

УГЛЕВОДОРОДЫ ВО ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ИЗ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА, ПИРИТА И КВАРЦА МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОВЕТСКОЕ (*Енисейский кряж, Россия*) ПО ДАННЫМ БЕСПИРОЛИЗНОЙ ГАЗОВОЙ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

Т.А. Бульбак¹, А.А. Томиленко¹, Н.А. Гибшер¹, А.М. Сазонов², Е.О. Шапаренко¹,
М.А. Рябуха¹, М.О. Хоменко¹, С.А. Сильянов², Н.А. Некрасова²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Институт горного дела, геологии и геотехнологии Сибирского федерального университета, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия

Впервые приведены оригинальные результаты по составу флюидов, извлеченных из самородного золота и ассоциирующих с ним пирита и кварца, которые, несмотря на ограниченный объем аналитических данных, представляют научный и практический интерес. Выявленными геохимическими критериями можно руководствоваться при оценке залежей золотосодержащих руд и обосновании поисковых работ в регионе. Одноактное ударно-деструктивное извлечение летучих компонентов из флюидных включений и их беспиролизный хромато-масс-спектрометрический анализ позволили получить оригинальные результаты по составу флюидов в самородном золоте и в ассоциирующих с ним пирите и кварце. На основании этих данных впервые показано, что флюиды в самородном золоте, пирите и кварце представляют сложную многокомпонентную минералообразующую систему. В исследованных флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца, помимо воды и углекислоты, обнаружены представители не менее 11 гомологических рядов органических соединений. В их число вошли бескислородные алифатические и циклические углеводороды (парафины, олефины, циклические алканы и алкены, арены, полициклические ароматические углеводороды-ПАУ), кислородсодержащие углеводороды (спирты, эфиры, фураны, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты), азот-, серо-, галоген- и кремнийсодержащие соединения. Во флюидных включениях, извлеченных из самородного золота, доля углеводородов в сумме с S-N-Cl-F-Si-содержащими соединениями достигает 52.0 отн. %, тогда как в пирите — 10.1 отн. % и кварце — 18.0 отн. %. Газообразные флюиды, транспортирующие золото, обладали восстановительными свойствами. В пирите и кварце законсервирован окисленный водно-углекислотный флюид с пониженным содержанием углеводородов и азот-галогенсодержащих соединений.

Золото, флюиды, углеводороды, хромато-масс-спектрометрический анализ, месторождение Советское, Енисейский кряж

HYDROCARBONS IN FLUID INCLUSIONS FROM NATIVE GOLD, PYRITE, AND QUARTZ OF THE SOVETSKOE DEPOSIT (*Yenisei Ridge, Russia*) ACCORDING TO PYROLYSIS-FREE GAS CHROMATOGRAPHY–MASS SPECTROMETRY DATA

T.A. Bul'bak, A.A. Tomilenko, N.A. Gibsher, A.M. Sazonov, E.O. Shaparenko, M.A. Ryabukha,
M.O. Khomenko, S.A. Sil'yanov, and N.A. Nekrasova

The first results on the composition of fluids from native gold and associated pyrite and quartz have been obtained. Despite the small amount of analytical data, these results are of scientific and practical interest. The identified geochemical criteria can be used for the assessment of gold ore shoots and the substantiation of prospecting in the region. The one-act shock-destructive extraction of volatiles from fluid inclusions and their pyrolysis-free gas chromatography–mass spectrometry analysis made it possible to determine the composition of fluids in native gold and in associated pyrite and quartz. Based on these data, we have first shown that fluids in native gold, pyrite, and quartz are a mineral-forming multicomponent system. In addition to water and carbon dioxide, the studied fluid inclusions contain representatives of at least 11 homologous series of organic compounds, including oxygen-free aliphatic and cyclic hydrocarbons (paraffins, olefins, cyclic alkanes and alkenes, arenes, and polycyclic aromatic hydrocarbons), oxygenated hydrocarbons (alcohols, esters, furans, aldehydes, ketones, and carboxylic acids), and nitrogenated, sulfonated, halogenated, and siliconorganic compounds. The portion of hydrocarbons together with S–N–Cl–F–Si compounds reaches 52.0 rel. % in fluid inclusions from native gold, 10.1 rel. % in fluid inclusions from pyrite, and 18.0 rel. % in fluid inclusions from quartz. Gold-transporting gas fluids have reducing properties. Pyrite and quartz contain oxidized water–carbon dioxide fluids with low contents of hydrocarbons and nitrogen–halogenated compounds.

Gold, fluids, hydrocarbons, gas chromatography–mass spectrometry analysis, Yenisei Ridge, Sovetskoe deposit

ВВЕДЕНИЕ

В природе известно несколько десятков золотосодержащих минералов [Петровская 1973, 1993; Спиридонов, 2010] и целый ряд искусственно синтезированных золотоорганических соединений [Паддефет, 1982; Эльшенбройх, 2011; Ахмадуллина и др., 2012]. При всем многообразии золотосодержащих минералов промышленную ценность в месторождениях полезных ископаемых представляет самородное золото. В последнем находятся реликты рудообразующей среды в виде флюидных включений, по результатам изучения которых возможно реконструировать состав летучих, флюидный режим процессов генерации и возникновения его природных концентраций. Первые данные о флюидных включениях в самородном золоте были получены с помощью методов декрепитации и газовой хроматографии. Если проследить в хронологическом порядке появление публикаций по флюидным включениям в самородном золоте, то первой следует считать в начале прошлого столетия, когда С.Ф. Жемчужный [1922] наблюдал образование пузырей на полированной поверхности самородков золота при их прокаливании. Позже пузырьки вздутия на природных образцах самородного золота были описаны в ряде работ [Николаева, 1954; Гапон, 1962; Бабкин, Куклин, 1966; Петровская и др., 1971; Моисеенко, 1977; Неронский, Левицкий, 1988]. При нагревании золота из этих вздутый выделялся газ и такие пузырьки были названы газовыми включениями. По данным М.И. Новгородовой [1983], вакуоли в золоте распределены неравномерно, а их размер варьирует в широких пределах (от нескольких микрометров до 1.0—1.5 мм). Формы полостей вскрытых включений различны — сферические, полиэдрические (типа отрицательных кристаллов), угловатые или со сложноизвилистыми очертаниями при неровной, часто тонкоступенчатой скульптуре стенок. Давление газов в газовых включениях золотин из россыпей Ленского района, по оценке П.В. Бапкина и А.П. Куклина [1966], составляло 530—850 атм.

По данным метода декрепитации, интенсивное газовыделение из самородного золота происходило в интервале температур 180—570 °С [Моисеенко, 1977; Кокин, 1981; Неронский и др., 1982; Неронский, Левицкий, 1988; Остапенко и др., 1988; Остапенко, 1989; Эйриш и др., 2002]. При визуальном наблюдении за декрепитацией флюидных включений в золоте было установлено [Неронский и др., 1982; Левицкий и др., 1984], что наиболее высокие температуры декрепитации отмечены в центральной части крупных зерен золота по сравнению с краевой, что косвенно указывает на длительность процесса их кристаллизации в большом температурном диапазоне.

Наблюдения вскрытых вакуолей флюидных включений в самородном золоте показали, что около этих включений и на их стенках концентрируются твердые осадки [Петровская, 1973; Моисеенко, 1977; Семенко, 1986]. Твердые фазы были замечены П.В. Бапкиным и А.П. Куклиным [1966] лишь в одной из ста вскрытых ими полостей газовых включений в золотинках из ленских россыпей. На стенках этой полости наблюдались скопления мельчайших (0.3 мм) белых игольчатых кристалликов, содержащих, по данным спектрального анализа, фосфор. По всей вероятности, твердые фазы во вскрытых вакуолях находились ранее в растворенном состоянии, о чем свидетельствует разбрызгивание вещества на поверхности золотин в виде мельчайших налетов вокруг вскрытых включений. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа качественно установлено, что около вскрытых включений и на их стенках постоянно концентрируются Mg, Na, K, Ca, Cl, S и другие элементы [Моисеенко, 1977]. Сернистые соединения Ca и Mg обнаружены в центральных частях дендритоидов золота из месторождений Дальнего Востока [Петровская и др., 1975]. Авторы предположили, что сернистые соединения представляют собой осадки, выброшенные при вскрытии вакуолей.

Газовая составляющая флюидных включений в самородном золоте, по данным газовой хроматографии, представлена H₂O, CO₂, CH₄ и N₂ [Моисеенко, 1977; Томиленко, Гибшер, 2001; Tomilenko et al., 2010]. При анализе летучих компонентов флюидные включения вскрывались либо механическим способом, либо пиролизным — путем нагрева образца до температуры декрепитации. Каждый из этих методов вскрытия обладает своими достоинствами и недостатками, которые подробно проанализировала О.Ф. Миронова [2010]. Поэтому вопрос, каким методом лучше вскрывать флюидные включения, по мнению О.Ф. Мироновой, не имеет однозначного ответа.

Ранее о составе флюидов, законсервированных в золоте, в основном судили по косвенным признакам, на основании которых пришли к выводу, что золото транспортировалось «сухими газоконденсатными восстановленными флюидами, предположительно водород-углеводородного состава» [Николаева, 1954; Рябчиков, Новгородова, 1981; Новгородова, 1983].

Сложность и трудность исследования флюидов в самородном золоте заключалась в отсутствии специальных методик и высокочувствительных приборов, что обусловило относительно медленное развитие работ в этом направлении и ограниченное количество публикаций по данному вопросу. В примененном нами методе объединены одноактный ударно-деструктивный способ извлечения летучих компонентов из флюидных включений в самородном золоте, пирите, кварце и их беспирилизный хромато-масс-спектрометрический анализ (GC-MS). Не задаваясь целью рассмотрения химического состава самородного золота месторождения Советское в Енисейской золоторудной провинции, детально

разобранного Н.В. Петровской [1973, 1993], остановимся только на флюидах в самородном золоте и ассоциирующих с ним пирите и кварце. Основная цель работы — определение состава флюида, законсервированного в виде флюидных включений в самородном золоте, кварце и пирите.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав флюидных включений в самородном золоте и его главных носителях — пирите и кварце исследован в образцах Советского кварц-золоторудного месторождения, находящегося в северной части Восточного золотоносного пояса Енисейского кряжа. Геолого-структурное строение Советского месторождения достаточно хорошо изучено и освещено в большом числе публикаций. Район месторождения сложен углисто-глинистыми, кварц-хлорит-серицитовыми и кварц-мусковит-биотитовыми сланцами верхнего протерозоя [Богданович, 1962, 1964]. Месторождение приурочено к тектонической зоне смятия и расположено на северо-восточном крыле крупной синклинали складки, осложненной многочисленными мелкими смятиями и тектоническими нарушениями типа взбросов и взбрососдвигов [Богданович, 1962, 1964; Симкин, 1997]. Рудоносная зона месторождения представляет собой мощную (более 1000 м) полосу пород, интенсивно расланцованных и разбитых многочисленными разрывами. Характерной особенностью месторождения является то, что оруденение проявляется не в виде обособленных более или менее выдержанных жил, а образует серии сближенных, сливающихся и вновь ветвящихся жил, прожилков и сложных залежей, концентрирующихся в относительно выдержанные жильные зоны. В пределах месторождения выделена серия кварцево-жильных зон различной золотоносности. Мощность жильных зон непостоянна и изменяется от первых метров до 100 м и более. Месторождение относится к малосульфидному золотокварцевому типу. Кварц слагает до 97 % и более жильной массы рудных тел. Кроме кварца из нерудных минералов в ощутимых количествах здесь присутствуют кальцит, альбит, серицит и хлорит. Из рудных минералов обнаружены пирротин, пирит, арсенопирит, золото, сфалерит, халькопирит и галенит [Петровская, 1956].

