

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛЛОНОСНЫХ ФЛЮИДОВ И ВОЗРАСТ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАНИМБА (*Енисейский кряж, Россия*)

Н.А. Гибшер, М.А. Рябуха, А.А. Томиленко, А.М. Сазонов*,
М.О. Хоменко, Т.А. Бульбак, Н.А. Некрасова*

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

**Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета,
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия*

Золоторудное месторождение Панимба залегает в породах эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма и приурочено к экзоконтактной зоне Чиримбинского гранитоидного массива. Методами термобарогеохимии, газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии исследованы флюидные включения в кварце и сульфидах двух участков месторождения — Михайловском и руч. Золотого. Установлено, что золото-кварцевые жилы месторождения сформированы металллоносными Mg-Na-Cl-содержащими водно-углекисло-углеводородными флюидами соленостью 8—23 мас. % NaCl-экв. в интервале температур от 180 до 410 °С и давлений от 0.2 до 3.3 кбар. Углеводороды, азот- и серосодержащие соединения, входящие в состав флюидов, потенциально способны транспортировать золото и могут быть положительными индикаторами золотоносности кварцевых жил. Флюиды с соленостью более 30—40 мас. % NaCl-экв. и значения изотопа серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов в интервале от 0.9 до 6.7 ‰ являются результатом влияния постмагматических растворов близлежащего Чиримбинского гранитоидного массива. Возраст гидротермальной золото-сульфидной минерализации месторождения Панимба составляет 817.2 ± 5.3 — 744 ± 17 млн лет и вписывается по времени в интервал кристаллизации Чиримбинского интрузива от 868.9 ± 6.5 до 721.4 ± 1.6 млн лет, но значительно моложе времени регионального метаморфизма (996 ± 32 — 889 ± 26 млн лет).

Кварц, золото, флюидные включения, углеводороды, Ar-Ar возраст.

METAL-BEARING FLUIDS AND THE AGE OF THE PANIMBA GOLD DEPOSIT (*Yenisei Ridge, Russia*)

N.A. Gibsher, M.A. Ryabukha, A.A. Tomilenko, A.M. Sazonov,
N.O. Khomenko, T.A. Bul'bak, and N.A. Nekrasova

The Panimba gold deposit lies in the rocks of the epidote–amphibolite metamorphism facies and is confined to the exocontact zone of the Chirimba granitoid massif. Fluid inclusions in quartz and sulfides of two sites of the deposit, Mikhailovka and Zolotoi Brook, were studied by thermobarogeochemistry, gas chromatography, and chromatography–mass spectrometry. We have established that gold–quartz veins of the deposit were formed by metal-bearing Mg–Na–Cl-containing water–carbon dioxide–hydrocarbon fluids with salinity of 8–23 wt.% NaCl eq. at temperatures of 180 to 410 °C and pressures of 0.2 to 3.3 kbar. Hydrocarbons and nitrogen- and sulfur-containing compounds of the fluids can transport gold and might be positive indicators of the gold presence in quartz veins. Fluids with salinity of >30–40 wt.% and sulfur isotope values ($\delta^{34}\text{S}$) of 0.9 to 6.7‰ of sulfides are the result of the action of postmagmatic solutions of the nearby Chirimba granitoid massif. The age of hydrothermal gold–sulfide mineralization of the Panimba deposit is within 817.2 ± 5.3 – 744 ± 17 Ma and falls in the time interval of crystallization of the Chirimba intrusion, 868.9 ± 6.5 to 721.4 ± 1.6 Ma, but it is considerably younger than the age of the regional metamorphism (996 ± 32 – 889 ± 26 Ma).

Quartz, gold, fluid inclusions, hydrocarbons, Ar–Ar age

ВВЕДЕНИЕ

В геологической литературе накоплен значительный материал, посвященный целому ряду вопросов образования золоторудных месторождений Енисейского кряжа, в том числе и роли метаморфизма в мобилизации, миграции и концентрации рудного вещества [Сазонов, 1998; Корнев и др., 2004; Сердюк и др., 2010; Сазонов и др., 2016].

Вместе с тем крайне ограничена информация о флюидах, ответственных за формирование золоторудных месторождений, залегающих в поле пород, метаморфизованных в условиях гранулитовой, амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций метаморфизма. В данной работе про-

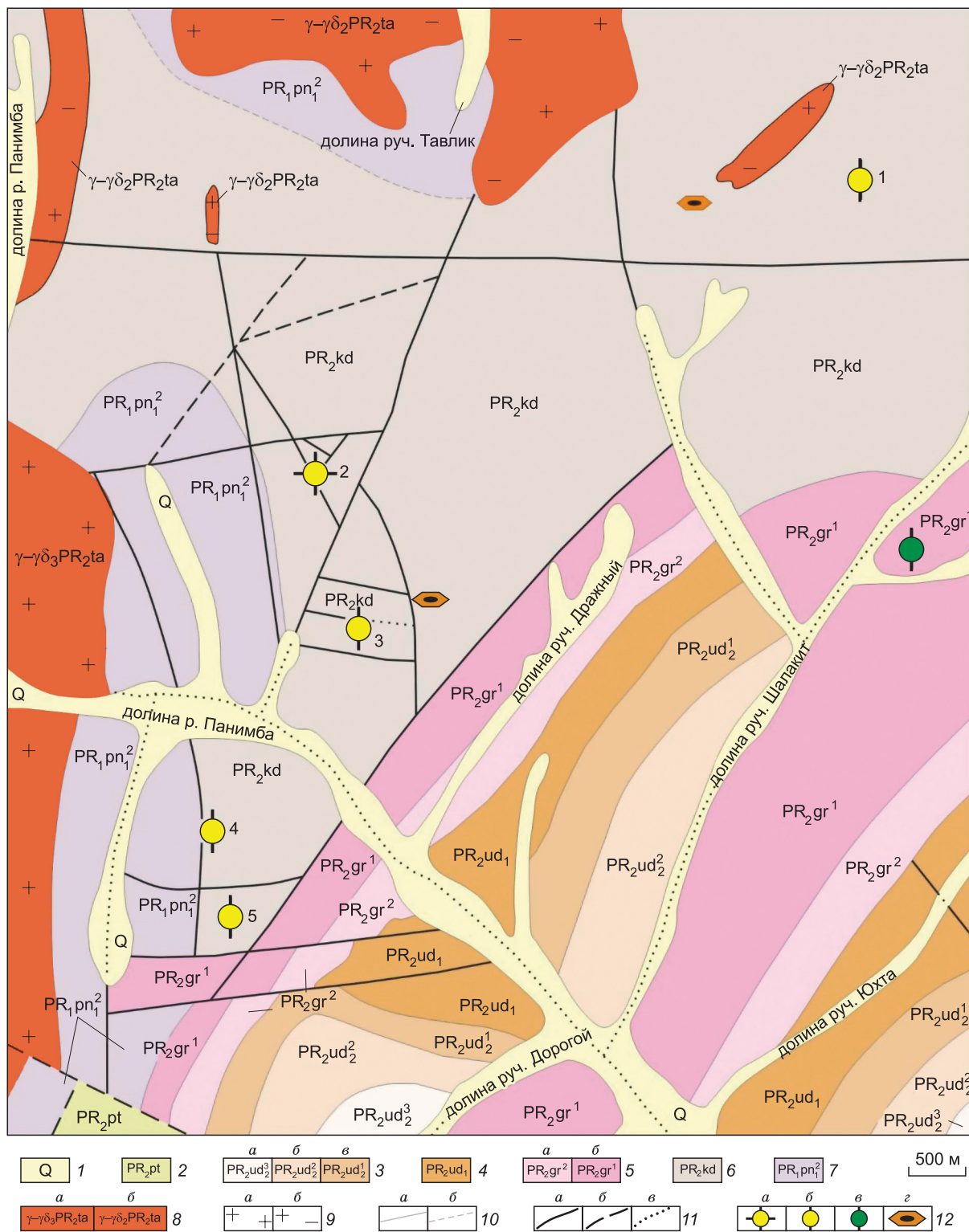


Рис. 1. Схема геологического строения Панимбинского рудного узла [Сазонов и др., 2016] (по материалам М.В. Крысина, 1988 г. с изменениями А.А. Плеханова и А. Б. Бородушкина, 2005 г.).

Четвертичная система (Q): 1 — современные отложения: аллювиальные суглинки, супеси, пески, галечники; верхний протерозой (2—6): 2 — тунгусская серия, потосукская свита нерасчлененная (PR₂pt): сланцы кварц-серицитовые, иногда хлоритоидные; сухопитская серия (3—6), удерейская свита (3, 4): 3 — среднеудерейская подсвита: а — пачка 3 (PR₂ud₃¹): сланцы кварц-серицит-хлоритовые, часто известковистые, спорадически в породе пирит и магнетит; б — пачка 2 (PR₂ud₂²): сланцы кварц-серицитовые, кварц-серицит-хлоритовые; в — пачка 1 (PR₂ud₁¹): сланцы серицит-кварцевые ритмично-слоистые; 4 — нижнеудерейская подсвита (PR₂ud₁): сланцы кварц-серицитовые, кварц-биотитовые неслоистые; 5 — горбилкокская свита: а — пачка 2 (PR₂gr²); сланцы се-

должно исследование металлоносных флюидов с единых методических позиций, начатых ранее на Советском, Герфедском и Богунайском золоторудных месторождениях Енисейского кряжа [Томиленко, Гибшер, 2001; Tomilenko et al., 2010; Гибшер и др., 2011; Рябуха и др., 2015].

Комплекс проведенных термобарогеохимических исследований флюидных включений в кварце и сульфидах позволил оценить температуру, давление, соленость и состав металлоносных флюидов, сформировавших золоторудное месторождение Панимба, залегающее в породах эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма. На основании результатов изотопного исследования серы сульфидов и состава водно-углекисло-углеводородного флюида рассмотрен вопрос о возможных источниках металлоносных гидротермальных растворов. Полученный Ar-Ar возраст гидротермальных серицитов золотоносных кварцевых жил помогает выяснять возрастные соотношения метаморфизма, магматизма и оруденения на месторождении Панимба.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Месторождение Панимба расположено в центре Восточного золотоносного пояса Енисейского кряжа в бассейне рек Панимба и Чиримба в 95 км на юго-восток от пос. Северо-Енисейский. Месторождение состоит из нескольких рудопроявлений золота (Тавлик, Михайловское, руч. Золотой, Правобережное и Панимбинское с суммарными запасами 76 т (рис. 1).

Месторождение с трех сторон ограничено разрывными нарушениями и приурочено к экзоконтактовой зоне биотитовых гранитоидов Чиримбинского массива татарско-аяхтинского комплекса. Многолетние исследования этого массива свидетельствуют о неоднородности его строения и состава [Даденко, 1984; Злобин, Пономарева, 1984]. Возраст многофазного Чиримбинского массива, обнажающегося на западном фланге Панимбинского рудного поля, составляет интервал от 868.9 ± 6.5 до 721.4 ± 1.6 млн лет [Верниковская и др., 2002; Сазонов и др., 2016]. Площадь месторождения сложена метаморфическими породами эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма кординской свиты нижнего рифея, граничащими с отложениями пенченгинской свиты нижнего протерозоя по тектоническому нарушению рудопроявления Михайловское. Метаморфогенно-осадочные образования кординской свиты представлены углеродистыми, кварц-серицит-хлоритовыми, тонкополосчатыми двуслюдяными, кордирит-андалузитовыми и гранат-андалузитовыми сланцами.

Промышленная золоторудная минерализация представлена зонами сульфидно-вкрапленного, прожилкового и кварцево-жильного типа малосульфидно-золото-кварцевой формации в 1.5—2.0 км от выхода гранитов на юге Чиримбинского интрузива. Протяженность сульфидно-вкрапленных с кварцевыми жилами золотоносных зон по простиранию колеблется от 140 до 540 м, при мощности от 6 до 20 м. Главный жильный минерал рудных тел месторождения Панимба — кварц — представлен прозрачными, светло-серыми и молочно-белыми разновидностями. Наиболее широко распространены пирротин, пирит, арсенопирит. В качестве постоянных минералов-спутников присутствуют халькопирит и леллингит. В подчиненном количестве в рудах выявлена полиметаллическая и сопровождающая золотое оруденение висмут-теллуридная минерализация.

По данным пробирного анализа, содержание золота в рудах месторождения колеблется от 0.1 до 100 г/т, составляя в среднем 2—4 г/т. Преобладающая часть продуктивного золота в виде вкрапленности присутствует в жильном кварце, слюдах, сульфидах (арсенопирите, пирротине и пирите), а также в приконтактных зонах кварцевых прожилков и вмещающих сланцах. Пробность золота меняется от 625 до 937 ‰ [Петровская, 1973].

