 644 p.
- Roedder E., Bodnar R.J.** Geologic pressure determination from fluid inclusion studies // *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 1980, v. 8, p. 263—301.
- Rogers A.J., Kolb J., Meyer F.M., Armstrong R.A.** Tectono-magmatic evolution of the Hutti-Maski Greenstone Belt, India: constrained using geochemical and geochronological data // *J. Asian Earth Sci.*, 2007, v. 31, p. 55—70.
- Sarma D.S., McNaughton M.J., Groves D.I., Ram Mohan M., Balaram V.** Timing of gold mineralization in the Hutti gold deposit, Dharwar Craton, South India // *Econ. Geol.*, 2008, v. 103, p. 1715—1727.
- Saravanan S., Mishra B.** Uniformity in sulfur isotope composition in the orogenic gold deposits from the Dharwar craton, Southern India // *Miner. Depos.*, 2009, v. 44, p. 597—605.
- Saravanan S., Mishra B., Jayaram M.S.** P - T conditions of mineralization in the Jonnagiri granitoid hosted gold deposit, eastern Dharwar Craton, southern India: constraints from fluid inclusions and chlorite thermometry // *Ore Geol. Rev.*, 2009, v. 36, p. 333—349.
- Sinha M.** Gold Mineralization in the Western Ramagiri block, Anantapur District, Andhra Pradesh, with special reference to fluid inclusion characteristics. M.Sc. thesis, Kharagpur, Indian Institute of Technology, 1997.
- Tarantola A., Diamond L.W., Stunitz H.** Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress I: Experimentally induced changes in inclusion shapes and microstructures // *Contr. Miner. Petrol.*, 2010, v. 160, № 6, p. 825—843.
- Vasudev V.N.** Field guide to selected gold prospects in Karnataka and Andhra Pradesh. Geological Society of India, Misc. Pub., 2009, 56 p.
- Vityk M.O., Bodnar R.J.** Do fluid inclusions in high-grade metamorphic terranes preserve peak metamorphic density during retrograde decompression // *Amer. Miner.*, 1995, v. 80, p. 641—644.
- Yardley B.W.D.** Metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation // *Econ. Geol.*, 2005, v. 100, p. 613—632.

*Поступила в редакцию
17 февраля 2011 г.*