Образцы отобраны из золотоносной кварцевой жилы (рудное тело № 3, горизонт 390, квершлаг 86) с видимым золотом в ассоциации с агрегатами пирита. Пробы дробили, рассеивали на ситах и под бинокулярной лупой извлекали чистые золотины, зерна пирита и кварца. При подготовке проб к анализу не использовали кислоты, растворители и органические вещества, которые могли бы внести искажения в первоначальный состав флюида, что подробно рассмотрено в работе О.Ф. Мироновой [2010].

Исследуемые пробы объемом до 0.06 см³ помещали пинцетом в лодочку в специальное устройство (рис. 1, узел 4), включенное онлайн в газовую схему хроматографа перед аналитической колонкой. Образцы перед анализом прогревали при 130—160 °С в течение 133 мин в токе газа-носителя гелия при давлении 45 кПа. Чистота гелия составляла 99.9999 %. Анализ газовой смеси, извлеченной при однократном ударном разрушении образца, выполнен на газовом хромато-масс-спектрометре Focus GC/DSQ II MS (Thermo Scientific, USA). Все газовые тракты хроматографа, по которым перемещалась газовая смесь, в том числе инжектор и кран, узел 4 и капилляры, имели сульфидостойкое покрытие. Разделение пробы на компоненты осуществлялось в газовом хроматографе на неполярной капиллярной аналитиче-

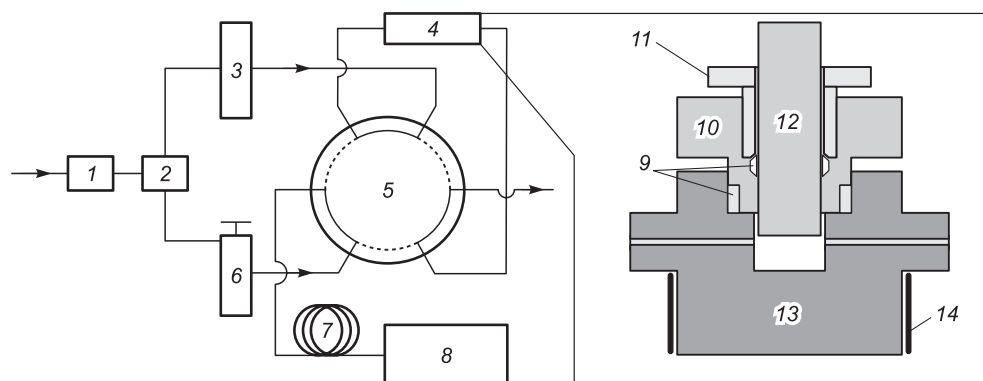


Рис. 1. Принципиальная пневматическая схема с основными узлами использованного газового хромато-масс-спектрометра:

1 — фильтр, 2 — тройник, 3 — регулятор расхода газа, 4 — ячейка для разрушения образца, 5 — шестипортовый двухходовой кран, 6 — SSL-инжектор, 7 — аналитическая колонка, 8 — масс-селективный детектор, на вставке упрощенная разрез-схема узла 4: 9 — фторопластовые уплотнения, 10 — упорная гайка, 11 — нажимная гайка, 12 — ударопрочный шток, 13 — корпус с углублением для образца и сквозным газовым трактом, 14 — нагреватель печи.

ской колонке Rt-Q-BOND (Restek, USA; неподвижная фаза — 100 %-й дивинилбензол, длина 30 м, внутренний диаметр 0.32 мм, толщина неподвижной фазы 10 мкм) при следующих условиях: смесь без деления и без концентрирования, включая криофокусировку, вводилась через шестипортовый двухпозиционный термостатируемый (270 °C) кран (Valco, USA) в аналитическую колонку, скорость постоянного потока He с вакуумной компенсацией составляла 1.7 мл·мин⁻¹, температура GC-MS соединительной линии — 300 °C; колонка выдерживалась 2 мин при температуре 70 °C, затем нагревалась со скоростью 25 °C·мин⁻¹ до температуры 150 °C, а далее нагревалась со скоростью 5 °C·мин⁻¹ до 290 °C и удерживалась при этой температуре 100 мин. Масс-спектры ионизации электронным ударом по полному ионному току были получены на квадрупольном масс-селективном детекторе в режиме Full Scan. Масс-спектральные условия: энергия электронов 70 эВ, ток эмиссии 100 мкА, температура в источнике ионов 200 °C, напряжение усилителя 1350 В, полярность регистрируемых ионов положительная, диапазон сканирования масс 5—500 а.е.м., скорость сканирования 1 скан/с. Старт анализа синхронизировался с моментом разрушения образца.

В этом аналитическом методе образцы не подвергались пиролизу, а только прогревались для десорбции поверхности и перевода воды, возможно, содержащейся в образце, в газовую фазу. Поэтому анализировалась газовая смесь почти *in situ*, а не пиролизат, содержащий более окисленные соединения (H₂O, CO, CO₂ и т.д.), вследствие протекания реакций между компонентами газовой смеси, газовой смесью и поверхностью накопителя, соединениями в газовой фазе и образцом. Перед «рабочим» анализом и после него проводились холостые онлайн-анализы. Предшествующий анализ позволял контролировать выделение сорбированных поверхностью образца газов, в том числе и атмосферных компонентов, а по окончании этого процесса записывать бланк системы. По результатам последующего анализа определялась степень и полнота элюирования тяжелых углеводородов и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) с аналитической колонки при программировании температуры в термостате хроматографа. При необходимости аналитическая колонка термokonдиционировалась до достижения необходимого бланка.

Использованный для определения состава газовой фазы в самородном золоте, пирите и кварце GC-MS анализ объединяет достоинства двух независимых количественных аналитических методов идентификации индивидуальных соединений в газовой смеси. Хроматография посредством разделения газовой смеси на компоненты позволила для каждого из них определить специфичные времена удержания аналитической колонкой. Площадь пика в хроматограмме пропорциональна концентрации соответствующего вещества в газовой смеси. Масс-спектрометрия предоставила набор масс-спектров для каждого соединения и информацию о его ионных и диагностических фрагментах. Идентификация каждого соединения выполнена путем интеграции обоих методов. Интерпретация полученных GC-MS данных с идентификацией пиков и выделением из перекрывающихся пиков отдельных компонентов проводилась как с использованием программного обеспечения AMDIS (Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System) версии 2.73, так и в ручном режиме с коррекцией фона по библиотекам масс-спектров NIST 2017 и Wiley 11 с помощью программы NIST MS Search версии 2.3, параметры поиска стандартные. Относительные концентрации (отн. %) летучих компонентов в разделяемой смеси устанавливались методом нормировки: сумма площадей всех хроматографических пиков анализируемой смеси приравнивалась к 100 %, а по величине площади отдельного компонента определялось его процентное содержание в анализируемой смеси. Площади пиков в хроматограмме вычислялись по алгоритму ICIS с применением Qual Browser 1.4 SR1 из пакета программ Xcalibur. Предлагаемая методика пригодна для обнаружения следовых содержаний индивидуальных летучих компонентов уже от десятков фемтограмм. Метод беспиrolизной газовой хромато-масс-спектрометрии, использованный для определения газовой составляющей флюидных включений в минералах, детально изложен в работах [Жимулев и др., 2015; Tomilenko et al., 2015, 2019; Sokol et al., 2017].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методом беспиrolизной газовой хромато-масс-спектрометрии в составе летучих, извлеченных из флюидных включений в самородном золоте, пирите и кварце, определены H₂O, CO₂, широкий спектр углеводородов и S-N-F-Cl-Si-содержащих соединений. Полученные результаты изображены графически на хроматограммах (рис. 2—4), приведены в табл. 1—3, обобщены в табл. 4 и представлены на рис. 5, 6. В общем списке обнаруженных соединений присутствуют от 143 до 211 компонентов (см. табл. 4). Доля углеводородов с S-N-F-Cl-Si-содержащими соединениями достигает 52.0 отн. % в самородном золоте, 10.1 отн. % в пирите и 18.0 отн. % в кварце. Содержание CO₂ во флюидных включениях в золоте, пирите и кварце составляет 47.7, 53.8 и 37.3 отн. % соответственно (см. рис. 5, 6). Содержание воды определено значительно меньше во флюидных включениях из самородного золота (0.26 отн. %, см. табл. 4), что в 138 раз меньше, чем из пирита и в 172 раза меньше, чем из кварца. Во флюидах, из-

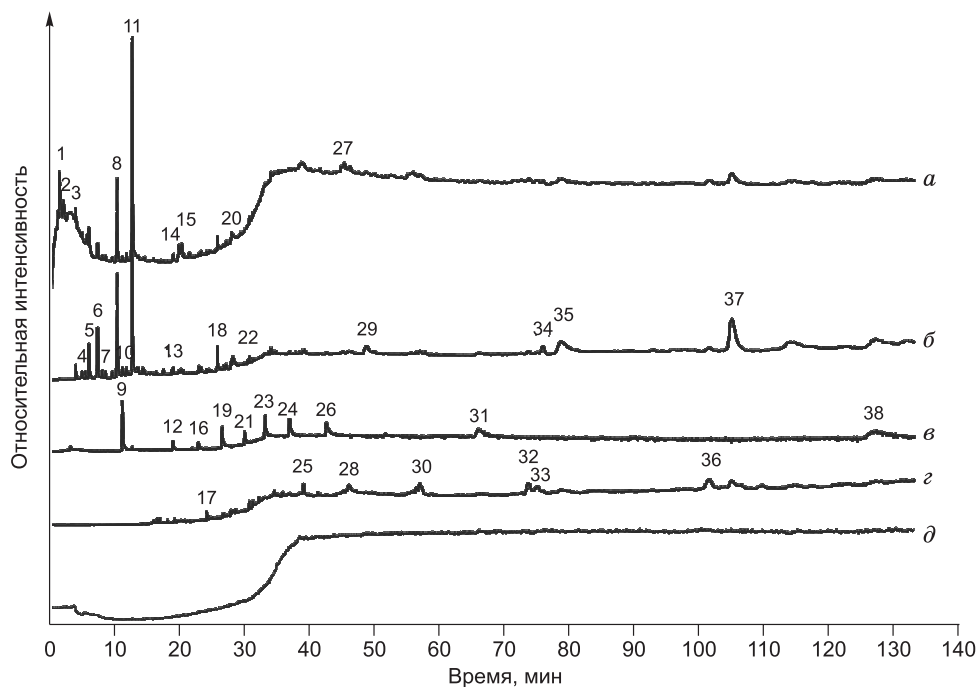


Рис. 2. Результаты GC-MS анализа летучих компонентов, извлеченных из флюидных включений в золоте золотоносной кварцевой жилы Советского месторождения, Енисейский край.

a — хроматограмма по полному ионному току (TIC) и реконструированные ионные хроматограммы по току ионов: *б* — *m/z* (43+57+71+85); *в* — *m/z* 60; *г* — *m/z* (97+98); *д* — бланк. 1 — диоксид углерода (CO₂); 2 — этан (C₂H₆); 3 — пропан (C₃H₈); 4 — изобутан (C₄H₁₀); 5 — бутан (C₄H₁₀); 6 — 2-пропанол (C₃H₈O); 7 — пентан (C₅H₁₂); 8 — бутаналь (C₄H₈O); 9 — уксусная кислота (C₂H₄O₂); 10 — 1-пентен, 4-метил- (C₆H₁₂); 11 — 1-бутанол (C₄H₁₀O); 12 — бутановая кислота (C₄H₈O₂); 13 — гексаналь (C₆H₁₂O); 14 — гептан, 3-метил- (C₈H₁₆); 15 — 3-гептен, 4-метил- (C₈H₁₆); 16 — пентановая кислота (C₅H₁₀O₂); 17 — 1-нонен (C₉H₁₈); 18 — гексаналь, 2-этил- (C₈H₁₆O); 19 — гексановая кислота (C₆H₁₂O₂); 20 — 1-гексанол, 2-этил- (C₈H₁₈O); 21 — гептановая кислота (C₇H₁₄O₂); 22 — нонаналь (C₉H₁₈O); 23 — октановая кислота (C₈H₁₆O₂); 24 — нонановая кислота (C₉H₁₈O₂); 25 — тиофен, 2-гексил- (C₁₀H₁₆S); 26 — декановая кислота (C₁₀H₂₀O₂); 27 — 1,13-тетрадекадиен (C₁₄H₂₆); 28 — *n*-тетрадекан (C₁₄H₃₀); 29 — тетрадекан, 3-метил- (C₁₅H₃₂); 30 — 1-ундекантиол (C₁₁H₂₄S); 31 — додекановая кислота (C₁₂H₂₄O₂); 32 — тетрадеканаль (C₁₄H₂₈O); 33 — 1-гексадецен (C₁₆H₃₂); 34 — гексадекан (C₁₆H₃₄); 35 — гексадекан, 3-метил- (C₁₇H₃₆); 36 — 1-гептадецен (C₁₇H₃₄); 37 — гептадекан (C₁₇H₃₆); 38 — тетрадекановая кислота (C₁₄H₂₈O₂).