Вмещающие породы и руды месторождения Панимба характеризуются различной степенью метасоматических преобразований, которые проявлены в полистадийном развитии пирротин-хлоритовых

рицит-хлорит-кварцевые; *b* — пачка 1 (PR₂gr¹): сланцы кварц-серицит-хлоритовые; *b* — кординская свита (PR₂kd); углеродистые кварц-серицит-хлоритовые, кварц-мусковит-биотитовые, кварц-мусковит-андалузитовые сланцы, плагиоклаз-эпидот-амфиболитовые, плагиоклаз-цоизит-амфиболитовые сланцы, линзы мраморов; 7 — нижний протерозой, тейская серия, пенченгинская свита, нижняя подсвита, пачка 2 (PR₂pn²): метаалевролиты, известковистые кварциты, мраморизованные кварциты, известняки; 8 — интрузивные породы — татарско-аяхтинский комплекс: *a* — третья фаза (γ - γ ₃PR₂ta), хаиктинский тип, среднекрупнозернистые, часто порфириовидные: плагиограниты, кварцевые сиениты, кварцевые диориты, диориты; *b* — вторая фаза (γ - γ ₂PR₂ta). Фация гнейсовидных гранитоидов: субфация мелко-, среднезернистых гранитов, гранодиоритов, плагиогранитов, биотитовых двуслюдяных, редко роговообманковых; 9 — текстуры-структуры магматических пород: *a* — граниты, плагиограниты, гранодиориты биотитовые, редко роговообманково-биотитовые, редко роговообманково-пироксеновые; *b* — граниты, плагиограниты, гранодиориты мелко-, среднезернистые биотитовые, биотитсодержащие, двуслюдяные, гнейсовидные; 10 — геологические границы: *a* — достоверные, *b* — предполагаемые; 11 — тектонические нарушения: *a* — установленные, *b* — предполагаемые, *v* — скрытые под аллювиальными отложениями; 12 — рудопроявления: *a* — золото-сульфидное, *b* — золото-кварцевые, *v* — мышьяка; *z* — андалузитовые сланцы. Цифрами обозначены рудопроявления золота: 1 — Тавлик; 2 — Михайловское; 3 — руч. Золотой; 4 — Правобережное; 5 — Панимбинское.

тектонических blastsмилонитов. Синрудные сдвиговые нарушения способствуют интенсивной графитизации, мусковитизации, турмалинизации пород в зоне смятия. Пострудная метасоматическая переработка выражена в окварцевании, мусковитизации, хлоритизации и карбонатизации рудовмещающих пород. Благоприятным признаком повышенной золотонности метасоматитов является высокая степень насыщенности их сульфидами (достигающая 10 %).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Флюидные включения в кварцево-жильных телах месторождения Панимба изучались в образцах, собранных из скважин 63, 66, 194 — участка Михайловский и 145, 191 — участка руч. Золотой, в интервале глубин от 110 до 692 м (коллекция д.г.-м.н. А.М. Сазонова). На золоторудных месторождениях Енисейского края выделяется не менее четырех генераций кварца [Ли, Даценко, 1970; Сазонов, 1998; Сердюк и др., 2010]. При выделении генераций обычно учитываются геологические условия проявления, ряд типоморфных свойств, таких как цвет, зернистость, грануляция, ассоциация с другими минералами и т. д. На месторождении Панимба в изученных образцах не удалось разделить кварц на генерации, поскольку просмотр петрографических шлифов показал, что исследованные образцы сложены серыми, белыми и прозрачными разновидностями кварца в различных соотношениях. Между серым и белым кварцем нет четких границ, постепенно серый кварц сменяется белым и наоборот. Четко можно выделить лишь последнюю генерацию кварца, которая слагает кварц-карбонатные маломощные прожилки, секущие как серый, так и белый кварц. Крупные зерна прозрачного кварца часто обрамляются мелкозернистым гранулированным кварцем. Гранулированный кварц прозрачный и не содержит ни минеральных, ни флюидных включений.

Для серого и белого кварца золоторудного месторождения Панимба характерны следующие типы флюидных включений, различающиеся по фазовым соотношениям при комнатной температуре (рис. 2): 1) газово-жидкие включения ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$) с соотношением объемов жидкости и газа, меняющимся в интервале от 70:30 до 20:80 соответственно (см. рис. 2, а); 2) водно-солевые флюидные включения ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma + \text{КР}$) (см. рис. 2, б), в них присутствует дочерний кристаллик соли кубического габитуса; 3) водно-углекислотный тип флюидных включений ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2}$), ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma_{\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2}$) (см. рис. 2, в, з), во включениях соотношение углекислотной (газовой или плотной жидкой) и водной фаз варьирует от 90:10 до 20:80 соответственно; 4) однофазные метан-углекислотные, азот-метан-углекислотные, углекислотные, метановые включения ($\Gamma_{\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2}$) (см. рис. 2, д) и ($\text{Ж}_{\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2}$).

Изучены 35 полированных с двух сторон кварцевых пластинок, и ни в одной из них не обнаружено зерен кварца с зонами роста, что позволило бы нам однозначно отнести захваченные кварцем флюидные включения к первичным и первично-вторичным генерациям. Вместе с тем достаточно отчетливо выделяются вторичные генерации включений, которые образуют цепочки в залеченных трещинах, се-

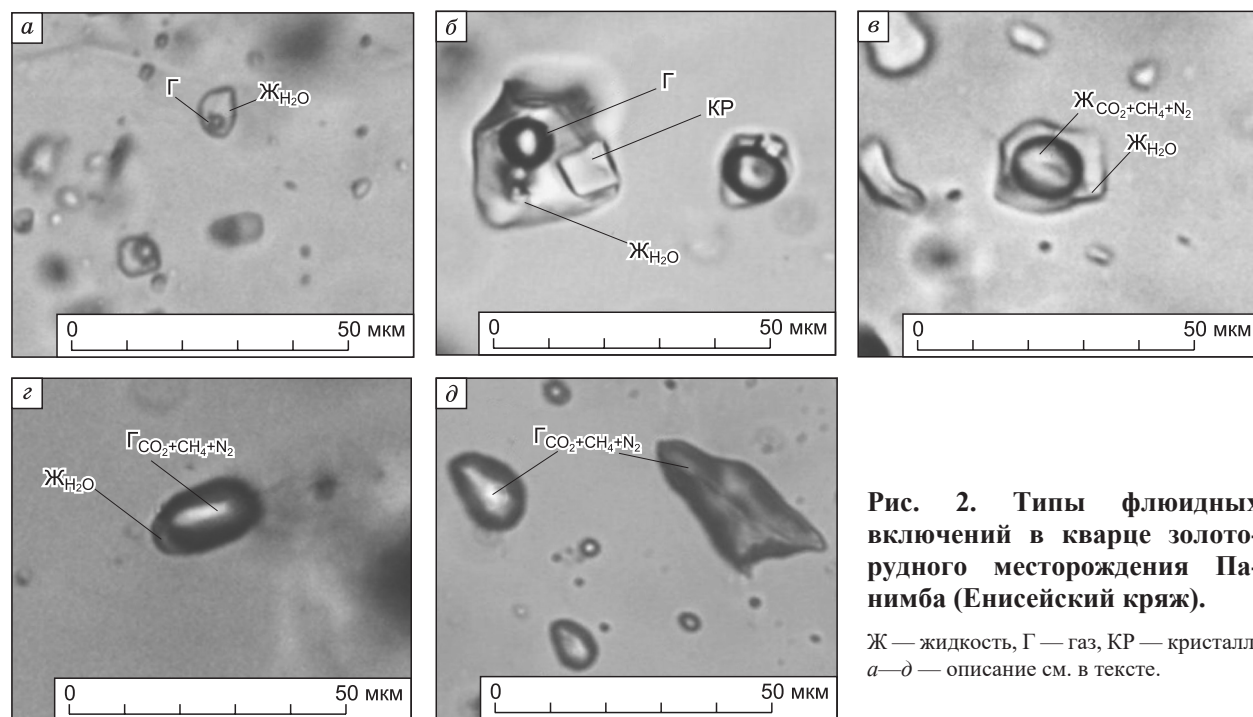


Рис. 2. Типы флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край).

Ж — жидкость, Γ — газ, КР — кристалл.
а—д — описание см. в тексте.

кущих границы кварцевых зерен. В одних трещинах сконцентрированы только газовой-жидкие включения, где водная фаза преобладает ($J_{H_2O} > \Gamma$) (табл. 1, генерация В-а), размер этих включений редко превышает 5—10 мкм. Другие трещины заполнены водно-солевыми флюидными включениями ($J_{H_2O} + \Gamma + Kp$), размер которых колеблется от 3 до 10 мкм (см. табл. 1, В-б). В третьих трещинах захвачены однофазные углекислотно-метан-азотные включения ($\Gamma_{CO_2 \pm CH_4 \pm N_2}$; $J_{CO_2 \pm CH_4 \pm N_2}$) (см. табл. 1, В-в). Эти включения при просмотре под микроскопом обычно темного цвета и гораздо крупнее по размерам, достигая 20—25 мкм. К первичным и первично-вторичным генерациям мы отнесли флюидные включения, находящиеся внутри кварцевых зерен, образуя группы, не связанные с залеченными трещинами. Обычно эти группы состоят из 3—10 включений ($J_{H_2O} + \Gamma$, $J_{H_2O} + J_{CO_2 \pm CH_4 \pm N_2}$, $J_{H_2O} + \Gamma_{CO_2 \pm CH_4 \pm N_2}$) (см. табл. 1, П, ПВ).

Флюидные включения в кварце изучали методами термометрии, криометрии, раман-спектроскопии (КР-спектроскопии), газовой хроматографии и газовой хромато-масс-спектрометрии. Состав летучих компонентов в сульфидах исследовали методом газовой хромато-масс-спектрометрии и определяли изотопный состав серы $\delta^{34}S$. По серициту золотоносных кварцевых жил определяли Ag-Ag возраст формирования золотого оруденения месторождения.

Температуру формирования минералов исследовали методом гомогенизации флюидных включений. Опыты по нагреванию и замораживанию флюидных включений осуществляли в термокриокамере фирмы Linkam THMSG-600, которая позволяет в автоматическом режиме производить измерения температур фазовых переходов в интервале от -196 до $+600$ °С со скоростью от 0.1 до 90 °С/мин. Для охлаждения образцов в криокамере использовался жидкий азот. Точность измерения составляла ± 0.2 — 0.5 °С.

Соленость водной фазы включений определяли по температуре плавления последнего кристаллика льда и выражали в мас. % через эквивалент NaCl на основании диаграммы системы H_2O —NaCl [Киргинцев и др., 1972]. Состав водных растворов включений определяли по температурам эвтектик различных солевых систем [Борисенко, 1977].

Состав индивидуальных флюидных включений исследовали методом раман-спектроскопии на КР-спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором с помощью твердотельного лазера с длиной волны 514 нм, мощностью 100 мВт по методике, изложенной в работах [Dubessy et al., 1989; Burke, 2001]. Диаметр сфокусированного лазерного луча составлял 1.5 мкм.

Валовой анализ газовой составляющей флюидов осуществлен методом газовой хроматографии, позволяющей одновременно определять широкий спектр газов: CO_2 , H_2O , CO , H_2 , N_2 , H_2S , SO_2 , углеводороды от C_1 (CH_4) до C_5 из одной навески образца [Осоргин, 1990]. В качестве материала использовался кварц с размером фракции 0.25 мм, навеской 300 мг.

Давление флюида определялось по сингенетичным включениям 1 и 3 типа. Если включение содержало не менее 99 мол. % углекислоты, то, используя плотность углекислотного флюида (3 тип) и температуру общей гомогенизации газовой-жидких включений (1 тип), величина давления оценивалась в системе H_2O — CO_2 с помощью программы Flincor [Brown, 1989; Brown, Hagemann, 1995; Bakker, 2001]. В том случае, когда в составе включения вместе с углекислотой присутствуют метан и азот, давление и плотность рудообразующего флюида оценивают для системы H_2O — CO_2 — CH_4 — N_2 по программе Isochor [Thiéry et al., 1994].

Методом газовой хромато-масс-спектрометрии определен состав летучих компонентов в сульфидах и кварце месторождения. Анализ газовой смеси выполнялся на хромато-масс-спектрометре Thermo Scientific (USA) DSQ II MS/Focus GC в ИГМ СО РАН. Для интерпретации полученных данных с идентификацией пиков и выделением отдельных компонентов использовалось программное обеспечение AMDIS версии 2.66 по библиотекам масс-спектров NIST'08. Описание методики проведения анализа изложено в работах [Sokol et al., 2014; Жимулев и др., 2015; Tomilenko et al., 2015].

Изотопный состав серы сульфидов $\delta^{34}S$ определялся из SO_2 , образованного при реакции сульфидов с окислителем CuO при температуре 900—1000 °С. Значения $\delta^{34}S$ представляют собой отклонение величины отношений $^{34}S/^{32}S$ в промилле в образце от величины этого отношения в троилитовой фазе метеорита Каньон-Дьябло ($^{34}S/^{32}S = 0.0450045$) [Омото, Рай, 1982].

Возраст формирования золотого оруденения месторождения Панимба определялся по серициту (Ag-Ag метод), сингенетичному с кварцем и сульфидами. Методика определения возраста приведена в работе [Травин, 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Температура гомогенизации флюидных включений, состав и соленость флюидов в кварцевых жилах месторождения

Результаты термометрических и криометрических исследований флюидных включений в кварце месторождения Панимба представлены в сводной таблице (см. табл. 1). Температуры гомогенизации

Таблица 1.

**Результаты микрометрических исследований индивидуальных флюидных включений
в кварце золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край)**

№ образца	Генерация включений	$T_{обл.гом.}, ^\circ\text{C}$	Вид гомогенезации	$T_{раст.крист.}, ^\circ\text{C}$	$T_{жид.}, ^\circ\text{C}$	$T_{пл.льды}, ^\circ\text{C}$	Соленость, мас. % NaCl-экв.	$T_{пл. CO_2 \pm CH_4 \pm N_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{наст.гом. CO_2 \pm CH_4 \pm N_2}, ^\circ\text{C}$	Вид гомогенезации	Давление, кбар
Пн-145-218.5	П	180-350	Ж	-	-40.0...-38.0	-22.0...-10.0	23.3...15	-58...-66	-25...-17	Ж	2.0-3.3
	В-а	100-190	»	-	-27.0...-25.0	-3.0...-1.5	6.0...3.0	-	-	-	-
	В-б	180-190	»	150-180	-45.0...-46.5	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-83...-85	-81...-83.1	Ж	-
Пн-145-470	П	255-360	Ж	-	-27.2...-28.0	-14.3...-9.5	18.0...14.0	-60	-17	»	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-105	-88	Г	-
Пн-145-419.0	П	290-350	Ж, Кр	-	-37.0...-40.0	-8.0...-10.0	12.5-15.0	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-96...-97.4	-	-	-
	П	210-340	Ж	-	-35.0...-39.0	-9.0...-10.5	13.5-15.5	-57.5...-59.0	-10.0...-15.0	»	2.1-3.1
	В-а	150-180	»	-	-18.0...-21.5	-1.0...-2.5	2...4.5	-	-	-	-
Пн-145-521.0	В-б	220-240	»	170-200	-45.0...-48.0	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-96...-84.5	-83...-75	Ж, Г, Кр	-
	ПВ	250-390	Ж, Г	-	-29.0...-35.5	-6.0...-12.0	10...16.5	-56.6...-57.4	-3.3...-12.5	Г	0.2-0.3
	В-а	100-190	Ж	-	-21.0...-27.0	-0.5...-2.5	1...5	-	-	-	-
Пн-191-194	П, ПВ	265-410	Ж, Кр	-	-25.5...-32.0	-7.0...-14.5	11...18.5	-57.0...-59.5	+8.2...+14.6	Ж	-
	В-а	165-190	Ж	-	-33.5...-35.0	-0.5...-1.5	1...3	-	-	-	-
	П, ПВ	230-390	Ж, Г	-	-29.5...-33.0	-10.0...-12.5	15-16.5	-57.5...-62.0	-4.3...-18.3	Ж	1.6-2.4
	В-а	150-220	Ж	-	-20.5...-25.0	-3.0...-4.0	6-8	-	-	-	-
Пн-191-337.8	В-б	160-250	Ж	170-220	-49.0...-51.5	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-75.0...-83.5	-73.5...-80.5	Ж	-
	П, ПВ	290-400	Ж, Г, Кр	-	-27.5...-33.5	-8.0...-14.0	12.5-18.0	-58.5...-61.0	+16.5...+17.5	»	1.5-1.9
	В-а	130-210	Ж	-	-19.0...-23.5	-2.0...-4.0	4.5-8.0	-	-	-	-
Пн-191-358	В-б	170-240	»	160-180	-49.0...-53.0	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-95.0...-100.5	-79.5...-82.1	Г, Ж	-
	П, ПВ	210-410	Ж, Г, Кр	-	-28.0...-31.0	-9.0...-15.0	13.5-19.0	-57.6...-65.0	+0.3...-11	Ж	1.2-2.3
Пн-191-566.5	В-а	130-190	Ж	-	-25.5...-26.0	-1.5...-3.0	3...6	-	-	-	-
	В-б	180-260	»	210-250	-47.5...-50.0	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-67.0...-73.0	-62.0...-69.0	Ж	-
	П, ПВ	220-410	Ж	-	-26.5...-35.0	-4.0...-11.0	8-16	-57.0...-68.7	+13.1...-23.0	Ж, Г, Кр	1.2-2.2
Пн-191-615	В-а	160-200	»	-	-21.5...-22.0	-2.0...-3.0	4.5...6	-	-	-	-
	В-б	180-240	»	200-220	-49.5...-50.5	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-75.5...-119.7	-5.7...-117.5	Г, Ж	-

Пн-191-597	П, ПВ	230-400	Ж, Г	-	-29.0...-34.5	-9.0...-15.0	13.5...19.0	-57.5...-60.0	+3.5...-13.0	Ж	-
	В-6	170-230	Ж	180-210	-48.5...-51.0	-	>30	-	-	-	-
	В-в	-	-	-	-	-	-	-73.4...-60	-70.5...-75.3	-	-
Пн-194-110.5/6	П, ПВ	240-360	Ж	-	-21.5...-37.5	-6.8...-10.0	11-15	-56.6...-58.5	-9.0...+11.5	Ж	0.5-1.7
	В-а	170-200	»	-	-26.0...-29.0	-0.6...-3.5	1-7.0	-	-	-	-
Пн-63-43	П, ПВ	265-390	Ж, Г	-	-29.5...-34.5	-6.9...-14.5	11...18.5	-56.9...-59.0	-8.3...+24.3	Ж	1.0-1.5
	В-а	110-180	Ж	-	-22.0...-27.5	-0.5...-2.4	1-5	-	-	-	-
	В-6	170-230	»	190-200	-48.5...-52.0	-	>30	-	-	-	-

Примечание. Здесь и далее: № образца: первая цифра — № скважины, вторая — глубина (м), третья (см. табл. 3) — № кусочка. Генерация флюидных включений: П-первичные и ПВ-первично-вторичные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г}$, $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2}$; $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г} + \text{CO}_2$), В-а — вторичные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г}$), В-б — вторичные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г} + \text{кристалл}$); В-в — вторичные ($\text{Ж}_{\text{CO}_2} \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$), Г — в жидкую фазу, Г — в газовую фазу, Кр — критическая (исчезновение границы газ—жидкость). Прочерк — не определено.

первичных и первично-вторичных включений колеблются в интервале от 180 до 410 °С. Гомогенизация происходила в жидкую и газообразную фазы и в редких случаях с критическими явлениями (с исчезновением границы газ—жидкость). При этом максимальное количество температур гомогенизации выявлено в двух интервалах: первый — от 100 до 185 °С (вторичные включения в кварце, в межзерновых границах и по залеченным трещинам), второй — от 250 до 320 °С (первичные и первично-вторичные включения, образующие группы, а также приуроченные к микротрещинам и дефектам внутри кварцевых зерен). В области температур 250—390 °С наблюдается перекрытие значений температур гомогенизаций в жидкую и газовую фазы. Во включениях, содержащих CO_2 в виде жидкой фазы, перед полной гомогенизацией происходила разгерметизация, что связано, по-видимому, с нарастанием внутреннего давления.

В золотоносном кварце температура эвтектики водной фазы первичных и первично-вторичных включений менялась в диапазоне от -21.5 до -40.0 °С, что указывает на присутствие хлоридов Na и Mg. Температура плавления льда составила интервал от -4.0 до -22.0 °С, соответствуя солености от 8.0 до 23.3 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1, П, ПВ). В отдельных водно-углекислотных включениях ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$) образуются кристаллы газогидрата $\text{CH}_4 \cdot 3/4\text{H}_2\text{O}$ с температурами плавления в интервале от +13.5 до +21.3 °С. Во вторичных газовой-жидких включениях ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г}$) (см. табл. 1, В-а) температура эвтектики водной фазы составляет интервал от -18.0 до -29.0 °С, указывая на присутствие хлоридов Na и Mg. Температуры плавления льда колеблются от -0.5 до -2.4 °С, что соответствует солености 1-8 мас. % NaCl-экв.

В водно-солевом типе включений ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г} + \text{Кр}$) (см. табл. 1, В-в) присутствует дочерний кристалл кубического габитуса (галит). Во время медленного нагревания таких включений пузырек и кристаллик почти пропорционально друг другу уменьшались в размерах. Во многих включениях растворение соли происходило раньше исчезновения пузырька газа, опережая его на 10-15 °С, а в отдельных случаях и через 10-15 °С после гомогенизации газа. При нагревании данного типа включений кристаллик галита растворялся в интервале температур от 150 до 250 °С. В этом же температурном интервале исчезал и газовый пузырек. Соленость водного раствора в них превышала 30-40 мас. % NaCl-экв. Температура эвтектики водной фазы этого типа вторичных включений составляет интервал от -45.0 до -53.0 °С, указывая на присутствие хлорида кальция. Наличие дочернего кристаллика NaCl в этих же включениях свидетельствует, что водная фаза представлена смесью хлоридов Na и Ca.

Состав газовой фазы флюидных включений в кварце и сульфиде

В газовой составляющей флюидных включений в кварце методом газовой хроматографии определены H_2O , CO_2 , CH_4 и N_2 (табл. 2), при этом углекислота и вода преобладают в составе флюидов. Содержание CO_2 (г/т) колеблется от 8 до 322, H_2O от 340 до 1100, CH_4 от 0.6 до 10, N_2 — 0.0-20. Значения водно-углекислотного коэффициента ($\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$) меняется от 0.01 до 0.45, а CO_2/CH_4 от 1.1 до 161 (см. табл. 2).

Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений представлен в табл. 3, выявлено присутствие трех основных компонентов: CO_2 , CH_4 и N_2 (рис. 3). В отдельных включениях

Таблица 2. Состав газовой составляющей флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край) по данным газовой хроматографии

№ образца	Содержание, мг/кг				Суммарное содержание газов, мг/кг	CO ₂ /(CO ₂ +H ₂ O)	CO ₂ /CH ₄
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄			
Участок руч. Золотой							
Пн-145-218.5	11	943	0.0	0.6	955	0.01	18.3
Пн-145-419.0	22	620	0.0	4.0	646	0.03	5.5
Пн-145-470.0	8	410	0.0	0.7	419	0.02	11.4
Пн-145-521-1	11	340	0.0	10.0	361	0.03	1.1
Пн-145-521-2	39	450	0.0	10.0	499	0.08	3.9
Пн-145-681.0	102	1100	8.0	10.0	1220	0.08	10.2
Пн-145-692.5	84	680	5.0	1.0	770	0.11	84
Пн-191-194.0	40	410	0.0	2.0	452	0.09	20.0
Пн-191-307.0	70	360	2.0	4.0	436	0.16	17.5
Пн-191-337.8-1	43	580	3.0	2.0	628	0.07	21.5
Пн-191-337.8-2	48	740	6.0	3.0	797	0.06	16
Пн-191-358.0	220	480	10.0	20.0	730	0.31	0.46
Пн-191-363.0	162	680	20.0	7.0	869	0.19	23.2
Пн-191-375.0	62	490	6.0	2.0	560	0.11	31
Пн-191-520.1	50	660	0.0	4.0	714	0.07	0.08
Пн-191-566.5	82	470	5.0	10.0	567	0.15	8.2
Пн-191-597.0	122	480	9.0	4.0	615	0.20	30.5
Пн-191-615.9	160	370	20.0	10.0	560	0.30	0.43
Участок Михайловский							
Пн-194-110.6	322	400	6.0	2.0	730	0.45	161
Пн-66-153.0	63	960	4.0	0.7	1028	0.05	90
Пн-63-43.0	73	790	5.0	3.0	871	0.08	24.3

Примечание. Температура газовой выделения 600 °С. навеска 300 мг. Аналитик Л.Н. Фомина, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск.

обнаружены сероводород (H₂S) и бензол (?) (C₆H₆). В индивидуальных включениях содержание (мол. %) CO₂ колеблется от 0.0 до 100, CH₄ — от 0.0 до 100, а N₂ от 0.0 до 73.2. Соотношение CO₂/CH₄ меняется в широком интервале от 0.1 до 142, так же как и по данным газовой хроматографии (см. табл. 2). Треть проанализированных включений содержат только углекислоту или метан (см. табл. 3, рис. 3).