влеченных из включений в самородном золоте, пирите и кварце, помимо воды и углекислоты, впервые обнаружены представители не менее 11 гомологических рядов органических соединений, в том числе бескислородные алифатические и циклические углеводороды (парафины, олефины, циклические алканы и алкены, арены, полициклические ароматические углеводороды — ПАУ), кислородсодержащие углеводороды (спирты и эфиры, фураны, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты), азот-, серо-, галоген- и кремнийсодержащие соединения (см. табл. 1—3; рис. 6, *a*—*г*). Среди азотсодержащих соединений, доля которых колеблется от 0.39 до 10.5 отн. % (см. табл. 1—3), преобладает молекулярный азот (N₂). Серосодержащие соединения также постоянно присутствуют в составе флюидов из самородного золота, пирита и кварца, их доля составляет 1—2 отн. %, отмечено повышенное содержание SO₂ (см. табл. 1—3). Доля галогенсодержащих (F, Cl, Br) соединений во флюидных включениях из золота составляет 0.14 отн. % и на порядок меньше — из пирита и кварца (см. табл. 1—3). Кремнийорганические соединения определены только во флюидах из золота и пирита, а из кварца они не зафиксированы. В группе парафинов, обнаруженных в составе флюидов, средние (C₅—C₁₂) углеводороды преобладают над легкими (C₁—C₄) (см. рис. 6, *б*). На это указывает величина отношения $\Sigma(C_5-C_{12})/\Sigma(C_1-C_4)$, которая в золоте составляет 240.25, в пирите — 0.40, в кварце — 1.32 (см. табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В литературе обсуждаются несколько моделей формирования Советского месторождения [Буряк, 1982; Ли, 1997; Tomilenko et al., 2010; Кряжев, 2017]. В результате анализа и обобщения изотопно-геохимических и термобарогеохимических данных А.А. Томиленко с соавторами [Томиленко и др., 2001,

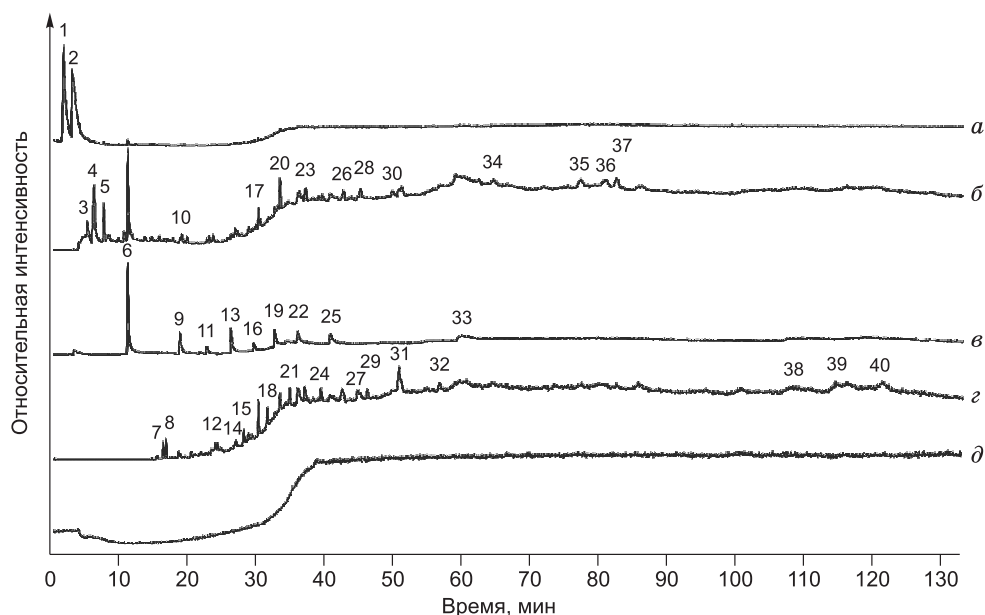


Рис. 3. Результаты GC-MS анализа летучих компонентов, извлеченных из флюидных включений в кварце золотоносной кварцевой жилы Советского месторождения, Енисейский край.

a — хроматограмма по полному ионному току (ПИС) и реконструированные ионные хроматограммы по току ионов: *б* — *m/z* (43+57+71+85); *в* — *m/z* 60; *г* — *m/z* (97+98); *д* — бланк. 1 — диоксид углерода (CO_2); 2 — вода (H_2O); 3 — ацетальдегид ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$); 4 — пропан, 2-метил- (C_4H_{10}); 5 — 2-пропанон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$); 6 — уксусная кислота ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$); 7 — тиофен, 2-метил- ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$); 8 — тиофен, 3-метил- ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$); 9 — бутановая кислота ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$); 10 — гексаналь ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$); 11 — пентановая кислота ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$); 12 — тиофен, 2-пропил- ($\text{C}_7\text{H}_{10}\text{S}$); 13 — гексановая кислота ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$); 14 — тиофен, 2-(1,1-диметилэтил)- ($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{S}$); 15 — тиофен, 2-бутил- ($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{S}$); 16 — гептановая кислота ($\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$); 17 — нонаналь ($\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$); 18 — тиофен, 2-пентил- ($\text{C}_9\text{H}_{14}\text{S}$); 19 — октановая кислота ($\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$); 20 — деканаль ($\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$); 21 — тиофен, 2-гексил- ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{S}$); 22 — нонановая кислота ($\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_2$); 23 — тридекан ($\text{C}_{13}\text{H}_{28}$); 24 — тиофен, 3-гептил- ($\text{C}_{11}\text{H}_{18}\text{S}$); 25 — декановая кислота ($\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$); 26 — додеканаль ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}$); 27 — 1-тетрадецен ($\text{C}_{14}\text{H}_{28}$); 28 — тетрадекан ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$); 29 — тиофен, 2-октил- ($\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{S}$); 30 — 2-тридеканон ($\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}$); 31 — 1-пентадецен ($\text{C}_{15}\text{H}_{30}$); 32 — тиофен, 2-нонил- ($\text{C}_{13}\text{H}_{22}\text{S}$); 33 — додекановая кислота ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$); 34 — тетрадеканаль ($\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}$); 35 — 2-пентадеканон ($\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}$); 36 — пентадеканаль ($\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}$); 37 — гептадекан ($\text{C}_{17}\text{H}_{36}$); 38 — резорцинол, 5-пентил- ($\text{C}_{11}\text{H}_{16}\text{O}_2$); 39 — резорцинол, 2-гексил- ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_2$); 40 — резорцинол, 4-гексил- ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_2$).

2006, 2008; Tomilenko et al., 2010] пришли к выводу, что формирование золотого оруденения Советского месторождения (830—820 и 730 млн лет) было оторвано от регионального метаморфизма (890—850 млн лет) и совпало по времени с тектономагматической активизацией северной части Енисейского края (850 до 720 млн лет) [Верниковский, Верниковская, 2006]. Рудоносные зоны сформированы в широком температурном интервале при участии гомогенных и гетерофазных коровых гидротермальных растворов, активную роль в которых играли восстановленные флюиды, активизированные в глубинных зонах верхнепротерозойской углеродисто-терригенной толщи [Томиленко и др., 2001; Tomilenko et al., 2010; Кряжев, 2017].

На основании полученных данных показано, что флюиды, извлеченные из самородного золота, пирита и кварца представляют собой сложную многокомпонентную минералообразующую систему (см. табл. 1—3). В составе флюидов обнаружено от 143 до 211 соединений (см. табл. 4). Во флюидах определены разнообразные углеводороды, S-N-F-Cl-Br-Si-содержащие соединения, углекислота и вода (табл. 1—3; рис. 5, 6). Низкое содержание воды (0.3 отн. %), определенное во флюидных включениях из самородного золота (см. табл. 1), подтверждает ранее высказанное предположение о том, что золото транспортировалось «сухими газоконденсатными восстановленными флюидами» [Николаева, 1954; Петровская, 1973, 1993; Рябчиков, Новгородова, 1981; Новгородова, 1983; Буслаева, Новгородова, 1989]. Ограниченное количество воды во флюиде является необходимым условием для возникновения восстановительной обстановки в минералообразующей среде [Ярошевский, 2006]. Важнейшим параметром окислительно-восстановительных условий образования золоторудных месторождений является отношение CO_2 /углеводороды, его низкое значение является свидетельством восстановительных условий минералообразующей среды [Robert, Kelly, 1987; Бортников и др., 1996; Jia, Kerrich, 2000; Ronde et al., 2000; Эйриш и др., 2002; Кряжев, 2002; Сафонов, Прокофьев, 2006;]. Для флюидов из самородного золо-

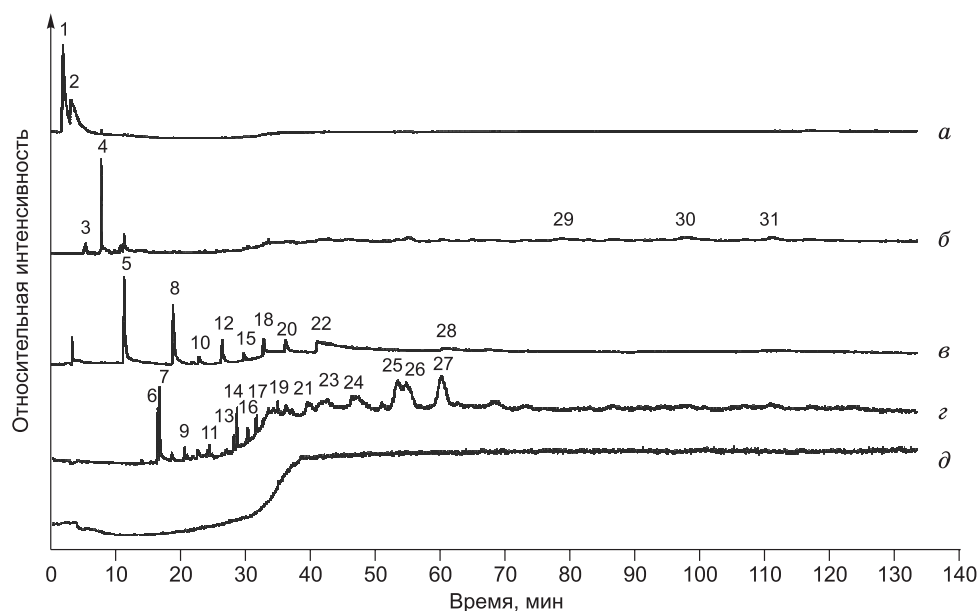


Рис. 4. Результаты GC-MS анализа летучих компонентов, извлеченных из флюидных включений в пирите золотоносной кварцевой жилы Советского месторождения, Енисейский край.