Методом газовой хромато-масс-спектрометрии во флюидных включениях кварца и сульфидов месторождения Панимба определены вода, углекислота, азот, широкий спектр углеводородных соединений и их производных: алифатических (алканы, алкены), циклических (арены), кислородсодержащих (спирты, эфиры, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, фураны), а также азот- и серосодержащие соединения (табл. 4, рис. 4). Общее количество обнаруженных соединений в кварце колеблется от 63 до 78 наименований (10 анализов) и от 44 до 96 в сульфидах (7 анализов). Вода и углекислота являются основными составляющими флюидов (см. табл. 4), так же как и по данным газовой хроматографии (см. табл. 2). Среднее содержа-

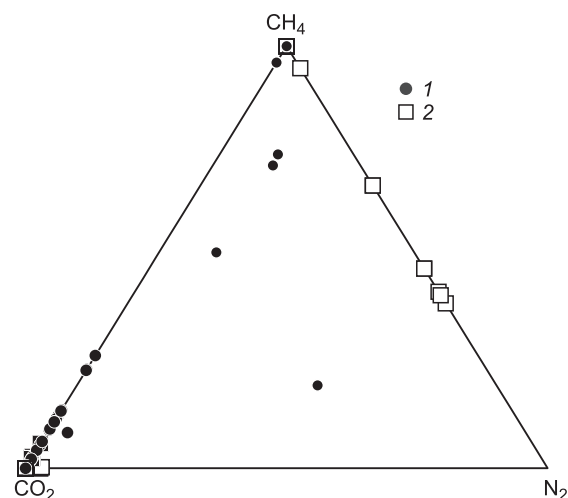


Рис. 3. Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений в кварце кварцевых жил месторождения Панимба (Енисейский край), по данным раман-спектроскопии.

1, 2 — кварцевые жилы: 1 — золотоносные, 2 — незолотоносные.

Таблица 3. Результаты раман-спектроскопических и криометрических анализов индивидуальных флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край)

№ образца	№ включения	$T_{пл. CO_2}, ^\circ C$	$T_{част. гом.}, ^\circ C$	Вид гомогенезации	Содержание, мол. %			CO_2/CH_4
					CO_2	CH_4	N_2	
Пн-145-681.0(1)	1	-56.9	13.1	Ж	98.2	0.0	1.8	—
	2	-56.7	11	»	100.0	0.0	0.0	—
	3	—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
	4	-56.8	13.0	Ж	98.0	0.1	1.9	—
	5	-95.0	—	—	0.0	33.9	66.1	—
	6	—	—	—	48.4	10.1	41.5	4.8
	7	—	—	—	99.0	1.0	0.0	99.0
Пн-145-681.0(6)	1	—	-83.9	Кр	0.0	91.2	8.8	—
	2	—	-83.9	»	0.0	100.0	0.0	—
	4	—	-83.7	»	0.0	100.0	0.0	—
	5	—	-83.7	»	0.0	100.0	0.0	—
	6	—	-113.9	Ж	0.0	26.8	73.2	—
	7	—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
	8	—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
	9	—	-112.0	Кр	0.0	29.1	70.9	—
	10	—	-112.5	»	0.0	28.4	71.6	—
	Пн-145-692.5(3)	1	-56.7	-6.4	Ж	100.0	0.0	0.0
2		-56.9	-7.6	»	100.0	0.0	0.0	—
3		—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
4		—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
5		-56.6	-3.4	Ж	100.0	0.0	0.0	—
6		-57.4	-12.5	»	97.8	2.2	0.0	44.4
Пн-191-337.8(2)	1	-75.3	—	—	33.4	52.0	14.6	0.6
	2	-75.3	—	—	29.8	55.6	14.6	0.5
Пн-191-337.8(3)	1	-58.6	-9.0	Ж	100.0	0.0	0.0	—
Пн-191-337.8(5)	1	-56.6	-5.0	»	99.7	0.3	0.0	—
	2	-59.7	-8.5	»	59.7	29.3	11.0	2.0
	3	-58.4	2.0	»	97.9	2.1	0.0	46.6
	4	-57.8	6.0	»	99.3	0.7	0.0	142.0
Пн-191-337.8(5)	1	-57.8	2.0	»	99.0	1.0	0.0	99.0
	2	-57.8	-3.4	»	98.4	1.6	0.0	61.5
	3	-57.3	-15.3	»	99.2	0.8	0.0	124.0
	4	-56.7	-19	»	99.8	0.2	0.0	—
	5	—	—	»	100.0	0.0	0.0	—
Пн-191-375.0(a)	1	—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
	2	—	—	—	0.0	100.0	0.0	—
	3	—	—	—	81.6	0.0	18.4	—
	4	—	—	—	100.0	0.0	0.0	—
Пн-191-566.5(1)	1	-65	—	—	94.5	5.5	0.0	17.2
	2	-67.4	-12.2	Ж	90.0	10.0	0.0	9.0
Пн-191-566.5(2)	1	-59.6	-18.0	»	94.1	3.3	2.6	28.5
	2	-59.3	9.4	»	95.1	4.9	0.0	19.4
	3	-59.3	9.4	»	94.7	5.3	0.0	17.9
	4	-59.1	11	»	95.4	4.6	0.0	20.7
	5	-59.1	11	»	95.7	4.3	0.0	22.3
	6	-59.1	11	»	90.1	9.9	0.0	9.1

№ образца	№ включения	$T_{пл. CO_2}, ^\circ C$	$T_{част. гом.}, ^\circ C$	Вид гомогенезации	Содержание, мол. %			CO_2/CH_4
					CO_2	CH_4	N_2	
Пн-191-566.5(3)	1	—	—	—	96.5	3.5	0.0	27.4
	2	—	—	—	94.6	5.4	0.0	17.5
	3	—	—	—	96.4	3.6	0.0	26.8
	4	—	—	—	95.7	4.3	0.0	22.2
Пн-191-566.5(4)	1	-59.1	-3.9	Ж	97.5	2.5	0.0	39.0
	2	-59.5	-7.7	»	0.0	53.7	46.3	—
	3	-59.3	-3.9	»	88.3	11.7	0.0	7.5
	4	—	—	»	10	90.0	0.0	0.1
	5	—	—	»	0.0	100.0	0.0	—
Пн-194-110.6(1)	1	-56.6	11.5	»	100.0	0.0	0.0	—
	2	-58	-9	»	99.1	0.9	0.0	110.0
Пн-194-110.6(1a)	1	-56.6	—	—	100.0	0.0	0.0	—
	2	-56.6	—	—	100.0	0.0	0.0	—
	3	-56.6	—	—	100.0	0.0	0.0	—
	4	-56.6	—	—	100.0	0.0	0.0	—

Примечание. Обр. Пн-194-110.6 – участок Михайловский, остальные – руч. Золотой.

Таблица 4. Представительный состав летучих компонентов флюидных включений, извлеченных при механическом разрушении кварца и сульфидов золоторудного месторождения Панимба (Енисейский кряж), по данным газовой хромато-масс-спектрометрии

Формула	Название	CAS	A, %							
			Скв. 145, гл. 419 м		Скв. 145, гл. 681 м		Скв. 191, гл. 337.8 м		Скв. 191, гл. 615.9 м	
			Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин
Алифатические углеводороды										
<i>Парафины (алканы)</i>										
CH_4	Метан	74-82-8	10.140	1.317	0.558	4.506	1.377	4.460	10.933	1.169
C_2H_6	Этан	74-84-0	2.793	0.040	0.685	0.323	0.557	0.360	0.083	0.720
C_3H_8	<i>n</i> -Пропан	74-98-6	—	—	—	—	—	—	0.298	—
C_4H_{10}	<i>n</i> -Бутан	106-97-8	0.806	0.046	0.096	0.017	—	0.018	0.098	0.076
C_4H_{10}	2-Метилпропан	75-28-5	1.253	—	0.052	—	—	—	0.032	—
C_5H_{12}	<i>n</i> -Пентан	109-66-0	—	—	0.063	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	<i>n</i> -Гексан	110-54-3	0.500	0.763	0.070	0.146	0.287	0.010	0.015	0.024
C_7H_{16}	<i>n</i> -Гептан	142-82-5	0.310	0.048	0.043	0.013	1.170	0.014	0.009	0.038
C_8H_{18}	<i>n</i> -Октан	111-65-9	0.978	0.067	0.040	0.028	0.301	0.013	0.007	0.106
C_9H_{20}	<i>n</i> -Нонан	111-84-2	1.915	0.125	0.265	0.023	0.892	0.006	0.076	0.093
$C_{10}H_{22}$	<i>n</i> -Декан	124-18-5	1.544	0.025	0.145	0.011	0.887	—	0.037	0.035
$C_{11}H_{24}$	<i>n</i> -Ундекан	1120-21-4	0.791	0.108	0.059	0.016	0.551	—	0.023	0.046
$C_{12}H_{26}$	<i>n</i> -Додекан	112-40-3	0.703	0.188	0.055	0.007	0.494	—	0.010	0.093
$C_{13}H_{28}$	5-Метилдодекан	17453-93-9	—	—	0.133	—	—	—	—	—
$C_{13}H_{28}$	<i>n</i> -Тридекан	629-50-5	1.216	0.073	0.181	0.041	0.188	—	—	0.513
$C_{14}H_{30}$	<i>n</i> -Тетрадекан	629-59-4	0.997	0.064	0.133	0.007	0.827	—	0.034	0.008
$C_{15}H_{32}$	<i>n</i> -Пентадекан	629-62-9	—	0.123	—	1.134	—	—	—	0.031
$C_{16}H_{34}$	<i>n</i> -Гексадекан	544-76-3	—	0.017	—	0.057	—	—	—	0.056
$C_{17}H_{36}$	<i>n</i> -Гептадекан	629-78-7	—	—	—	0.029	—	—	—	0.013
$C_{18}H_{38}$	<i>n</i> -Октадекан	593-45-3	—	—	—	0.018	—	—	—	0.115
$C_{19}H_{40}$	<i>n</i> -Нондекан	629-92-5	—	—	—	0.014	—	—	—	—

Формула	Название	CAS	A, %							
			Скв.145, гл. 419 м		Скв. 145, гл. 681 м		Скв. 191, гл. 337.8 м		Скв. 191, гл. 615.9 м	
			Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин
<i>Олефины (алкены)</i>										
C ₄ H ₈	2-Метил-1-пропен	115-11-7	—	—	0.058	—	—	—	—	—
C ₄ H ₈	1-Бутен	106-98-9	—	0.152	—	0.104	0.108	0.019	0.029	0.005
C ₄ H ₈	2-Бутен	107-01-7	—	0.024	—	0.012	—	0.016	—	0.005
C ₆ H ₁₂	1-Гексен	592-41-6	0.548	0.090	0.051	—	0.369	—	0.009	—
C ₇ H ₁₄	1-Гептен	592-76-7	—	0.122	—	0.015	—	0.012	0.012	—
C ₈ H ₁₆	1-Октен	111-67-1	0.577	0.080	0.076	0.018	0.222	—	—	—
C ₈ H ₁₆	2-Октен	111-67-1	—	—	—	—	—	—	—	0.025
C ₉ H ₁₈	1-Нонен	124-11-8	—	—	—	—	0.396	—	0.013	—
C ₁₀ H ₂₀	1-Децен	872-05-9	—	0.151	—	0.021	1.393	—	0.017	—
C ₁₁ H ₂₂	(Z)-2-Ундецен	821-96-5	—	—	0.030	—	0.282	—	0.027	—
C ₁₂ H ₂₄	1-Додецен	112-41-4	—	0.062	—	0.079	—	—	—	0.018
C ₁₆ H ₃₂	1-Гексадецен	629-73-2	—	—	—	—	—	—	—	0.022
Циклические углеводороды										
<i>Арены</i>										
C ₆ H ₆	Бензол	71-43-2	0.285	2.729	0.112	1.222	0.714	0.260	0.029	0.273
C ₇ H ₈	Толуол	108-88-3	0.749	0.553	0.079	0.176	0.843	0.015	0.029	0.102
C ₈ H ₁₀	Этилбензол	100-41-4	—	0.013	0.018	0.014	0.261	0.014	0.025	0.142
C ₈ H ₁₀	1,4-Диметилбензол	106-42-3	—	0.541	—	0.300	—	—	—	—
C ₉ H ₁₂	Пропилбензол	103-65-1	—	0.030	—	0.023	—	0.011	—	0.040
C ₁₀ H ₁₄	Бутилбензол	104-51-8	1.041	0.049	0.069	0.029	0.176	—	0.027	—
C ₁₁ H ₁₆	Пентилбензол	538-68-1	0.380	0.073	0.080	0.015	0.446	—	—	—
C ₁₂ H ₁₈	Гексилбензол	1077-16-3	—	0.109	—	0.079	—	—	—	—
C ₁₃ H ₂₀	Гептилбензол	1078-71-3	—	0.049	—	0.025	—	—	—	—
C ₁₄ H ₂₂	Октилбензол	2189-60-8	—	—	—	0.021	—	—	—	—
Кислородсодержащие соединения										
<i>Спирты, простые и сложные эфиры</i>										
CH ₄ O	Метанол	67-56-1	—	0.037	—	0.041	—	0.020	—	0.014
C ₂ H ₆ O	Этанол	64-17-5	1.028	0.266	0.090	—	0.177	—	0.228	0.032
C ₄ H ₁₀ O	1-Бутанол	78-92-2	0.802	—	—	—	0.332	—	—	—
C ₆ H ₆ O	Фенол	108-95-2	1.157	0.190	0.149	0.014	1.803	—	0.029	0.089
C ₄ H ₁₀ O	Этиловый эфир	60-29-7	—	—	—	—	0.438	—	—	—
C ₄ H ₆ O ₂	Бутиролактон	96-48-0	0.537	0.135	0.034	0.066	0.385	0.018	0.014	0.053
C ₅ H ₈ O ₂	γ-Валеролактон	108-29-2	—	0.038	—	—	0.153	—	0.009	—
C ₅ H ₈ O ₂	Метилметакрилат	80-62-6	0.390	0.419	0.050	0.017	0.392	0.011	0.011	0.048
C ₁₃ H ₁₆ O ₄	Изобутиловый метилфталат	х	—	—	—	0.013	—	—	—	—
C ₁₄ H ₁₈ O ₄	Дипропилфталат	131-16-8	—	—	—	0.020	—	—	—	0.013
C ₁₈ H ₂₆ O ₄	Диизобутилфталат	84-69-5	—	—	—	—	—	—	—	0.080
<i>Альдегиды</i>										
C ₄ H ₄ O	Этаналь	75-07-0	0.925	0.116	0.225	0.025	0.541	0.015	0.119	0.028
C ₃ H ₄ O	2-Пропеналь	107-02-8	—	—	0.107	—	0.508	—	0.015	—
C ₃ H ₆ O	n-Пропаналь	123-38-6	1.744	0.051	—	0.011	—	0.013	—	0.005
C ₄ H ₆ O	2-Метил-2-пропеналь	78-85-3	—	—	—	—	—	—	0.013	—
C ₄ H ₆ O	2-Бутеналь	4170-30-3	0.509	—	0.045	—	—	—	0.013	—
C ₄ H ₈ O	2-Метилпропаналь (=изобутаналь)	78-84-2	0.692	—	0.040	—	0.291	—	0.005	—
C ₄ H ₈ O	n-Бутаналь	123-72-8	0.192	—	0.146	0.025	0.241	—	0.012	0.021