a — хроматограмма по полному ионному току (ПИС) и реконструированные ионные хроматограммы по току ионов: *б* — m/z (43+57+71+85); *в* — m/z 60; *г* — m/z (97+98); *д* — бланк. 1 — диоксид углерода (CO_2); 2 — вода (H_2O); 3 — ацетальдегид ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$); 4 — 2-пропанон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$); 5 — муравьиная кислота (CH_2O_2); 6 — тиофен, 2-метил- ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$); 7 — тиофен, 3-метил- ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$); 8 — бутановая кислота ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$); 9 — тиофен, 2-этил- ($\text{C}_6\text{H}_8\text{S}$); 10 — пентановая кислота ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$); 11 — тиофен, 2-пропил- ($\text{C}_7\text{H}_{10}\text{S}$); 12 — гексановая кислота ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$); 13 — тиофен, 2-бутил- ($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{S}$); 14 — бензол, бутил- ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}$); 15 — гептановая кислота ($\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$); 16 — ундекан ($\text{C}_{11}\text{H}_{24}$); 17 — тиофен, 2-пентил- ($\text{C}_9\text{H}_{14}\text{S}$); 18 — октановая кислота ($\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$); 19 — тиофен, 2-гексил- ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{S}$); 20 — нонановая кислота ($\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_2$); 21 — тиофен, 3-гептил- ($\text{C}_{11}\text{H}_{18}\text{S}$); 22 — декановая кислота ($\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$); 23 — додеканаль ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}$); 24 — тиофен, 2-октил- ($\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{S}$); 25 — бензойная кислота, гексил-эфир ($\text{C}_{13}\text{H}_{18}\text{O}_2$); 26 — тетрадекан, 2,6,10-триметил- ($\text{C}_{17}\text{H}_{36}$); 27 — бензойная кислота, гепт-3-ил-эфир ($\text{C}_{14}\text{H}_{20}\text{O}_2$); 28 — додекановая кислота ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$); 29 — 2-пентадеканон ($\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}$); 30 — гептадекан, 8-метил ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$); 31 — гептадекан, 4-метил ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$).

та Советского месторождения значение отношения CO_2 /углеводороды составляет 1.2, в пирите — 5.2 и кварце — 2.1 (см. табл. 4), что отражает более восстановленный флюид в золоте, чем в пирите и кварце.

Роль восстановленных флюидов в образовании золоторудных месторождений сложна и во многом еще остается дискуссионной. Тем не менее выявленные факты должны учитываться при дальнейших исследованиях на золоторудных месторождениях, так как они имеют прямое отношение к решению генетических и прогнозно-металлогенетических задач. Перенос золота осуществлялся в виде элементоорганических соединений (ЭОС) [Слободской, 1981; Новгородова, 1983; Буслаева, Новгородова, 1989]. Вместе с тем элементоорганические соединения в рудном процессе крайне неустойчивы, что приводит к их распаду [Mathez et al., 1984; Schoell, 1988; Буслаева, Новгородова, 1989, 1992; Schwander et al., 2013]. По нашему мнению, при разрушении ЭОС кристаллизуется золото, а его транспортеры-углеводороды частично консервируются во флюидных включениях. Золото входит в состав целого ряда органических соединений, в которых золото со степенью окисления Au^{I} и Au^{III} образует сложные комплексы, содержащие в своем составе такие элементы, как С, О, Н, S, N, Cl, F [Падефет, 1982; Эльшенбройх, 2011; Ахмадуллина и др., 2012]. В составе флюидов, законсервированных в изученном самородном золоте, обнаружены соединения с такими элементами (см. табл. 1—3). Анализ литературы, приведенной в работах [Новгородова, 1983; Буслаева, Новгородова, 1989], показал, что в восстановительных условиях для Au наиболее вероятной формой миграции являются карбонилгалогениды, для Si — тетраалкилсиланы, алкиды, алкилсиланы, алкилгалогенсиланы, для Sb и As — алкильные соединения и алкалгалогениды. Восстановленные флюиды способны аккумулировать и переносить значительные количества самородных элементов, в том числе и золото [Gizé, Macdonald, 1993]. На основе проведенных экспериментов было показано, что золото переносится углеводородами, т. е. последние выступают в роли рудного флюида [Williams-Jones et al., 2009; Migdisov et al., 2017].

Обнаруженные соединения во флюидах самородного золота играют свою важную роль в переносе рудного вещества. Рассмотрим только некоторые из них. CO_2 постоянно присутствует во флюидах (см.

Таблица 1. Результаты GC-MS анализа газофазных продуктов, извлеченных при ударном разрушении самородного золота, месторождение Советское, Енисейский край

Брутто-формула (система Хилла)	Название	CAS/ (NIST)	MW	Золото	
				RT, мин	A, %
1	2	3	4	5	6
Алифатические углеводороды					
<i>Парафины</i>					
C ₄ H ₁₀	н-Бутан	106-97-8	58	6.454	0.004
C ₆ H ₁₄	н-Гексан	110-54-3	86	12.404	0.038
C ₇ H ₁₆	н-Гептан	142-82-5	100	16.594	0.058
C ₈ H ₁₆	3-Метиленгептан	1632-16-2	112	20.106	0.405
C ₈ H ₁₈	н-Октан	111-65-9	114	20.778	0.241
C ₉ H ₂₀	н-Нонан	111-84-2	128	24.722	0.067
C ₁₁ H ₂₄	н-Ундекан	1120-21-4	156	31.722	0.044
C ₁₂ H ₂₆	н-Додекан	112-40-3	170	35.015	0.108
C ₁₃ H ₂₈	н-Тридекан	629-50-5	184	39.554	0.043
C ₁₄ H ₃₀	н-Тетрадекан	629-59-4	198	46.778	0.023
C ₁₅ H ₃₂	н-Пентадекан	629-62-9	212	58.627	0.039
C ₁₇ H ₃₆	н-Гептадекан	629-78-7	240	104.710	0.754
<i>Олефины</i>					
C ₃ H ₆	1-Пропен	115-07-1	42	4.070	0.002
C ₄ H ₈	2-Метил-1-пропен	115-11-7	56	6.022	0.009
C ₄ H ₈	(Е)-2-Бутен	624-64-6	56	6.251	0.002
C ₄ H ₈	2-Бутен	107-01-7	56	6.369	0.002
C ₆ H ₁₂	1-Гексен	592-41-6	84	12.057	0.064
C ₇ H ₁₄	(Е)-4-Метил-2-гексен	3683-22-5	98	15.847	0.048
C ₇ H ₁₄	2-Метил-1-гексен	6094-02-6	98	16.178	0.101
C ₇ H ₁₄	1-Гептен	592-76-7	98	16.452	0.070
C ₈ H ₁₆	1-Октен	111-66-0	112	20.418	0.161
C ₈ H ₁₆	3,4-Диметил-3-гексен	30951-95-2	112	19.946	0.180
C ₈ H ₁₆	4-Метил-3-гептен	4485-16-9	112	20.275	0.242
C ₈ H ₁₆	(Z)-3-Октен	14850-22-7	112	20.505	0.280
C ₈ H ₁₆	(Z)-2-Октен	7642-04-8	112	20.631	0.091
C ₉ H ₁₈	1-Нонен	124-11-8	126	24.409	0.093
C ₁₀ H ₂₀	1-Децен	872-05-9	140	28.086	0.070
C ₁₁ H ₂₂	1-Ундецен	821-95-4	154	31.491	0.072
C ₁₂ H ₂₄	1-Додецен	112-41-4	168	34.759	0.154
C ₁₃ H ₂₆	1-Тридецен	2437-56-1	182	39.200	0.191
C ₁₄ H ₂₈	1-Тетрадецен	1120-36-1	196	46.051	0.142
C ₁₅ H ₃₀	1-Пентадецен	13360-61-7	210	57.723	0.077
Циклические углеводороды					
<i>Циклические алканы и алкены</i>					
C ₆ H ₁₀	3,3-Диметил-циклобутен	16327-38-1	82	13.132	0.114
C ₁₀ H ₁₆	α-Пинен	80-56-8	136	26.143	0.081
<i>Арены</i>					
C ₆ H ₆	Бензол	71-43-2	78	12.768	0.133
C ₇ H ₈	Толуол	108-88-3	92	17.366	0.071
C ₈ H ₉ F	p-Фторэтилбензол	459-47-2	124	21.234	0.095
C ₈ H ₁₀	Этилбензол	100-41-4	106	21.703	0.096
C ₈ H ₁₀	p-Ксилол	106-42-3	106	21.768	0.155
C ₈ H ₁₀	o-Ксилол	95-47-6	106	22.037	0.160

1	2	3	4	5	6
C ₈ H ₁₀	Стирол	100-42-5	104	22.370	0.168
C ₈ H ₈	<i>m</i> -Ксилол	108-38-3	106	22.184	0.106
C ₁₀ H ₁₂	1-Метил-4-(1-метилэтенил)-бензол	1195-32-0	132	29.211	0.056
C ₁₁ H ₁₆	Пентилбензол	538-68-1	148	32.642	0.021
C ₁₂ H ₁₈	Гексилбензол	1077-16-3	162	36.345	0.057
C ₁₃ H ₂₀	Гептилбензол	1078-71-3	176	41.678	0.242
Гетероциклические углеводороды					
<i>Фураны</i>					
C ₅ H ₆ O	2-Метилфуран	534-22-5	82	14.362	0.002
C ₆ H ₈ O	2-Этилфуран	3208-16-0	96	16.422	0.003
C ₇ H ₁₀ O	2-Пропилфуран	4229-91-8	110	18.481	0.003
C ₈ H ₁₂ O	2-Бутилфуран	4466-24-4	124	22.769	0.012
C ₉ H ₁₄ O	2-Пентилфуран	3777-69-3	138	26.645	0.029
C ₁₁ H ₁₈ O	2-Гептилфуран	3777-71-7	166	33.567	0.013
C ₁₂ H ₂₀ O	2-Октилфуран	4179-38-8	180	37.742	0.006
C ₁₃ H ₂₂ O	2-Нонилфуран	х	194	43.575	0.016
Кислородсодержащие углеводороды					
<i>Спирты и эфиры</i>					
C ₂ H ₆ O	Этанол	64-17-5	46	6.467	0.007
C ₄ H ₁₀ O	1-Бутанол	71-36-3	74	13.059	0.039
C ₆ H ₆ O	Фенол	108-95-2	94	24.896	0.263
C ₇ H ₈ O	Бензолметанол	100-51-6	108	26.483	0.008
C ₈ H ₁₈ O	2-Этил-1-гексанол	104-76-7	130	28.509	0.796
C ₄ H ₆ O ₃	Ацетилэфир	108-24-7	102	7.988	0.130
C ₅ H ₈ O ₂	Метилметакрилат	80-62-6	100	14.701	0.137
C ₅ H ₈ O	3,4-Дигидро-2Н-пиран	110-87-2	84	16.941	0.061
C ₄ H ₆ O ₂	Бутиролактон	96-48-0	86	20.761	0.004
C ₇ H ₁₄ O ₂	Метилэфир 4-метилпентановой кислоты	2412-80-8	130	23.758	0.041
C ₇ H ₁₂ O ₂	γ-Гепталактон	105-21-5	128	34.781	0.016
C ₈ H ₁₄ O ₂	γ-Окталактон	104-50-7	142	39.562	0.018
C ₁₃ H ₂₈ O	1-Метоксидодекан	3482-63-1	200	47.741	1.182
C ₁₂ H ₁₄ O ₄	Диэтилфталат	84-66-2	222	63.281	16.700
C ₁₄ H ₁₈ O ₄	Дипропилфталат	131-16-8	250	122.295	0.197
<i>Альдегиды</i>					
C ₂ H ₄ O	Ацетальдегид	75-07-0	44	5.201	0.051
C ₄ H ₆ O	2-Метил-2-пропеналь	78-85-3	70	9.635	0.130
C ₄ H ₈ O	Бутаналь	123-72-8	72	10.633	0.145
C ₅ H ₁₀ O	3-Метилбутаналь	590-86-3	86	13.787	0.070
C ₅ H ₁₀ O	Пентаналь	110-62-3	86	14.856	0.187
C ₅ H ₈ O	2-Метил-2-бутеналь	1115-11-3	84	17.211	0.006
C ₅ H ₄ O ₂	Фурфурол	98-01-1	96	17.478	0.039
C ₅ H ₄ O ₂	3-Фурфурол	498-60-2	96	18.344	0.184
C ₆ H ₁₂ O	Гексаналь	66-25-1	100	19.290	0.520
C ₇ H ₁₄ O	Гептаналь	111-71-7	114	23.514	0.437
C ₇ H ₆ O	Бензальдегид	100-52-7	106	24.257	0.073
C ₈ H ₁₆ O	Октаналь	124-13-0	128	27.389	0.445
C ₉ H ₁₈ O	Нонаналь	124-19-6	142	30.946	0.922
C ₁₀ H ₂₀ O	Деканаль	112-31-2	156	34.283	0.955
C ₁₁ H ₂₂ O	Ундеканаль	112-44-7	170	38.625	0.213

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
C ₁₂ H ₂₄ O	Додеканаль	112-54-9	184	45.249	0.747
C ₁₃ H ₂₆ O	Тридеканаль	10486-19-8	198	56.869	0.987
C ₁₅ H ₃₀ O	Пентадеканаль	2765-11-9	226	99.836	0.318
<i>Кетоны</i>					
C ₃ H ₆ O	Ацетон	67-64-1	58	7.615	0.161
C ₄ H ₆ O	2-Бутенон	78-94-4	70	10.291	0.021
C ₄ H ₈ O	2-Бутанон	78-93-3	72	10.552	0.080
C ₅ H ₁₀ O	2-Пентанон	107-87-9	86	14.607	0.039
C ₆ H ₁₂ O	2-Гексанон	591-78-6	100	19.014	0.016
C ₅ H ₄ O ₃	Дигидро-3-метилен-2,5-фурандион	2170-03-8	112	22.869	0.130
C ₇ H ₁₄ O	2-Гептанон	110-43-0	114	23.187	0.084
C ₈ H ₁₆ O	6-Метил-2-гептанон	928-68-7	128	26.061	0.191
C ₈ H ₁₄ O	6-Метил-5-гептен-2-он	110-93-0	126	26.322	0.207
C ₈ H ₁₄ O	2-Метил-1-гептен-6-он	10408-15-8	126	26.497	0.109
C ₈ H ₁₆ O	2-Октанон	111-13-7	128	27.076	0.083
C ₉ H ₁₈ O	2-Нонанон	821-55-6	142	30.632	0.076
C ₁₀ H ₂₀ O	2-Деканон	693-54-9	156	33.924	0.134
C ₈ H ₄ O ₃	Фталиевый ангидрид	85-44-9	148	35.877	0.825
C ₁₁ H ₂₂ O	2-Ундеканон	112-12-9	170	38.056	0.269
C ₁₂ H ₂₄ O	2-Додеканон	6175-49-1	184	44.300	0.056
C ₁₃ H ₂₆ O	2-Тридеканон	593-08-8	198	55.771	0.713
C ₁₅ H ₃₀ O	2-Пентадеканон	2345-28-0	226	95.719	0.270
<i>Карбоновые кислоты</i>					
C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная кислота	64-19-7	60	11.371	1.026
C ₃ H ₆ O ₂	Пропановая кислота	79-09-4	74	15.290	0.010
C ₄ H ₈ O ₂	Бутановая кислота	107-92-6	88	19.126	0.097
C ₅ H ₁₀ O ₂	3-Метилбутановая кислота	503-74-2	102	22.150	0.013
C ₅ H ₁₀ O ₂	Пентановая кислота	109-52-4	102	23.104	0.126
C ₆ H ₁₂ O ₂	Гексановая кислота	142-62-1	116	26.749	0.264
C ₇ H ₁₄ O ₂	Гептановая кислота	111-14-8	130	30.206	0.347
C ₈ H ₁₆ O ₂	Октановая кислота	124-07-2	144	33.347	0.393
C ₉ H ₁₈ O ₂	Нонановая кислота	112-05-0	158	37.074	0.800
C ₁₀ H ₂₀ O ₂	Декановая кислота	334-48-5	172	42.792	1.488
C ₁₁ H ₂₂ O ₂	Ундекановая кислота	112-37-8	186	51.696	0.028
C ₁₂ H ₂₄ O ₂	Додекановая кислота	143-07-7	200	65.952	0.136
C ₁₃ H ₂₆ O ₂	Тридекановая кислота	638-53-9	214	82.927	0.144
C ₁₄ H ₂₈ O ₂	Тетрадекановая кислота	544-63-8	228	128.071	0.232
Азотсодержащие соединения					
N ₂	Азот	7727-37-9	28	1.540	0.925
C ₂ H ₅ NO	Ацетамид	60-35-5	59	15.389	0.112
C ₅ H ₅ N	Пиридин	110-86-1	79	15.444	0.008
C ₄ H ₅ NO ₂	Сукцинимид	123-56-8	99	30.132	0.015
C ₁₀ H ₁₅ N	(-)-Деоксиэфедрин	33817-09-3	149	35.227	0.077
C ₁₄ H ₃₀ N ₂ O	N,N-Диметил-N'-бутил-N'-гептил-мочевина	(439309)	242	110.756	9.387
Серосодержащие соединения					
O ₂ S	Диоксид серы	7446-09-5	64	4.680	0.629
CS ₂	Сероуглерод	75-15-0	76	7.958	0.064
C ₂ H ₆ S ₂	Диметилдисульфид	624-92-0	94	15.526	0.050

1	2	3	4	5	6
C ₅ H ₆ S	2-Метилтиофен	554-14-3	98	16.817	0.059
C ₅ H ₆ S	3-Метилтиофен	616-44-4	98	17.177	0.072
C ₆ H ₈ S	2-Этилтиофен	872-55-9	112	21.008	0.034
C ₇ H ₁₀ S	2-Пропилтиофен	1551-27-5	126	24.966	0.005
C ₇ H ₈ S	4-Метил-бензолтиол	106-45-6	124	27.708	0.058
C ₈ H ₁₂ S	2-Бутилтиофен	1455-20-5	140	28.849	0.011
C ₅ H ₈ O ₂ S	(2-Пропенилтио)-уксусная кислота	20600-63-9	132	29.637	0.028
C ₉ H ₁₄ S	2-Пенилтиофен	4861-58-9	154	32.372	0.020
Кремнийорганические соединения					
C ₈ H ₁₈ Si ₂	Бис(триметилсилил)ацетилен	14630-40-1	170	15.255	0.016
C ₄ H ₁₂ Br ₂ Si ₂	1,2-Дибром-1,1,2,2-тетраметил-дисилан	18209-83-1	274	23.951	0.039
Неорганические соединения					
<i>Оксиды</i>					
H ₂ O	Вода	7732-18-5	18	3.162	0.265
CO ₂	Диоксид углерода	124-38-9	44	1.722	47.695
Благородные газы					
Ar	Аргон	7440-37-1	40	1.616	0.030
Другие соединения					
Hg	Ртуть	7439-97-6	202	5.260	0.288
CCl ₂ O	Фосген (=карбонил дихлорид)	75-44-5	98	5.476	0.002

Примечание. Здесь и далее: CAS/(NIST) – уникальный численный идентификатор химических соединений, внесенных в реестр Chemical Abstracts Service (<https://www.cas.org>) или NIST number (a unique number given to each spectrum in the NIST archive); *MW* – номинальная масса; *RT* – время удержания аналитической колонкой индивидуального компонента газовой смеси; *A* – нормализованная площадь, отношение площади компонента газовой смеси к сумме площадей всех компонентов в хроматограмме. «x» — численный идентификатор отсутствует.

табл. 1—3) и, по данным [Gizé, Macdonald, 1993; Gizé, 1999], транспортирует углеводороды, а водные флюиды обеднены этими соединениями. В глубинах земной коры компоненты флюида, в том числе и CO₂, находятся в сверхкритическом состоянии [Savage et al., 1995; Горбатый, Бондаренко, 2007; Летников и др., 2018]. Сверхкритический флюид представляет собой нечто среднее между жидким и газообразным состоянием и обладает уникальной реакционной способностью в переносе и отложении руд-

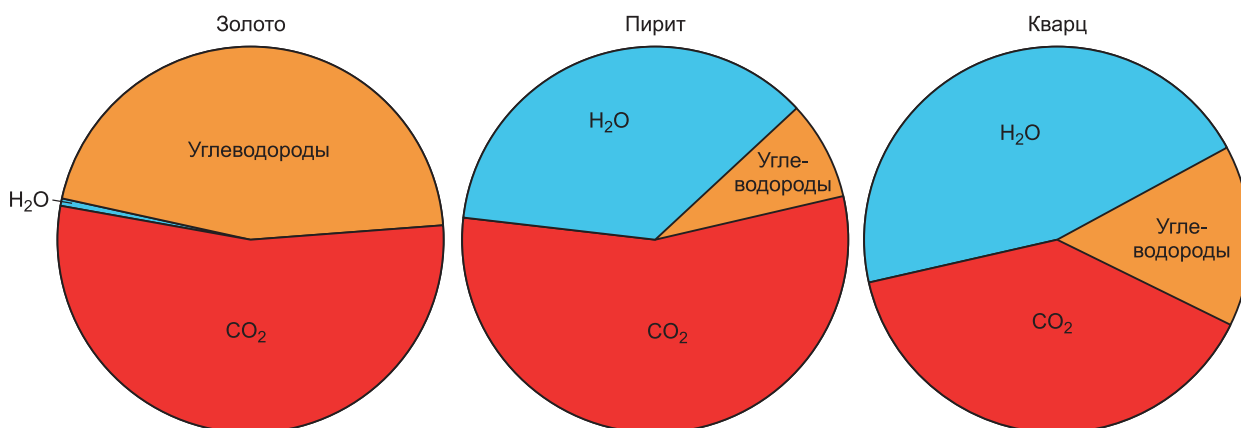


Рис. 5. Относительное содержание летучих компонентов в золоте, кварце и пирите из золотоносной кварцевой жилы Советского золоторудного месторождения.

Светло-коричневое поле — сумма алифатических, циклических и кислородсодержащих углеводородов.