Формула	Название	CAS	А, %							
			Скв.145, гл. 419 м		Скв. 145, гл. 681 м		Скв. 191, гл. 337.8 м		Скв. 191, гл. 615.9 м	
			Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин
C ₅ H ₁₀ O	3-Метилбутаналь	590-86-3	0.412	—	0.076	—	0.310	—	—	—
C ₅ H ₁₀ O	2-Метилбутаналь	96-17-3	—	—	—	—	0.310	—	—	—
C ₅ H ₁₀ O	<i>n</i> -Пентаналь	110-62-3	1.728	0.256	0.085	0.029	0.204	0.006	0.014	0.020
C ₅ H ₄ O ₂	Фурфурол	98-01-1	0.561	0.033	0.043	0.032	0.402	0.023	0.018	0.072
C ₆ H ₁₂ O	<i>n</i> -Гексаналь	66-25-1	5.772	0.659	0.048	0.148	1.010	0.017	0.035	0.067
C ₇ H ₆ O	Бензальдегид	100-52-7	1.112	0.232	0.082	0.207	1.062	0.028	0.015	0.030
C ₇ H ₁₄ O	<i>n</i> -Гептаналь	111-71-7	6.424	0.128	0.252	0.039	1.569	—	0.086	0.049
C ₈ H ₁₆ O	<i>n</i> -Октаналь	124-13-0	3.045	0.029	0.168	0.004	2.537	—	0.017	—
C ₉ H ₁₈ O	<i>n</i> -Нонаналь	124-19-6	8.965	0.193	0.253	0.007	2.393	—	0.067	—
C ₁₀ H ₂₀ O	<i>n</i> -Деканаль	112-31-2	1.303	0.021	0.135	0.024	1.473	—	0.022	—
C ₁₁ H ₂₂ O	<i>n</i> -Ундеканаль	112-44-7	—	0.121	—	0.031	5.499	—	0.034	—
C ₁₂ H ₂₄ O	<i>n</i> -Додеканаль	112-54-9	—	0.050	—	0.023	—	—	—	—
C ₁₃ H ₂₆ O	<i>n</i> -Тридеканаль	10486-19-8	—	—	—	0.017	—	—	—	—
C ₁₅ H ₃₀ O	<i>n</i> -Пентадеканаль	2765-11-9	—	—	—	0.005	—	—	—	—

Кетоны

C ₃ H ₆ O	2-Пропанон	67-64-1	1.586	—	0.164	0.402	0.471	0.037	0.019	0.168
C ₄ H ₈ O	2-Бутанон	78-93-3	0.322	—	0.099	—	0.472	—	0.012	—
C ₄ H ₆ O ₂	2,3-Бутандион	431-03-8	0.313	—	0.053	—	0.362	—	0.017	—
C ₅ H ₁₀ O	2-Пентанон	107-87-9	0.706	—	0.082	—	0.107	—	0.015	—
C ₅ H ₈ O	Циклопентанон	120-92-3	0.653	—	0.050	—	0.141	—	0.016	0.033
C ₆ H ₁₂ O	2- Гексанон	591-78-6	0.762	—	0.160	—	0.588	—	0.052	—
C ₇ H ₁₄ O	2- Гептанон	110-43-0	0.794	—	0.584	—	0.607	—	0.024	—
C ₈ H ₈ O	Ацетофенон	98-86-2	—	0.487	—	0.048	—	—	—	—
C ₈ H ₄ O ₃	Фталевый ангидрит	85-44-9	—	0.126	—	0.047	—	—	—	0.069
C ₈ H ₁₆ O	2-Октанон	111-13-7	6.006	—	0.428	—	—	—	0.108	—
C ₈ H ₁₆ O	6-Метил-2-гептанон	928-68-7	—	—	—	—	0.492	—	—	—
C ₉ H ₁₈ O	2-Нонанон	821-55-6	0.401	—	0.070	0.002	0.114	—	0.016	—
C ₁₀ H ₂₀ O	2-Деканон	693-54-9	0.885	0.076	—	—	0.577	—	0.120	—
C ₁₁ H ₂₂ O	2-Ундеканон	112-12-9	—	—	—	0.155	—	—	—	—
C ₁₃ H ₂₆ O	2-Тридеканон	593-08-8	—	—	—	—	—	—	—	—
C ₁₄ H ₂₈ O	2-Тетрадеканон	2345-27-9	—	—	—	0.013	—	—	—	—

Карбоновые кислоты

C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная	64-19-7	0.317	3.305	0.059	1.188	0.242	0.082	0.011	0.392
C ₃ H ₆ O ₂	Пропановая	79-09-4	—	0.011	—	0.032	—	0.006	—	0.040
C ₄ H ₈ O ₂	Бутановая	107-92-6	0.815	0.170	0.199	0.138	—	0.005	—	0.132
C ₅ H ₁₀ O ₂	3-Метилбутановая	503-74-2	0.540	0.037	—	0.019	—	0.012	—	0.047
C ₅ H ₁₀ O ₂	Пentanовая	109-52-4	0.871	0.039	—	0.017	—	0.007	—	0.137
C ₆ H ₁₂ O ₂	Гексановая	142-62-1	—	0.065	—	0.150	—	—	—	0.037
C ₇ H ₁₄ O ₂	Гептановая	111-14-8	—	—	—	0.022	—	—	—	—
C ₈ H ₁₆ O ₂	Октановая	124-07-2	—	—	—	0.019	—	—	—	—
C ₉ H ₁₈ O ₂	Нонановая	112-05-0	—	—	—	0.009	—	—	—	—

Формула	Название	CAS	A, %							
			Скв.145, гл. 419 м		Скв. 145, гл. 681 м		Скв. 191, гл. 337.8 м		Скв. 191, гл. 615.9 м	
			Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин	Кварц	Пирротин
Гетероциклические соединения										
<i>Фураны</i>										
C ₄ H ₆ O	2,3-Дигидрофуран	1191-99-7	—	—	—	0.028	—	0.033	—	—
C ₅ H ₆ O	3-Метилфуран	930-27-8	0.312	0.051	—	—	—	—	—	0.040
C ₅ H ₆ O	2-Метилфуран	534-22-5	0.176	0.037	0.033	0.024	0.128	0.026	0.019	0.084
C ₅ H ₈ O ₂	2-Этилфуран	3208-16-0	1.135	0.636	0.096	0.046	0.616	—	0.042	—
C ₇ H ₁₀ O	2- <i>n</i> -Пропилфуран	4229-91-8	0.342	0.017	0.038	0.010	0.365	—	0.009	—
C ₈ H ₁₂ O	2- <i>n</i> -Бутилфуран	4466-24-4	0.184	0.029	—	0.015	—	0.006	—	0.103
C ₉ H ₁₄ O	2- <i>n</i> -Пентилфуран	3777-69-3	2.557	0.020	0.064	0.035	0.178	—	0.019	0.025
C ₁₀ H ₁₆ O	2- <i>n</i> -Гексилфуран	3777-70-6	0.699	0.036	—	0.068	—	—	—	—
C ₁₁ H ₁₈ O	2- <i>n</i> -Гептилфуран	3777-71-7	—	0.111	0.112	0.004	—	—	—	—
C ₁₂ H ₂₀ O	2- <i>n</i> -Октилфуран	4179-38-8	—	0.117	0.068	0.007	—	—	—	—
Серосодержащие соединения										
SO ₂	Диоксид серы	7446-09-5	0.187	0.397	—	0.022	0.357	4.044	0.058	0.188
C ₄ H ₄ S	Тиофен	110-02-1	—	0.084	—	—	—	0.025	—	0.002
C ₅ H ₆ S	2-Метилтиофен	554-14-3	—	0.024	—	0.019	—	0.018	—	0.022
C ₅ H ₆ S	3-Метилтиофен	616-44-4	—	0.051	—	0.047	—	0.008	—	0.041
C ₆ H ₈ S	2-Этилтиофен	872-55-9	—	0.033	—	0.015	—	0.006	—	0.053
C ₆ H ₈ S	3-Этилтиофен	1795-01-3	—	0.024	—	0.003	—	0.006	—	0.061
C ₇ H ₁₀ S	2-Пропилтиофен	1551-27-5	—	0.027	—	0.005	—	0.021	—	0.027
C ₈ H ₁₂ S	3-Бутилтиофен	34722-01-5	—	0.033	—	—	—	—	—	—
C ₈ H ₁₂ S	2-Бутилтиофен	1455-20-5	—	0.035	—	0.007	—	—	—	0.009
C ₉ H ₁₄ S	2-Пентилтиофен	4861-58-9	—	0.037	—	0.032	—	—	—	0.028
C ₁₀ H ₁₆ S	2-Гексилтиофен	18794-77-9	—	0.152	—	0.024	—	—	—	0.301
C ₁₁ H ₁₈ S	2-Гептилтиофен	18794-78-0	—	0.042	—	0.024	—	—	—	0.044
C ₁₂ H ₂₀ S	2-Октилтиофен	880-36-4	—	—	—	0.063	—	—	—	—
C ₁₃ H ₂₂ S	2-Нонилтиофен	57754-07-1	—	—	—	0.048	—	—	—	0.025
C ₁₄ H ₂₄ S	2-Децилтиофен	24769-39-9	—	—	—	0.017	—	—	—	—
Сульфиды										
C ₂ H ₆ S ₂	Диметилдисульфид	624-92-0	0.896	0.120	0.057	0.047	0.341	0.023	—	0.115
COS	Карбонилсульфид	463-58-1	2.403	0.229	1.075	0.002	1.263	0.119	0.129	0.033
CS ₂	Сероуглерод	75-15-0	0.786	0.493	0.059	0.041	0.185	0.570	0.026	0.078
H ₂ S	Сероводород	7783-06-4	—	—	—	0.011	—	0.016	—	0.185
Азотсодержащие соединения										
C ₇ H ₅ N	Бензонитрил	100-47-0	—	0.026	—	—	—	—	—	—
C ₈ H ₅ NO ₂	Фталимид	85-41-6	—	0.026	—	—	—	—	—	0.064
Неорганические соединения										
H ₂ O	Вода	7732-18-5	4.595	28.773	21.007	31.736	1.728	27.086	15.581	19.344
CO ₂	Диоксид углерода	124-38-9	4.774	51.941	70.326	55.880	56.275	60.910	68.990	72.563
N ₂	Азот	7727-37-9	1.161	—	—	0.109	—	1.067	2.063	1.127
Алканы/алкены			21.8	4.4	12.0	25.7	2.9	103.8	109.0	41.8
CO ₂ /(CO ₂ +H ₂ O)			0.51	1.8	0.77	1.8	0.98	2.2	0.82	3.4
Парафины: (тяжелые C ₅ -C ₁₇)/(легкие C-C ₄)			0.6	1.1	0.8	0.3	3.2	0.01	0.02	0.6

Примечание. CAS – уникальный численный идентификатор химических соединений, внесенных в реестр Chemical Abstracts Service (www.cas.org). A – нормализованная площадь, отношение площади компонента газовой смеси к сумме площадей всех компонентов в ПИС-хроматограмме. Прочерк – ниже предела обнаружения. «хх» — численный идентификатор отсутствует.