Таблица 2. Результаты GC-MS анализа газовой фазы, извлеченной при ударном разрушении кварца, месторождение Советское, Енисейский Кряж

Брутто-формула (система Хилла)	Название	CAS/ (NIST)	MW	Кварц	
				RT, мин	A, %
1	2	3	4	5	6
Алифатические углеводороды					
<i>Парафины</i>					
CH ₄	Метан	74-82-8	16	1.70	1.366
C ₂ H ₆	Этан	74-84-0	30	2.93	0.010
C ₃ H ₈	<i>n</i> -Пропан	74-98-6	44	4.15	0.133
C ₄ H ₁₀	2-Метилпропан	75-28-5	58	6.23	0.191
C ₅ H ₁₂	<i>n</i> -Пентан	109-66-0	72	8.51	0.099
C ₆ H ₁₄	<i>n</i> -Гексан	110-54-3	86	11.84	0.039
C ₇ H ₁₆	<i>n</i> -Гептан	142-82-5	100	15.89	0.069
C ₈ H ₁₈	<i>n</i> -Октан	111-65-9	114	19.92	0.029
C ₉ H ₂₀	<i>n</i> -Нонан	111-84-2	128	23.75	0.030
C ₁₀ H ₂₂	<i>n</i> -Декан	124-18-5	142	27.31	0.027
C ₁₁ H ₂₄	<i>n</i> -Ундекан	1120-21-4	156	30.59	0.064
C ₁₂ H ₂₆	<i>n</i> -Додекан	112-40-3	170	33.61	0.330
C ₁₃ H ₂₈	<i>n</i> -Тридекан	629-50-5	184	37.32	0.291
C ₁₄ H ₃₀	<i>n</i> -Тетрадекан	629-59-4	198	45.35	0.085
C ₁₅ H ₃₂	<i>n</i> -Пентадекан	629-62-9	212	51.34	0.140
C ₁₇ H ₃₆	2,6,10-Триметилтетрадекан	14905-56-7	240	59.13	0.418
C ₁₆ H ₃₄	<i>n</i> -Гексадекан	544-76-3	226	66.68	0.032
C ₁₇ H ₃₆	<i>n</i> -Гептадекан	629-78-7	240	82.76	0.114
<i>Олефины</i>					
C ₂ H ₄	Этилен	74-85-1	28	2.17	0.014
C ₂ H ₂	Ацетилен	74-86-2	26	2.38	0.120
C ₃ H ₆	1-Пропен	115-07-1	42	3.98	0.015
C ₄ H ₈	1-Бутен	106-98-9	56	5.63	0.017
C ₄ H ₈	(E)-2-Бутен	624-64-6	56	5.90	0.021
C ₄ H ₈	2-Бутен	107-01-7	56	6.13	0.010
C ₅ H ₈	Изопрен	78-79-5	68	7.91	0.001
C ₅ H ₁₀	3-Метил-1-бутен	563-45-1	70	8.23	0.014
C ₅ H ₁₀	1-Пентен	109-67-1	70	8.24	0.112
C ₅ H ₈	1,3-Пентадиен	1574-41-0	68	8.48	0.002
C ₅ H ₁₀	(E)-2-Пентен	646-04-8	70	8.56	0.005
C ₅ H ₈	(E)-1,3-Пентадиен	2004-70-8	68	8.69	0.003
C ₅ H ₈	(Z)-1,3-Пентадиен	1574-41-0	68	8.83	<0.001
C ₆ H ₁₂	1-Гексен	592-41-6	84	11.56	0.047
C ₇ H ₁₄	1-Гептен	592-76-7	98	15.52	0.018
C ₈ H ₁₆	(E)-2-Октен	13389-42-9	112	19.60	0.122
C ₉ H ₁₈	1-Нонен	124-11-8	126	23.50	0.013
C ₁₀ H ₂₀	1-Децен	872-05-9	140	27.13	0.015
C ₁₄ H ₂₈	1-Тетрадецен	1120-36-1	196	44.85	0.036
C ₁₅ H ₃₀	1-Пентадецен	13360-61-7	210	50.94	0.090
Циклические углеводороды					
<i>Циклические алканы и алкены</i>					
C ₃ H ₁₀	транс-1,2-Диметилциклопропан	2402-06-4	70	8.43	0.001
C ₆ H ₁₀	3-Метилциклопентен	1120-62-3	82	12.69	0.008
<i>Арены</i>					
C ₆ H ₆	Бензол	71-43-2	78	12.51	0.237
C ₇ H ₈	Толуол	108-88-3	92	16.92	0.193

1	2	3	4	5	6
C ₇ H ₇ F	Фторметилбензол	350-50-5	110	20.52	0.002
C ₈ H ₁₀	Этилбензол	100-41-4	106	20.97	0.011
C ₈ H ₁₀	<i>n</i> -Ксилол	106-42-3	106	21.23	0.103
C ₈ H ₁₀	<i>o</i> -Ксилол	95-47-6	106	21.48	0.022
C ₈ H ₁₀	Стирол	100-42-5	104	21.97	0.006
C ₈ H ₈	<i>m</i> -Ксилол	108-38-3	106	21.87	0.019
C ₉ H ₁₂	Пропилбензол	103-65-1	120	24.76	0.011
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Кумол	99-87-6	134	27.54	0.006
C ₁₀ H ₁₄	Бутилбензол	104-51-8	134	28.48	0.025
C ₈ H ₉ Cl	1-(Хлорметил)-4-метилбензол	104-82-5	140	31.69	0.002
C ₁₁ H ₁₆	Пентилбензол	538-68-1	148	31.82	0.054
C ₈ H ₉ Cl	1-(Хлорметил)-3-метилбензол	620-19-9	140	32.54	0.004
C ₈ H ₉ Cl	1-(Хлорметил)-2-метилбензол	552-45-4	140	32.79	0.003
C ₁₂ H ₁₈	Гексилбензол	1077-16-3	162	35.15	0.069
C ₁₃ H ₂₀	Гептилбензол	1078-71-3	176	39.75	0.038
C ₁₄ H ₂₂	Октилбензол	2189-60-8	190	46.61	0.073
C ₁₅ H ₂₄	Нонилбензол	1081-77-2	204	57.37	0.079
<i>Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)</i>					
C ₁₀ H ₈	Нафталин	91-20-3	128	32.19	0.008
C ₁₁ H ₁₀	1-Метилнафталин	90-12-0	142	35.92	0.006
C ₁₁ H ₁₀	2-Метилнафталин	91-57-6	142	36.42	0.007
C ₁₄ H ₁₀	Фенантрен	85-01-8	178	86.68	0.005
Кислородсодержащие углеводороды					
<i>Спирты</i>					
CH ₄ O	Метанол	67-56-1	32	4.10	0.203
C ₂ H ₆ O	Этанол	64-17-5	46	6.51	0.050
C ₄ H ₁₀ O	1-Бутанол	71-36-3	74	12.61	0.008
C ₆ H ₆ O	Фенол	108-95-2	94	24.81	0.018
C ₇ H ₈ O	<i>o</i> -Крезол	95-48-7	108	27.61	0.005
C ₇ H ₈ O	<i>n</i> -Крезол	106-44-5	108	28.59	0.009
C ₁₁ H ₁₆ O ₂	4-Пентилрезорцинол	533-24-4	180	101.15	0.008
C ₁₁ H ₁₆ O ₂	5-Пентилрезорцинол	500-66-3	180	108.96	0.025
C ₁₂ H ₁₈ O ₂	2-Гексилрезорцинол	х	194	114.75	0.048
C ₁₂ H ₁₈ O ₂	4-Гексилрезорцинол	136-77-6	194	121.66	0.041
C ₁₂ H ₁₈ O ₂	5-Гексилрезорцинол	х	194	126.81	0.008
C ₁₃ H ₂₀ O ₂	4-Гептилрезорцинол	х	208	130.12	0.024
<i>Простые и сложные эфиры</i>					
C ₅ H ₈ O	3,4-Дигидропиран	110-87-2	84	13.54	0.003
C ₅ H ₈ O ₂	Метилметакрилат	80-62-6	100	14.47	0.081
C ₅ H ₈ O	3,4-Дигидро-2H-пиран	110-87-2	84	17.14	0.008
C ₄ H ₆ O ₂	Бутиролактон	96-48-0	86	21.43	0.096
C ₆ H ₁₀ O ₂	γ-Гексалактон	695-06-7	114	27.84	0.005
C ₇ H ₁₂ O ₂	γ-Гепталактон	105-21-5	128	31.37	0.008
C ₉ H ₁₀ O	1-Этинил-4-метоксибензол	637-69-4	134	31.52	0.009
C ₈ H ₁₄ O ₂	γ-Окталактон	104-50-7	142	34.72	0.006
C ₉ H ₁₆ O ₂	γ-Ноналактон	104-61-0	156	39.15	0.018
C ₁₀ H ₁₈ O ₂	γ-Декалактон	706-14-9	170	45.76	0.014
C ₁₃ H ₁₈ O ₂	Ацетат 2-тетра-бутил-4-метилфенол	6950-09-0	206	48.29	0.005
C ₁₀ H ₁₂ O ₃	Метил 4-метокси-3-метилбензоат	(378753)	180	50.81	0.033

1	2	3	4	5	6
$C_{12}H_{16}O_2$	Метилвый эфир 4-бутилбензойной кислоты	20651-69-8	192	56.89	0.003
$C_{12}H_{22}O_2$	γ -Додекалктон	2305-05-7	198	72.09	0.014
$C_{14}H_{18}O_4$	Диизопропилфталат	605-45-8	250	72.97	0.013
<i>Альдегиды</i>					
C_2H_4O	Ацетальдегид	75-07-0	44	5.38	2.097
C_3H_4O	2-Пропеналь	107-02-8	56	7.43	0.011
C_3H_6O	<i>n</i> -Пропаналь	123-38-6	58	7.58	0.013
C_4H_6O	2-Метил-2-пропеналь	78-85-3	70	9.83	0.020
C_4H_8O	2-Метилпропаналь	78-84-2	72	9.84	0.027
C_4H_8O	<i>n</i> -Бутаналь	123-72-8	72	10.62	0.166
C_4H_6O	(<i>Z</i>)-2-Бутеналь	15798-64-8	70	12.39	0.004
$C_5H_{10}O$	3-Метилбутаналь	590-86-3	86	13.79	0.082
$C_5H_{10}O$	<i>n</i> -Пентаналь	110-62-3	86	14.82	0.125
$C_5H_4O_2$	2-Фуральдегид	98-01-1	96	17.72	0.003
$C_5H_4O_2$	3-Фуральдегид	498-60-2	96	18.65	0.077
$C_6H_{12}O$	<i>n</i> -Гексаналь	66-25-1	100	19.12	0.201
$C_7H_{14}O$	<i>n</i> -Гептаналь	111-71-7	114	23.20	0.026
$C_6H_6O_2$	5-Метил-2-Фуранкарбоксальдегид	620-02-0	110	23.70	0.017
C_7H_6O	Бензальдегид	100-52-7	106	24.33	0.246
$C_8H_{16}O$	2-Этилгексаналь	123-05-7	128	25.58	0.012
$C_8H_{16}O$	<i>n</i> -Октаналь	124-13-0	128	26.93	0.029
$C_6H_4O_3$	2,5-Фуранкарбоксальдегид	823-82-5	124	28.26	0.125
$C_9H_{18}O$	<i>n</i> -Нонаналь	124-19-6	142	30.36	0.090
$C_{10}H_{20}O$	<i>n</i> -Деканаль	112-31-2	156	33.49	0.467
$C_{11}H_{22}O$	<i>n</i> -Ундеканаль	112-44-7	170	37.10	0.248
$C_{12}H_{20}O$	5,9-Диметил-4,8-декадиеналь	762-26-5	180	38.05	0.024
$C_{12}H_{24}O$	<i>n</i> -Додеканаль	112-54-9	184	42.78	0.084
$C_{14}H_{28}O$	<i>n</i> -Тетрадеканаль	124-25-4	212	64.78	0.088
$C_{15}H_{30}O$	<i>n</i> -Пентадеканаль	2765-11-9	226	81.20	0.117
<i>Кетоны</i>					
C_3H_6O	2-Пропанон	67-64-1	58	7.81	0.146
$C_4H_6O_2$	2,3-Бутандион	431-03-8	86	10.72	0.002
C_4H_8O	2-Бутанон	78-93-3	72	10.87	0.104
$C_5H_{10}O$	2-Пентанон	107-87-9	86	14.59	0.010
C_5H_8O	Циклопентанон	120-92-3	84	17.49	0.004
$C_6H_{12}O$	2-Гексанон	591-78-6	100	18.87	0.017
$C_7H_{14}O$	2-Гептанон	110-43-0	114	22.93	0.021
$C_5H_4O_3$	3-Метил-2,5-фурандион	616-02-4	112	23.55	0.223
$C_8H_{16}O$	2-Октанон	111-13-7	128	26.63	0.019
$C_9H_{18}O$	2-Нонанон	821-55-6	142	30.04	0.040
$C_9H_{10}O$	1-(2-Метилфенил)этанон	577-16-2	134	31.67	0.007
$C_9H_{10}O$	1-(3-Метилфенил)этанон	585-74-0	134	31.84	0.024
$C_9H_{10}O$	1-(4-Метилфенил)этанон	122-00-9	134	32.24	0.014
$C_{10}H_{20}O$	2-Деканон	693-54-9	156	33.16	0.220
$C_8H_4O_3$	1,3-Изобензофурандион	85-44-9	148	36.50	0.158
$C_{11}H_{22}O$	2-Ундеканон	53452-70-3	170	36.79	0.212
$C_{12}H_{24}O$	2-Додеканон	6175-49-1	184	41.78	0.029
$C_{13}H_{26}O$	2-Тридеканон	593-08-8	198	50.02	0.104

1	2	3	4	5	6
$C_{14}H_{28}O$	2-Тетрадеканон	2345-27-9	212	62.63	0.042
$C_{15}H_{30}O$	2-Пентадеканон	2345-28-0	226	77.58	0.111
<i>Карбоновые кислоты</i>					
CH_2O_2	Муравьиная кислота	64-18-6	46	10.28	0.086
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	64-19-7	60	11.22	0.892
$C_3H_6O_2$	<i>n</i> -Пропановая кислота	79-09-4	74	15.14	0.012
$C_4H_8O_2$	<i>n</i> -Бутановая кислота	107-92-6	88	18.83	0.233
$C_5H_{10}O_2$	3-Метилбутановая кислота	503-74-2	102	21.80	0.006
$C_5H_{10}O_2$	<i>n</i> -Пентановая кислота	109-52-4	102	22.80	0.220
$C_6H_{12}O_2$	<i>n</i> -Гексановая кислота	142-62-1	116	26.33	0.008
$C_7H_{14}O_2$	<i>n</i> -Гептановая кислота	111-14-8	130	29.66	0.025
$C_8H_{16}O_2$	<i>n</i> -Октановая кислота	124-07-2	144	32.74	0.356
$C_9H_{18}O_2$	4-Метилоктановая кислота	54947-74-9	158	34.62	0.020
$C_9H_{18}O_2$	<i>n</i> -Нонановая кислота	112-05-0	158	36.09	0.681
$C_{10}H_{20}O_2$	<i>n</i> -Декановая кислота	334-48-5	172	40.88	0.080
$C_{11}H_{22}O_2$	<i>n</i> -Ундекановая кислота	112-37-8	186	48.78	0.036
$C_{12}H_{24}O_2$	2-Метилундекановая кислота	24323-25-9	200	54.94	0.050
$C_{12}H_{24}O_2$	<i>n</i> -Додекановая кислота	143-07-7	200	60.02	0.160
$C_{14}H_{28}O_2$	<i>n</i> -Тетрадекановая кислота	544-63-8	228	108.43	0.096
$C_{15}H_{30}O_2$	3-Метилтетрадекановая кислота	x	242	119.93	0.148
Гетероциклические соединения					
<i>Диоксаны</i>					
$C_4H_8O_2$	1,4-Диоксан	123-91-1	88	13.81	<0.001
<i>Фураны</i>					
C_4H_4O	Фуран	110-00-9	68	8.48	0.001
C_5H_6O	2-Метилфуран	534-22-5	82	10.24	0.004
C_5H_6O	3-Метилфуран	930-27-8	82	10.51	0.001
C_6H_8O	2-Этилфуран	3208-16-0	96	12.71	0.002
C_6H_8O	3-Этилфуран	x	96	13.96	0.001
C_6H_8O	2,5-Диметилфуран	625-86-5	96	14.01	0.001
C_6H_8O	2,3-Диметилфуран	(458499)	96	14.44	0.001
C_6H_8O	2,4-Диметилфуран	3710-43-8	96	15.35	<0.001
C_6H_8O	3,4-Диметилфуран	(458504)	96	15.87	<0.001
$C_7H_{10}O$	2-Пропилфуран	4229-91-8	110	18.67	0.004
$C_8H_{12}O$	2-Бутилфуран	4466-24-4	124	22.13	0.002
$C_9H_{14}O$	2-Пентилфуран	3777-69-3	138	25.91	0.008
$C_{10}H_{16}O$	2-Гексилфуран	3777-70-6	152	29.43	0.003
$C_{11}H_{18}O$	2-Гептилфуран	3777-71-7	166	32.64	0.003
$C_{12}H_{20}O$	2-Октилфуран	4179-38-8	180	36.04	0.004
Азотсодержащие соединения					
N_2	Азот	7727-37-9	28	1.60	0.694
H_3N	Аммиак	7664-41-7	17	3.00	0.006
$CHNO$	Изоцианат водорода	75-13-8	43	6.31	0.456
C_2H_3N	Ацетонитрил	75-05-8	41	7.04	0.065
C_3H_5N	Пропаргиламин	2450-71-7	55	9.64	0.002
C_4H_5N	Пиррол	109-97-7	67	14.65	0.006
C_5H_5N	Пиридин	110-86-1	79	16.25	0.005
$C_3H_5NO_2$	2-Оксопропанамид	x	87	17.82	0.021
C_6H_9N	2,3-Диметил-1Н-пиррол	600-28-2	95	18.77	0.002

1	2	3	4	5	6
C ₆ H ₇ N	2-Метилпиридин	109-06-8	93	19.40	0.002
C ₆ H ₁₃ NO	1-Метил-3-пиперидинол	3554-74-3	115	25.85	0.017
C ₇ H ₁₁ N	1,2,5-Триметилпиррол	930-87-0	109	26.11	0.006
C ₈ H ₁₅ N	Октаннитрил	124-12-9	125	28.91	0.154
C ₄ H ₅ NO ₂	Сукцинимид	123-56-8	99	29.24	0.128
C ₉ H ₈ ClNO ₄	(2-Хлор-5-нитрофенил)метилловый эфир уксусной кислоты	303965-18-6	229	93.25	0.012
Серосодержащие соединения					
H ₂ S	Сероводород	7783-06-4	34	2.83	0.042
COS	Карбонилсульфид	463-58-1	60	3.40	0.042
O ₂ S	Диоксид серы	7446-09-5	64	4.85	1.163
CH ₄ S	Метантиол	74-93-1	48	5.55	0.018
C ₂ H ₆ S	Диметилсульфид	75-18-3	62	7.68	0.003
CS ₂	Сероуглерод	75-15-0	76	7.84	0.083
C ₃ H ₈ S	Пропантиол	107-03-9	76	10.92	0.003
C ₄ H ₄ S	Тиофен	110-02-1	84	12.26	0.007
C ₂ H ₆ S ₂	Диметилдисульфид	624-92-0	94	15.35	0.002
C ₅ H ₆ S	2-Метилтиофен	554-14-3	98	16.47	0.005
C ₃ H ₆ S	3-Метилтиофен	616-44-4	98	16.82	0.006
C ₆ H ₈ S	2-Этилтиофен	872-55-9	112	20.55	0.002
C ₇ H ₁₀ S	2-Пропилтиофен	1551-27-5	126	24.13	0.005
C ₇ H ₁₀ S	3-Пропилтиофен	x	126	24.40	0.004
C ₅ H ₄ OS	3-Тиофенкарбоксальдегид	498-62-4	112	25.21	0.008
C ₈ H ₁₂ S	2-(1,1-Диметилэтил)-тиофен	1689-78-7	140	26.96	0.008
C ₈ H ₁₂ S	2-Бутилтиофен	1455-20-5	140	28.21	0.007
C ₆ H ₆ OS	5-Метил-2-тиофенкарбоксальдегид	13679-70-4	126	29.53	0.009
C ₈ H ₇ F ₃ S	2-(Трифторметил)бензил меркаптан	26039-98-5	192	29.71	0.002
C ₉ H ₁₄ S	2-Пентилтиофен	4861-58-9	154	31.61	0.009
C ₁₀ H ₁₆ S	2-Гексилтиофен	18794-77-9	168	34.94	0.015
C ₁₁ H ₁₈ S	3-Гептилтиофен	x	182	39.47	0.007
C ₁₁ H ₁₈ S	2-Гептилтиофен	18794-78-0	182	39.70	0.003
C ₁₂ H ₂₀ S	2-Октилтиофен	880-36-4	196	46.23	0.010
C ₁₃ H ₂₂ S	2-Нонилтиофен	57754-07-1	210	56.94	0.022
Неорганические соединения					
<i>Оксиды</i>					
CO ₂	Диоксид углерода	124-38-9	44	1.88	37.312
H ₂ O	Вода	7732-18-5	18	3.10	44.676
<i>Благородные газы</i>					
Ar	Аргон	7440-37-1	40	1.58	0.011

ного вещества [Летников и др., 2018]. По данным [Тейлор, Миллер, 2010], такими же свойствами обладает и SO₂, но при увеличении доли воды во флюиде растворяющая способность этих соединений падает. Среди обнаруженных серосодержащих соединений во флюидах самородного золота, пирита и кварца SO₂ преобладает (см. табл. 1—3).

Молекулярный азот и азотсодержащие соединения постоянно присутствуют в составе флюидов самородного золота, пирита и кварца (см. табл. 1—3). Азот так же, как и сера, и галогены, может участвовать в комплексообразовании в виде соединений Au(CN)₂⁻; [Au(SCN)]⁻; [Au(S₂O₃)⁻³]; [Au(HS₂)⁻]; AuCl₄⁻; KAuCl₄ [Марчук, 2008; Williams-Jones et al., 2009; Бондар и др., 2010; Ляхов, Павлунь, 2013].

Карбоновые кислоты, присутствующие в составе флюидов (см. табл. 4), также играют положительную роль в комплексообразовании, формируя металлоорганические анионные комплексы, т. е. они

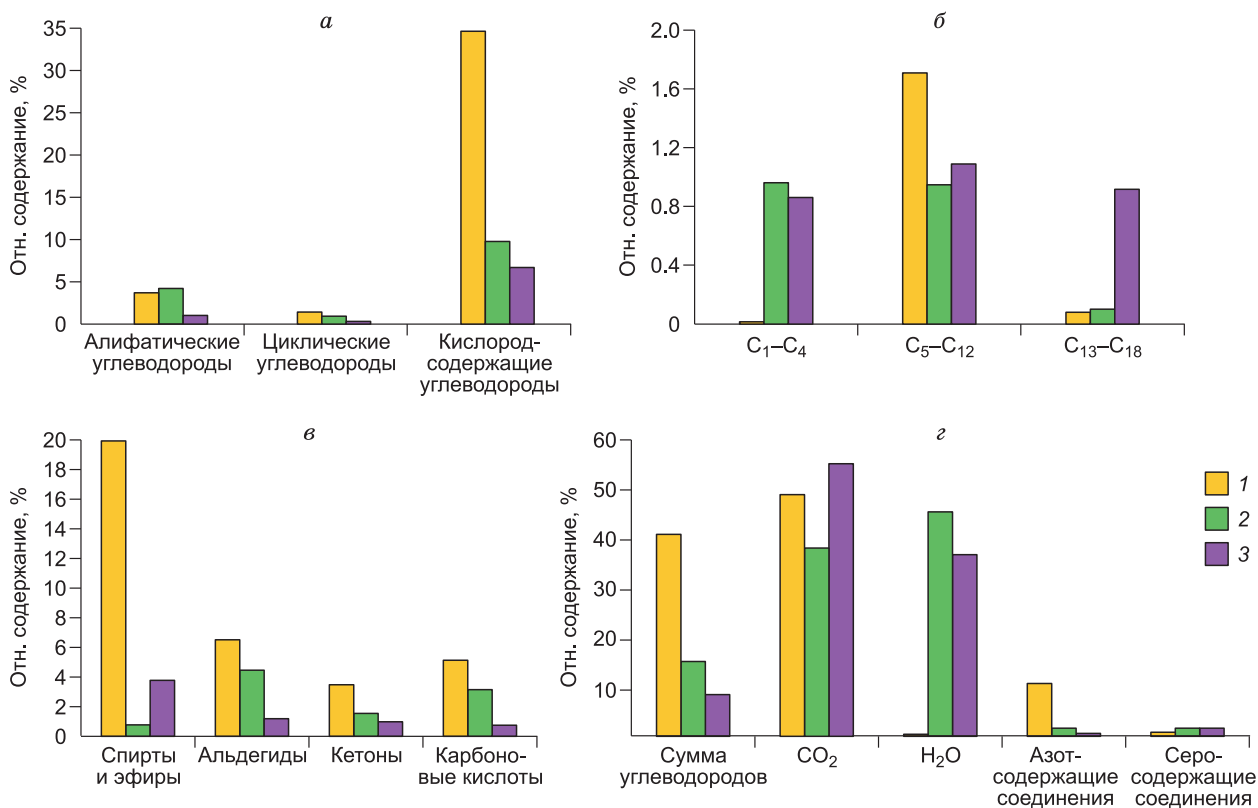


Рис. 6. Относительное содержание летучих компонентов в золоте, кварце и пирите из золотоносной кварцевой жилы Советского золоторудного месторождения:

а — алифатических, циклических и кислородсодержащих углеводородов; *б* — «легких» (C₁–C₄), «средних» (C₅–C₁₂) и «тяжелых» (C₁₃–C₁₈) парафинов; *в* — спиртов и эфиров, альдегидов, кетонов и карбоновых кислот; *г* — суммы углеводородов, углекислоты, воды и азот- и серосодержащих соединений. 1 — золото, 2 — кварц, 3 — пирит.