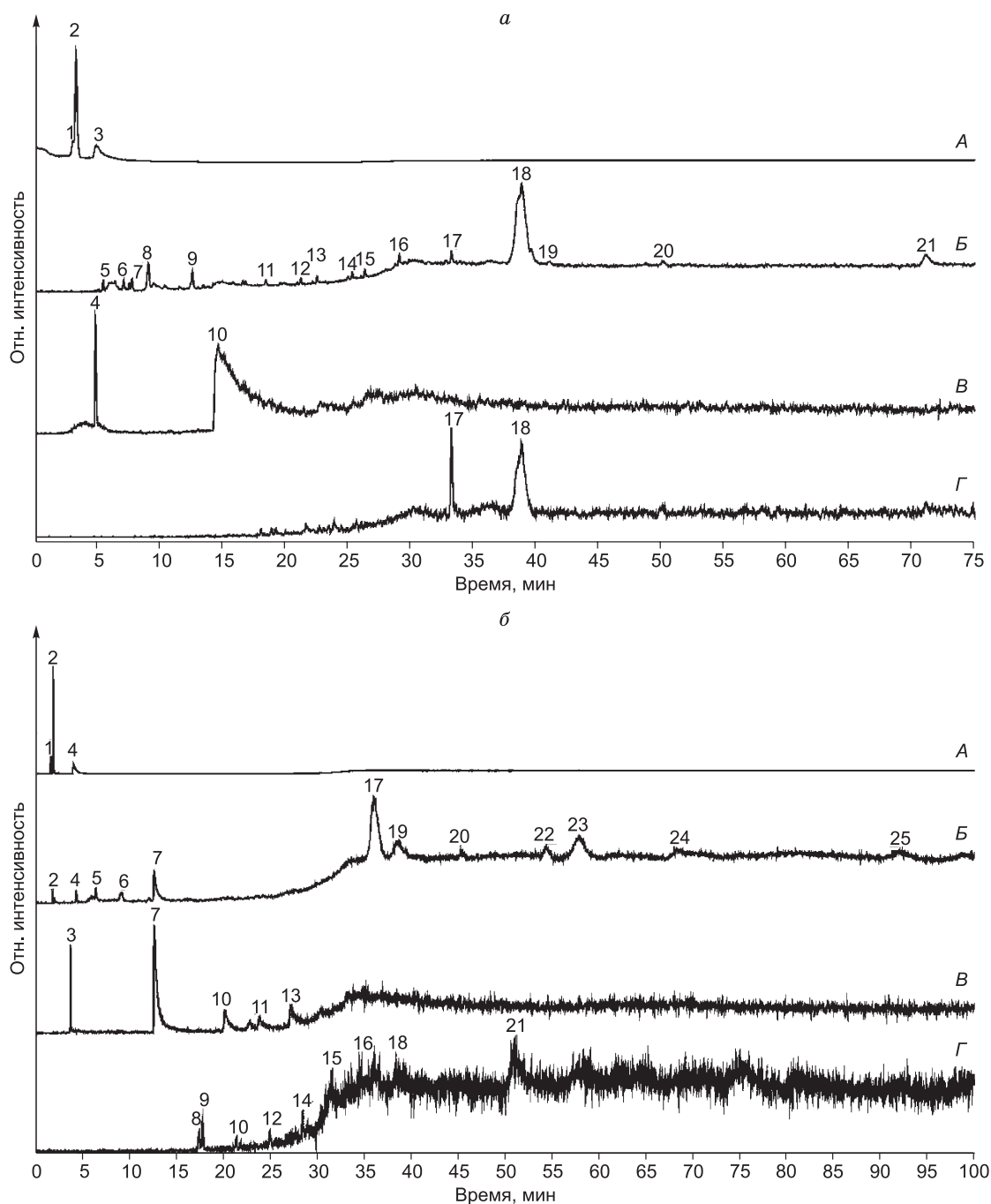


Рис. 4. Фрагменты масс-хроматограмм летучих компонентов из:

a — кварца, обр. 191-615.9, *б* — пирротина, обр. 191-615.9 золоторудного месторождения Панимба. *A* — ТИС — полный ток ионов; *B* — сумма по m/z (43+57+71+85); *B* — сумма по m/z 60; *Г* — сумма по m/z 97. *a* — 1—метан (CH_4); 2 — диоксид углерода (CO_2); 3 — вода (H_2O); 4 — карбонилсульфид (COS); 5 — *n*-пропан (C_2H_8); 6 — 2-метилпропан (C_4H_{10}); 7 — этанол ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$); 8 — 2-пропанон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$); 9 — 2-бутанон ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$); 10 — уксусная кислота ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$); 11 — гептан (C_7H_{16}); 12 — гексаль ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$); 13 — октан (C_8H_{18}); 14 — гепталь ($\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}$); 15 — нонан (C_9H_{20}); 16 — 2-октанон ($\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$); 17 — нонаналь ($\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$); 18 — 2-деканон ($\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$); 19 — додекан ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$); 20 — ундеканаль ($\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}$); 21 — тетрадекан ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$);
б — 1 — метан (CH_4); 2 — диоксид углерода (CO_2); 3 — карбонилсульфид (COS); 4 — вода (H_2O); 5 — бутан (C_4H_{10}); 6 — 2-пропанон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$); 7 — уксусная кислота ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$); 8 — 2-метилтиофен ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$); 9 — 3-метилтиофен ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$); 10 — 2-этилтиофен ($\text{C}_6\text{H}_8\text{S}$); 11 — пентановая кислота ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$); 12 — 2-пропилтиофен ($\text{C}_7\text{H}_{10}\text{S}$); 13 — гексановая кислота ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$); 14 — 2-бутилтиофен ($\text{C}_8\text{H}_{14}\text{S}$); 15 — 2-пентилтиофен ($\text{C}_9\text{H}_{18}\text{S}$); 16 — 2-гексилтиофен ($\text{C}_{10}\text{H}_{22}\text{S}$); 17 — тридекан ($\text{C}_{13}\text{H}_{28}$); 18 — 2-гептилтиофен ($\text{C}_{11}\text{H}_{18}\text{S}$); 19 — ундеканаль ($\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}$); 20 — тетрадекан ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$); 21 — 2-нонилтиофен ($\text{C}_{13}\text{H}_{22}\text{S}$); 22 — пентадекан ($\text{C}_{15}\text{H}_{32}$); 23 — тридеканаль ($\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}$); 24 — гексадекан ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$); 25 — октадекан ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$).

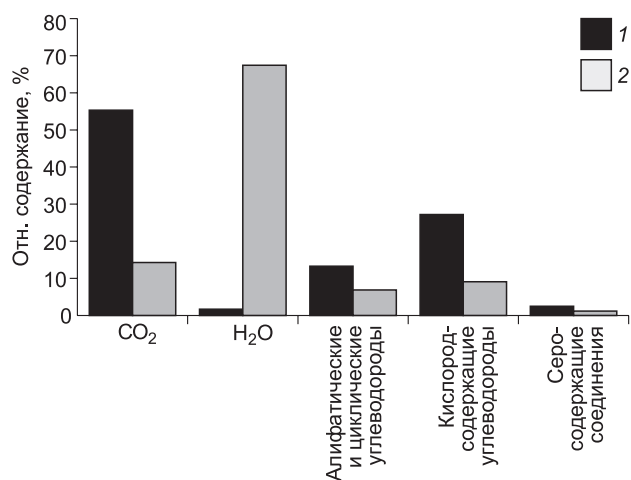


Рис. 5. Состав флюидных включений в кварце кварцевых жил с различным содержанием золота на месторождении Панимба, Енисейский кряж, по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

1, 2 — кварцевые жилы: 1 — золотосодержащие, 2 — незолотосодержащие.

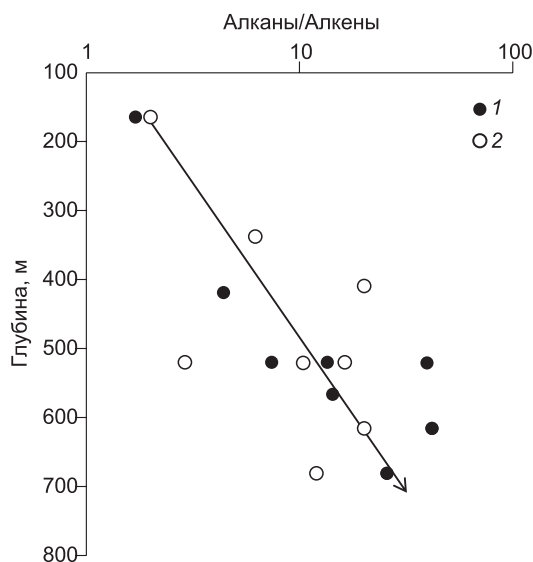


Рис. 6. Глубина—отношение алканы/алкены во флюидах кварца (1) и сульфидов (2) месторождения Панимба, по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

ние CO₂ в составе летучих из кварца составляет 52 отн. % (при колебании от 5.0 до 83.0 отн. %), воды — 20 (в интервале от 1 до 67), а в сульфидах — CO₂ — 40 (при колебании от 9—73), H₂O — 34 (при колебании от 19 до 54). На долю углеводородов и их производных приходится в кварце и сульфидах 28 и 26 % соответственно. При этом необходимо отметить, что флюиды кварцевых жил с содержанием золота 15.1 г/т (данные пробирного анализа) обогащены CO₂, углеводородами и серосодержащими соединениями по сравнению с флюидами слабозолотосодержащих (0.15 г/т) жил (рис. 5). Молекулярного азота (N₂) и азотсодержащих соединений во флюидах сульфидов обнаружено примерно в 2 раза больше, чем во флюидах кварца. Содержание серосодержащих соединений в сульфидах примерно в 4 раза выше, чем в кварце и составляет 8.6 и 2.3 % соответственно. H₂S и большая группа тиофенов (C₄H₄S—C₄H₂₄S — 0.7 %) определены только во флюидах сульфидов, в кварце они отсутствуют. В группе парафинов из 20 проанализированных образцов кварца и сульфидов в 15 образцах легкие парафины (C₁—C₄) преобладают над тяжелыми (C₅—C₁₇), о чем свидетельствует величина отношения (C₅—C₁₇)/(C₁—C₄), которая в кварцах составляет 0.02—0.80, в сульфидах — 0.01—0.60 (см. табл. 4). В группе алифатических углеводородов алканы доминируют над алкенами (олефинами), при этом отмечено, что с глубиной месторождения возрастает доля алканов во флюиде (рис. 6).

Давление флюидной системы

Давление флюида при минералообразовании на месторождении Панимба изменялось в интервале от 0.2 до 3.3 кбар (см. табл. 1).

Изотопный состав серы сульфидов

Результаты изотопного анализа серы сульфидов из кварцевых жил (24 образца) и трех образцов из сланцев с различным содержанием золота сведены в табл. 5 и изображены на рис. 7. Все определения концентрируются в интервале от +0.9 до +6.7 ‰, но при этом из 27 определений 80 % находятся в еще

Рис. 7. Изотопный состав серы сульфидов (залитый кружок) из кварцевых жил золоторудного месторождения Панимба (Енисейский кряж).

Изотопный состав серы гранитоидов приведен по данным [Ohmoto, Rye, 1979].

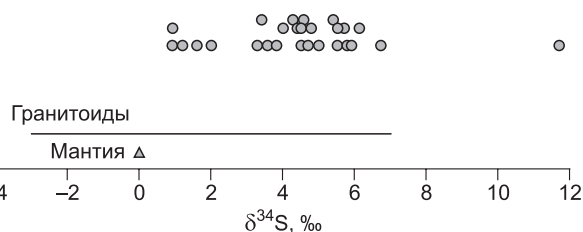


Таблица 5.

**Изотопный состав серы сульфидов кварцевых жил и сланцев
золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край)**

№ образца	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ (CDT)
Пн-145-521	Пирротин	5.5
Пн-145-681	»	4.5
Пн-191-164.6	Пирротин в сланце	4.4
Пн-191-194.0	Пирит	5.8
Пн-191-307.0	Пирротин	3.6
Пн-191-337.8(a)	Пирит	4.7
Пн-191-337.8(a)	Халькопирит	4.5
Пн-191-520.1	Пирит	4.8
Пн-191-520.1	Пирротин	4.0
Пн-191-566.5	Пирит	5.9
Пн-191-566.5	Пирротин	6.1
Пн-191-597	Пирит	5.4
Пн-191-615.9	Пирротин	5.0
134-224.1	Пирит в сланце	0.9
134-415.5	Пирит	5.7
135-184.1	Пирротин	1.6
135-200	Пирит	2.0
135-285.4	Пирротин	3.3
135-309.1	Пирит	11.7
135-318	»	6.7
135-415	»	1.2
135-415	Пирротин	4.3
135-463.4	Арсенопирит	4.6
135-463.4	Пирротин	5.5
135-463.4	Пирротин в сланце	0.9
136-299	Пирротин	3.8
136-364.8	»	3.4

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом центре ИГМ СО РАН, аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова.

более узком диапазоне от 3.3 до 6.7 ‰, а 20 ‰ — в диапазоне от 0.9 до 2.0 ‰ и только один пирит (см. табл. 5, обр. 135/309.1) показал более тяжелое значение изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$) +11.7 ‰.

Возраст золотого оруденения

Получены два значения возраста формирования гидротермального серицита, взятого внутри золотоносных кварцевых жил: первый (рис. 8, а, скв. 145, гл. 218 м) — 744 ± 17 млн лет и второй (см. рис. 8, б, скв. 191, гл. 337.8 м) — 817.2 ± 5.3 млн лет. Появление сложной картины возрастных ступеней в левой части спектра (см. рис. 8, а) можно объяснить изотопной гетерогенностью системы, которая вызвана более ранними изменениями [Травин, 2016].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Результаты изучения флюидных включений в кварце и сульфидах золоторудного месторождения Панимба показали, что золотоносные кварцевые жилы сформированы металлоносными Mg-Na-Cl-содержащими, углекисло-углеводородными флюидами в интервале давлений от 0.2 до 3.3 кбар и температур от 200 до 410 °С. Колебание флюидного давления в широком интервале от 0.2 до 3.3 кбар свидетельствует об активной деятельности минералообразующих растворов в зонах интенсивного рассланцевания пород нарушения Михайловского, с которым пространственно связаны золото-кварцевые жилы месторождения. Резкое изменение давления привело к кипению исходного поликомпонентного водно-углекисло-углеводородного флюида и разделению его на существенно водную часть (включения типа

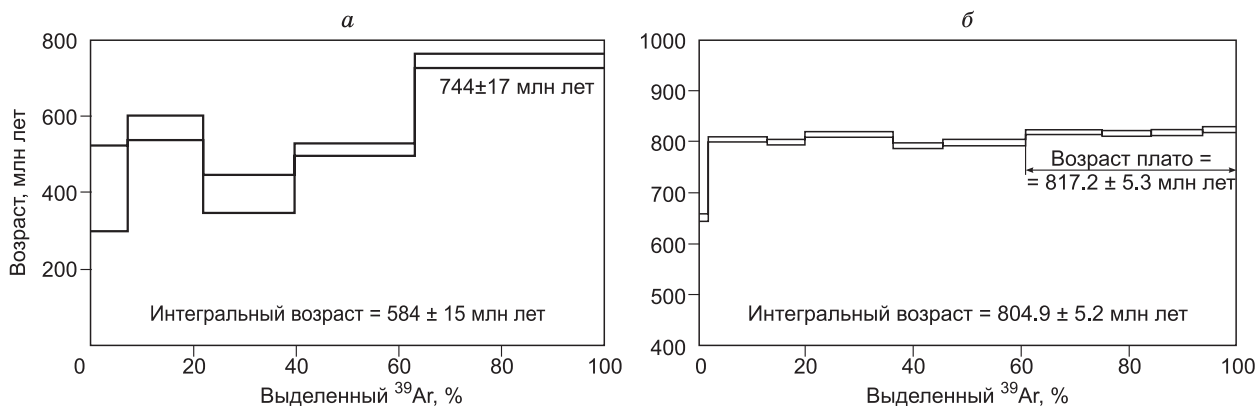


Рис. 8. Спектры $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастов серицитов из скв. 145, гл. 218 м (а) и скв. 191, гл. 337.8 м (б) кварцевых жил золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край).

$\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}+\text{Г}}$; $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} \pm \text{Ж}_{\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2} \pm \text{Г}$) и преимущественно газовую (тип включений $\text{Г}_{\text{H}_2\text{O}} \pm \text{Г}_{\text{CH}_4 \pm \text{N}_2 \pm \text{CO}_2}$; $\text{Ж}_{\text{CH}_4 \pm \text{N}_2 \pm \text{CO}_2} \pm \text{Г}$). При кипении в состав газовой фазы переходят преимущественно CH_4 и N_2 , поскольку коэффициенты их растворимости в воде на 1—2 порядка ниже, чем у CO_2 [Naden, Shepherd, 1989; Кряжев, 2010]. Кипение флюида является эффективной причиной кристаллизации рудных элементов, в том числе и золота [Ермаков, Долгов, 1979; Реддер, 1987; Bowers, 1991; Mishra, Pal, 2008].

Основными составляющими минералообразующих флюидов золотоносных кварцевых жил месторождения Панимба являются вода, углекислота и углеводороды (см. табл. 2, 4; рис. 5). Соленость водной фазы Mg-Na-Cl-содержащих флюидов, законсервированных в первичных и первично-вторичных включениях, может достигать 23.3 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1, П, ПВ). Кварцевые жилы неоднократно подвергались воздействию более поздних гидротермальных растворов, свидетельствуя о сложной флюидной истории своего формирования. Это выразилось в появлении трех генераций вторичных флюидных включений со своими физико-химическими параметрами: 1 — вторичные газовой-жидкие включения (см. табл. 1, В-а, $T = 100\text{—}220$ °C, соленость Na-Mg-Cl-содержащих растворов 0.5—7.0 мас. % NaCl-экв.), 2 — вторичные водно-солевые включения с дочерними кристалликами галита (см. табл. 1, В-б, $T = 160\text{—}260$ °C, соленость Ca-Na-Cl-содержащих растворов выше 30 мас. % NaCl-экв.), 3 — вторичные однофазные жидкие и газовые углекисло-метан-азотные включения (см. табл. 1, В-в).

Содержание CO_2 во флюидах кварца и сульфидов достигает 70-80 отн. % при колебании от 4.8 до 82.5 отн. % в кварце и от 8.8 до 72.5 отн. % в сульфидах (см. табл. 4). Данные раман-спектроскопических исследований индивидуальных включений в кварце также показали наличие CO_2 во флюиде (см. табл. 3, рис. 3). Одновременно с вариациями содержаний CO_2 во флюиде меняются и окислительно-восстановительные характеристики этого флюида, которые выражены через величину отношения CO_2/CH_4 . По данным газовой хроматографии эта величина колеблется от 0.08 до 161 (см. табл. 2), по данным раман-спектроскопии — от 0.1 до 142 (см. табл. 3), указывая на изменяющиеся окислительно-восстановительные параметры флюидов, сформировавших месторождение Панимба. Вариации в содержаниях CO_2 и углеводородов во флюидах (см. табл. 2—4), по-видимому, являются причиной неравномерного распределения золота, содержание которого колеблется от 0.1 до 100 г/т в кварцевых жилах месторождения Панимба. Повышенные содержания углекислоты, углеводородов и серосодержащих соединений во флюидах могут выступать в роли положительных индикаторов золотоносности кварцевых жил. Ранее неоднократно упоминалась взаимосвязь углекислых сред и активности золота на золоторудных месторождениях, где CO_2 отводилась роль геохимического барьера [Томиленко, Гибшер, 2001; Mernagh, Vierlein, 2008; Tomilenko et al., 2010; Гибшер и др., 2011; Рябуха и др., 2015].

Во флюидах кварца и сульфидов, помимо H_2O и CO_2 , определены углеводороды, азот- и серосодержащие соединения (см. табл. 4). В основном состав газовой составляющей органических соединений идентичен в кварце и сульфидах, на что указывают полученные результаты (см. табл. 4) и представленные в системе C—O—H, где они образуют единое поле (рис. 9, а), которое мы рассматриваем как свидетельство близкого источника их генерации. Вместе с тем различия, в частности, выявлены по составу серосодержащих соединений: карбонилсульфид (COS) преобладает во флюидах кварца, а SO_2 и CS_2 — сульфидов (см. рис. 9, б). Дисульфид углерода (CS_2) и карбонилсульфид могли образоваться в результате окислительно-восстановительных реакций [Schwandner et al., 2013]:

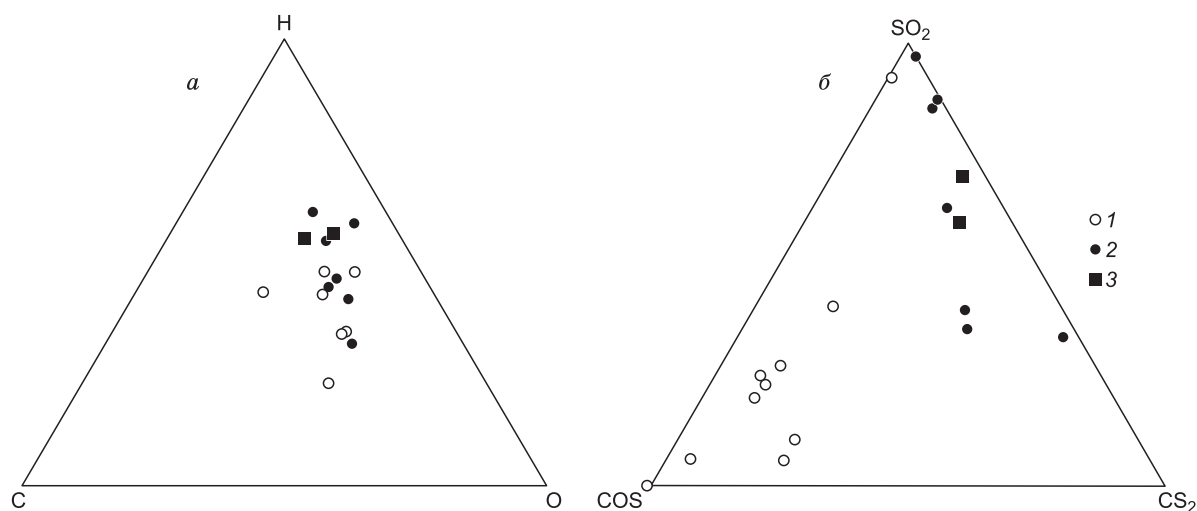
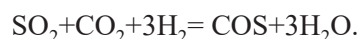


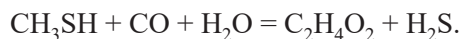
Рис. 9. Состав летучих компонентов во флюидах кварца и сульфидов месторождения Панимба в системе C—O—H (а) и SO₂—COS—CS₂ (б), по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

1 — кварц, 2 — пирротин, 3 — пирит.



Тиофены, обнаруженные в составе летучих компонентов из сульфидов, обладают высокой реакционной способностью [Травень, 2013]. Источником углеродного фрагмента тиофенов могли быть спирты, кетоны и фураны, а источником серы — H₂S, CS₂, SO₂, которые определены во флюидах кварцевых жил месторождения. В природе источником тиофенов являются углеродсодержащие сланцы, подверженные термическому воздействию [Чичибабин, 1963].

Во флюидах месторождения Панимба определено до 10 органических карбоновых кислот, суммарное содержание которых в сульфидах достигает 4—5 отн. %, а в кварце — 2.5 отн. %, но основная доля (до 3 отн. %) из этой группы принадлежит уксусной кислоте (C₂H₄O₂) (см. табл. 4). Уксусная кислота могла образоваться при взаимодействии водного раствора серосодержащего углеводорода с CO в присутствии катализатора — сульфидов вмещающих пород [McCollom, 2013]:



Может быть, эта реакция явилась причиной появления сероводорода (H₂S до 1 отн. %) и уксусной кислоты (C₂H₄O₂ до 3—4 отн. %) во флюидах месторождения Панимба. Со своей стороны сероводород мог участвовать в образовании Au-карбокислых и Au-карбонильных соединений [Эльшенбройх, 2011]. По данным [Буслаева, Новгородова, 1992], H₂S, взаимодействуя с углеродом по реакциям присоединения, образует летучие тиолы (C_nH_{2n+1}HS) и тиоэфиры (сернистые аналоги простых эфиров), в которых водород может замещаться золотом, образуя восстановленные золотоорганические соединения типа (C_nH_{2n+1}SAu). Эти комплексы при изменении PT-параметров флюидной системы диссоциируют, выделяя сульфиды и мелкодисперсное самородное золото. Карбоновые кислоты хорошо растворимы в воде, образуя металлоорганические анионные комплексы, т. е. они потенциально способны транспортировать рудные элементы [Greenwood et al., 2013].

Вполне возможно, что на месторождении Панимба золото транспортировалось в составе восстановленных углеводородных флюидов, на что указывают данные прямого определения состава газовой фазы, в которой определены алканы (парафины) и алкены (олефины) (см. табл. 4). Отношения алканы/алкены авторы работы [Norman et al., 2002] предлагают использовать для реконструкции окислительно-восстановительного потенциала флюидов через фугитивность водорода (*f*_{H₂}) и кислорода (*f*_{O₂}). При доминировании алканов — флюид восстановленный, а при преобладании алкенов — флюид окисленный. На рис. 6 просматривается увеличение доли восстановленных флюидов с глубиной месторождения Панимба.

Согласно опубликованным работам [Паддефет, 1982; Эльшенбройх, 2011] золото входит в состав целого ряда легкоподвижных органических соединений, где золото со степенью окисления Au¹⁺, Au³⁺ образует сложные комплексы, содержащие в своем составе такие элементы, как C, H, O, S, N, Cl и др. При этом для всей металлоорганической химии золота характерны взаимодействия золото-золото [Эль-

шенбройх, 2011]. Может быть, с этой особенностью золотоорганических соединений связан хорошо известный в геологической литературе факт, что на начальных этапах гидротермальной деятельности флюидов кристаллизуется очень мелкое (<1—500 мкм) так называемое «невидимое» золото, которое при повторном воздействии флюидов укрупняется, вплоть до образования самородков.

Во флюидах кварца и сульфидов обнаружен молекулярный азот (N_2), доля которого составляет 2 и 7 отн. % соответственно. Здесь же определены и азотсодержащие соединения — 0.04 отн. % в кварце и на порядок больше (0.3 отн. %) в сульфидах (см. табл. 4). Молекулярный азот — химически малоактивное вещество. Его инертность обусловлена большой прочностью внутри молекулярной связи, разрыв которой требует высокой энергии [Паддефет, 1982]. Но химические соединения, в состав которых входит азот в виде лиганда CN^- , способны вступать с золотом в реакции комплексообразования и транспортировать его к местам отложения [Марчук, 2008].

Гиперсолёные флюиды присутствуют в кварцевых жилах месторождения в виде вторичных включений ($H_2O + G + KP$). Соленость этих флюидов превышает 30—40 мас. % $NaCl$ -экв., а близкие температуры гомогенизации и растворения кристаллика в этих включениях в интервале от 160 до 250 °C указывают на самостоятельный тип флюида в отличие от поликомпонентного водно-углекисло-углеводородного. Предполагаем, что источником гиперсолёного флюида могли быть постмагматические гидротермальные растворы близлежащих гранитоидов Чиримбинского массива. Поскольку гиперсолёные флюиды обнаружены как в золотоносных, так и незолотоносных кварцевых жилах, то, вероятнее всего, эти флюиды не оказали заметного влияния на золотоносность изученных кварцевых жил.

Вместе с тем результаты изотопного изучения серы ($\delta^{34}S$) сульфидов дают основание полагать, что заметная роль в конечном облике золото-кварцевых жил месторождения Панимба принадлежит постмагматическим гидротермальным растворам близлежащего Чиримбинского интрузива. Изотопный состав серы сульфидов, меняется от 0.9 до 6.7 ‰ и не выходит за пределы $-3... +7$ ‰, свойственные гранитоидам [Омото, Рай, 1982]. Более тяжелый изотоп серы со значением $+11.7$ ‰ (см. табл. 5, обр. 135-309.1) свидетельствует о вовлечении в минералообразующую систему серы осадочных пород. Не исключен вариант влияния постмагматических растворов Чиримбинского массива на фракционирование изотопов серы, которое приводит к сдвигу изотопного состава серы только в отрицательную сторону [Бортников, 2011].

Золотоносные кварцевые жилы месторождения Панимба формировались в интервале от 817.2 ± 5.3 до 744 ± 17 млн лет (см. рис. 8) продолжительностью около 60 млн лет. Возраст 817.2 ± 5.3 млн лет можно связать с развитием первого этапа тектонометаморфической эволюции Панимбинского рудного узла и формированием основной Панимбинско-Шалакитской надвиговой системы Енисейского кряжа, где происходило внедрение Чиримбинского массива и контактовый метаморфизм сланцев рудной зоны месторождения 868.9 ± 6.5 и 815.0 ± 3.6 млн лет назад соответственно [Сазонов и др., 2010, 2016].

При этом региональный метаморфизм отложений кординской свиты нижнего рифея, вмещающей рудные тела месторождения Панимба, проходил в интервале от 996 ± 32 до 889 ± 26 млн лет [Сазонов и др., 2016], т. е. значительно древнее возраста формирования гидротермальной золото-сульфидной минерализации месторождения Панимба. Определенный нами возраст кристаллизации золото-кварцевых жил 744 ± 17 млн лет (см. рис. 8) коррелируется со вторым этапом тектонометаморфической эволюции Панимбинской зоны смятия на рубеже 730—760 млн лет [Сазонов и др., 2010] и временем кристаллизации многофазного Чиримбинского интрузива в интервале от 868.9 ± 6.5 до 721.4 ± 1.6 млн лет [Верниковская и др., 2002; Сазонов и др., 2010, 2016].

ВЫВОДЫ

Золоторудное месторождение Панимба сформировано металлоносными $Mg-Na-Cl$ -содержащими водно-углекисло-углеводородными флюидами в интервале температур от 180 до 410 °C и давлений от 0.2 до 3.3 кбар.

Флюиды золото-кварцевых жил месторождения в своем составе содержат углеводороды, азот- и серосодержащие соединения, которые потенциально способны транспортировать рудные элементы, в том числе и золото, и могут быть положительным индикатором золотоносности кварцевых жил.

Флюиды соленостью свыше 30—40 мас. % $NaCl$ -экв. и изотопный состав серы сульфидов (0.9—6.7 ‰) являются результатом воздействия постмагматических растворов близлежащего Чиримбинского гранитоидного массива.

Возраст золото-кварцевых жил месторождения (817.2 ± 5.3 — 744 ± 17 млн лет) вписывается по времени в интервал кристаллизации многофазного Чиримбинского гранитоидного интрузива (868.9 ± 6.5 — 721.4 ± 1.6 млн лет) и моложе времени регионального метаморфизма (996 ± 32 — 889 ± 26 млн лет).

Конструктивные предложения, замечания В.Б. Наумова, А.Э. Изоха и анонимного рецензента способствовали улучшению рукописи.

Работа выполнена в рамках государственного задания, НИР ИГМ СО РАН 0330-2016-005 и Российского научного фонда № 14-17-00602-П.

ЛИТЕРАТУРА

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

Бортников Н.С. Парагенетические ассоциации, химический состав минералов и эволюция процессов минералообразования во флюидно-магматических системах // Основные результаты научно-исследовательских работ за 2010 год Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. М., ИГЕМ РАН, 2011, с. 67—70.

Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в эндогенных рудах. М., Недра, 1992, 234 с.

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Даценко В.М., Котов А.Б., Ковач В.П., Травин А.В., Яковлева С.З. Гранитоиды Ерудинского и Чиримбинского массивов Заангарья Енисейского края — индикаторы неопротерозойских коллизионных событий // Геология и геофизика, 2002, т. 43(3), с. 259—272.

Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и *PT*-условия образования кварцевых жил (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1851—1867.

Даценко В.М. Гранитоидный магматизм юго-западного обрамления Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 1984, 120 с.

Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М., Недра, 1979, 271 с.

Жимулев Е.И., Сонин В.М., Бульбак Т.А., Чепуров А.И., Томиленко А.А., Похиленко Н.П. Летучие соединения серы в системе Fe—C—S при 5.3 ГПа и 1300 °C // ДАН, 2015, т. 462, № 3, с. 340—345.

Злобин В.А., Пономарева А.П. Особенности проявления магматической деятельности в золотоносных районах Енисейского края // Геология и геофизика, 1984 (10), с. 36—46.

Киргинцев А.Н., Трушников Л.И., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Л., Химия, 1972, 247 с.

Корнев Т.Я., Енахин А.Г., Князев В.Н., Шарифулин С.К. Зеленокаменные пояса юго-западного обрамления Сибирской платформы и их металлогения. Красноярск, КНИИГиМС, 2004, 177 с.

Кряжев С.Г. Современные проблемы теории и практики термобарогеохимии // Руды и металлы, 2010, № 2, с. 38—46.

Ли Л.В., Даценко В.М. Положение гранитоидных формаций и место золотого оруденения в истории развития Енисейского края // Изв. ТПУ. Вопросы геологии месторождений золота. 1970, т. 239, с. 60—65.

Марчук М.В. Экспериментальное изучение процесса переноса петрогенных и рудных компонентов в восстановленных флюидах: Автореф. дис.... к.г.-м.н., Иркутск, 2008, 16 с.

Омото Х., Рай Р.О. Изотопы серы и углерода // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М., Мир, 1982, с. 405—450.

Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах (методика, аппаратура, метрология). Новосибирск, ИГТ СО АН СССР, 1990, 32 с.

Паддефет Р. Химия золота. М., Мир, 1982, 259 с.

Петровская Н.В. Самородное золото. М., Наука, 1973, 348 с.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М., Мир, 1987, т. I, 558 с.

Рябуха М.А., Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Хоменко М.О., Сазонов А.М. *PTX*-параметры метаморфогенных и гидротермальных флюидов: изотопия и возраст формирования Богунайского золоторудного месторождения южной части Енисейского края (Россия) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (6), с. 1153—1172.

Сазонов А.М. Геохимия золота в метаморфических толщах. Томск, Изд-во ТПУ, 1998, 168 с.

Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.С., Звягина Е.А., Федорова А.В., Тишин П.А., Леонтьев С.И. Золоторудная металлогения Енисейского края: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2010, № 4, с. 371—395.

Сазонов А.М., Некрасова Н.А., Звягина Е.А., Тишин П.А. Геохронология гранитов, вмещающих сланцев и руд месторождения золота Панимба (Енисейский край) // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2016, № 2, с. 174—188.

Сердюк С.С., Коморовский Ю.Е., Зверев А.И., Ояберь В.К., Власов В.С., Бабушкин В.Е., Кириленко В.А., Землянский С.А. Модели месторождений золота Енисейской Сибири. Красноярск, СФУ, 2010, 584 с.

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

Травень В.С. Органическая химия. Т. II. М., БИНОМ, 2013, 517 с.

Травин А.В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (3), с. 553—574.

Эльшенбройх К. Металлоорганическая химия. М., БИНОМ, 2011, 746 с.

Чичибабин А.Е. Основные начала органической химии. Т. 1. М., Госхимиздат, 1963, 922 с.

Bakker R.J. Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochores // *Memoir Geol. Soc.*, 2001, № 7, p. 23—25.

Bowers T.S. The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, v. 55, p. 2417—2434.

Brown P.E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // *Amer. Miner.*, 1989, v. 74, p. 1390—1393.

Brown P.E., Hagemann S.G. MacFlinCor and its application to fluids in Archean lode-gold deposits // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, v. 59, p. 3943—3952.

Burke E.A. Raman microspectrometry of fluid inclusions // *Lithos*, 2001, v. 55, p. 139—158.

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

Greenwood P.F., Brocks J.J., Grice K., Schwark L., Dick J.M., Evans K.A. Organic geochemistry and mineralogy. I. Characterisation of organic matter associated with metal deposits // *Ore Geol. Rev.*, 2013, № 50, p. 1—27.

McCollom T.M. The influence of minerals on decomposition of the *n*-alkyl- α -amino acid norvaline under hydrothermal conditions // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013, v. 104, p. 330—357.

Mernagh T.P., Bierlein F.P. Transport and precipitation of gold in Phanerozoic metamorphic terranes from chemical modeling of fluid-rock interaction // *Econ. Geol.*, 2008, v. 103, p. 1613—1640.

Mishra B., Pal N. Metamorphism, fluid flux and fluid evolution relative to gold mineralization in the Hutti-Mashi Schist Belt, Eastern Dharwar Craton, India // *Econ. Geol.*, 2008, v. 103, p. 801—827.

Naden J., Shepherd T.J. Role of methane and carbon dioxide in gold deposition // *Nature*, 1989, v. 342, p. 793—795.

Norman D.I., Blamey N., Moore J.N. Interpreting geothermal processes and fluid sources from fluid inclusion organic compounds and CO₂/N₂ ratios // *Proceedings of 27th Workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 28—30, 2002, p. 234—241.

Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon // *Geochemistry of hydrothermal ore deposit*. N.Y., Wiley, 1979, p. 509—567.

Schwandner F.M., Seward T.M., Gize A.P., Hall K., Dietrich V.J. Halocarbons and other trace heteroatomic organic compounds in volcanic gases from Vulcano (Aeolian Islands, Italy) // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013, v. 101, p. 191—221.

Sokol E., Kozmenko O., Smirnov S., Sokol I., Novikova S., Tomilenko A., Kokh S., Ryazanova T., Reutsky V., Bulbak T., Vapnik Y., Deyak M. Geochemical assessment of hydrocarbon migration phenomena: Case studies from the south-western margin of the Dead Sea Basin // *J. Asian Earth Sci.*, 2014, v. 93, p. 211—228.

Thiéry R., van den Kerkhof A.M., Dubessy J. *v*X properties of CH₄—CO₂ and CO₂—N₂ fluid inclusions: modelling for *T* < 31°C and *P* < 400 bars // *Eur. J. Miner.*, 1994, v. 6, № 6, p. 753—771.

Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia) // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 375—394.

Tomilenko A.A., Chepurov A.I., Sonin V.M., Bul'bak T.A., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Timina T.Yu., Pokhilenko N.P. The synthesis of methane and heavier hydrocarbons in the system graphite-iron-serpentine at 2 and 4 GPa and 1200 °C // *High Temp. High Pres.*, 2015, v. 44, p. 451—465.