потенциально способны транспортировать золото. Кроме того, карбоновые кислоты увеличивают пористость вмещающих пород, что способствует миграции металлоорганических комплексов [Greenwood et al., 2013].

Флюиды, законсервированные в самородном золоте, по агрегатному состоянию можно отнести к газообразным. На это, в первую очередь, указывает низкое содержание воды в них и наличие углеводородов (см. табл. 1–3), большинство из которых являются летучими соединениями [Буслаева, Новгорова, 1992]. В эндогенных процессах летучие компоненты флюидов обладают высокой подвижностью и играют свою важную роль в транспорте металлов, в том числе и золота [Archibald et al., 2001; Williams-Jones, Heinrich, 2005, Малышев, 2008]. О том, что газы могут играть важную роль в транспорте металлов изначально, высказано на основе теоретических исследований [Krauskopf, 1957]. Затем находки золота в ощутимых количествах в газовых включениях на золоторудных месторождениях Аргентины и Индонезии привели авторов [Ulrich et al., 1999] к выводу о том, что газообразные флюиды играют важную роль в переносе золота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом беспирилизной газовой хромато-масс-спектрометрии с ударным разрушением пробы изучен состав флюида включений в самородном золоте, пирите и кварце месторождения Советское. Результаты показывают, что флюид из включений в самородном золоте отличается по количественному и видовому составу от флюидов включений в пирите и кварце. Растворы флюидных включений в пирите и кварце в целом близки по видовому составу веществ, но различаются по их количественному соотношению.

1. Флюиды из включений в самородном золоте месторождения характеризуются минимальным содержанием воды (~0.3 отн. %) и повышенным CO₂ — до ~47.7 отн. %. Этим флюидам свойственны

Таблица 3. Результаты GC-MS анализа газовой фазы, извлеченной при ударном разрушении пирита, месторождение Советское, Енисейский Кряж

Брутто-формула (система Хилла)	Название	CAS/ (NIST)	MW	Пирит	
				RT, мин	A, %
1	2	3	4	5	6
Алифатические углеводороды					
<i>Парафины</i>					
CH ₄	Метан	74-82-8	16	1.72	0.060
C ₂ H ₆	Этан	74-84-0	30	2.83	0.004
C ₃ H ₈	<i>n</i> -Пропан	74-98-6	44	4.10	0.004
C ₄ H ₁₀	2-Метилпропан	75-28-5	58	6.23	0.007
C ₅ H ₁₂	<i>n</i> -Пентан	109-66-0	72	8.49	0.001
C ₆ H ₁₄	<i>n</i> -Гексан	110-54-3	86	11.87	0.005
C ₇ H ₁₆	<i>n</i> -Гептан	142-82-5	100	15.84	0.007
C ₈ H ₁₆	3-Метиленгептан	1632-16-2	112	19.32	0.024
C ₈ H ₁₈	<i>n</i> -Октан	111-65-9	114	19.90	0.013
C ₉ H ₂₀	<i>n</i> -Нонан	111-84-2	128	23.76	0.016
C ₁₀ H ₂₂	<i>n</i> -Декан	124-18-5	142	27.31	0.009
C ₁₁ H ₂₄	<i>n</i> -Ундекан	1120-21-4	156	30.59	0.014
C ₁₂ H ₂₆	<i>n</i> -Додекан	112-40-3	170	33.61	0.010
C ₁₃ H ₂₈	<i>n</i> -Тридекан	629-50-5	184	37.34	0.020
C ₁₄ H ₃₀	<i>n</i> -Тетрадекан	629-59-4	198	43.88	0.005
C ₁₅ H ₃₂	<i>n</i> -Пентадекан	629-62-9	212	51.34	0.016
C ₁₇ H ₃₆	2,6,10-Триметилтетрадекан	14905-56-7	240	55.17	0.190
C ₁₆ H ₃₄	<i>n</i> -Гексадекан	544-76-3	226	64.98	0.039
C ₁₇ H ₃₆	<i>n</i> -Гептадекан	629-78-7	240	86.98	0.100
C ₁₈ H ₃₈	8-Метилгептадекан	13287-23-5	254	97.70	0.362
C ₁₈ H ₃₈	4-Метилгептадекан	26429-11-8	254	111.16	0.180
<i>Галогенсодержащие парафины</i>					
C ₄ H ₉ Cl	1-Хлорбутан	109-69-3	92	12.42	0.003
<i>Олефины</i>					
C ₂ H ₄	Этилен	74-85-1	28	2.17	0.004
C ₂ H ₂	Ацетилен	74-86-2	26	2.38	0.018
C ₃ H ₆	1-Пропен	115-07-1	42	3.93	0.004
C ₄ H ₈	1-Бутен	106-98-9	56	5.76	0.006
C ₄ H ₈	(E)-2-Бутен	624-64-6	56	5.90	0.013
C ₄ H ₈	2-Бутен	107-01-7	56	6.13	0.010
C ₅ H ₁₀	3-Метил-1-бутен	563-45-1	70	8.21	0.004
C ₅ H ₈	1,3-Пентадиен	1574-41-0	68	8.46	0.001
C ₅ H ₁₀	(E)-2-Пентен	646-04-8	70	8.58	0.002
C ₅ H ₈	(E)-1,3-Пентадиен	2004-70-8	68	8.69	0.001
C ₆ H ₁₂	1-Гексен	592-41-6	84	11.54	0.002
C ₇ H ₁₄	1-Гептен	592-76-7	98	15.50	0.003
C ₈ H ₁₆	(Z)-4-Октен	7642-15-1	112	19.62	0.004
C ₉ H ₁₈	1-Нонен	124-11-8	126	23.51	0.005
C ₁₀ H ₂₀	1-Децен	872-05-9	140	27.11	0.003
C ₁₄ H ₂₈	1-Тетрадецен	1120-36-1	196	43.46	0.011
C ₁₅ H ₃₀	1-Пентадецен	13360-61-7	210	50.99	0.008
C ₁₆ H ₃₂	1-Гексадецен	629-73-2	224	63.88	0.012
Циклические углеводороды					
<i>Циклические алканы и алкены</i>					
C ₅ H ₁₀	транс-1,2-Диметилциклопропан	2402-06-4	70	8.44	0.001
C ₆ H ₁₀	3-Метилциклопентен	1120-62-3	82	12.69	0.001

1	2	3	4	5	6
<i>Арены</i>					
C ₆ H ₆	Бензол	71-43-2	78	12.51	0.071
C ₇ H ₈	Толуол	108-88-3	92	16.95	0.027
C ₈ H ₁₀	Этилбензол	100-41-4	106	20.97	0.005
C ₈ H ₁₀	<i>n</i> -Ксилол	106-42-3	106	21.23	0.041
C ₈ H ₁₀	<i>o</i> -Ксилол	95-47-6	106	21.57	0.005
C ₈ H ₁₀	Стирол	100-42-5	104	21.98	0.001
C ₈ H ₈	<i>m</i> -Ксилол	108-38-3	106	21.87	0.010
C ₉ H ₁₂	Пропилбензол	103-65-1	120	24.78	0.007
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Кумол	99-87-6	134	27.56	0.005
C ₁₀ H ₁₄	Бутилбензол	104-51-8	134	28.51	0.011
C ₈ H ₉ Cl	1-(Хлорметил)-4-метилбензол	104-82-5	140	31.76	0.002
C ₁₁ H ₁₆	Пентилбензол	538-68-1	148	31.84	0.025
C ₈ H ₉ Cl	1-(Хлорметил)-3-метилбензол	620-19-9	140	32.56	0.002
C ₈ H ₉ Cl	1-(Хлорметил)-2-метилбензол	552-45-4	140	32.82	0.001
C ₁₂ H ₁₈	Гексилбензол	1077-16-3	162	35.15	0.020
C ₁₃ H ₂₀	Гептилбензол	1078-71-3	176	39.72	0.019
C ₁₄ H ₂₂	Октилбензол	2189-60-8	190	46.68	0.025
C ₁₅ H ₂₄	Нонилбензол	1081-77-2	204	57.47	0.039
<i>Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)</i>					
C ₁₀ H ₈	Нафталин	91-20-3	128	32.22	0.008
C ₁₁ H ₁₀	1-Метилнафталин	90-12-0	142	35.99	0.002
C ₁₁ H ₁₀	2-Метилнафталин	91-57-6	142	36.42	0.004
C ₁₄ H ₁₀	Фенантрен	85-01-8	178	87.44	0.001
Кислородсодержащие углеводороды					
<i>Спирты</i>					
CH ₄ O	Метанол	67-56-1	32	4.91	0.224
C ₂ H ₆ O	Этанол	64-17-5	46	6.65	0.079
C ₄ H ₁₀ O	1-Бутанол	71-36-3	74	12.62	0.002
C ₆ H ₆ O	Фенол	108-95-2	94	24.91	0.011
C ₇ H ₈ O	<i>o</i> -Крезол	95-48-7	108	27.53	0.000
C ₇ H ₈ O	<i>n</i> -Крезол	106-44-5	108	28.94	0.003
<i>Простые и сложные эфиры</i>					
C ₅ H ₈ O	3,4-Дигидропиран	110-87-2	84	13.54	0.003
C ₅ H ₈ O ₂	Метилметакрилат	80-62-6	100	14.47	0.035
C ₅ H ₈ O	3,4-Дигидро-2H-пиран	110-87-2	84	17.17	0.006
C ₄ H ₆ O ₂	Бутиролактон	96-48-0	86	21.47	0.009
C ₆ H ₁₀ O ₂	γ-Гексалактон	695-06-7	114	27.88	0.004
C ₇ H ₁₂ O ₂	γ-Гепталактон	105-21-5	128	31.39	0.001
C ₈ H ₁₄ O ₂	γ-Окталактон	104-50-7	142	34.74	0.005
C ₉ H ₁₆ O ₂	γ-Ноналактон	104-61-0	156	39.17	0.003
C ₁₂ H ₁₆ O ₂	Бензоат 3-метил-1-бутанола	94-46-2	192	39.70	0.123
C ₁₂ H ₁₆ O ₂	2-Метилпропионат 3-метилбензилового спирта	(447357)	192	42.22	0.008
C ₁₀ H ₁₈ O ₂	γ-Декалактон	706-14-9	170	45.81	0.005
C ₁₂ H ₁₆ O ₂	Пентильный эфир бензойной кислоты	2049-96-9	192	47.21	0.027
C ₁₃ H ₁₈ O ₂	Гексильный эфир бензойной кислоты	6789-88-4	206	53.41	0.290
C ₁₄ H ₂₀ O ₂	Гепт-3-ильный эфир бензойной кислоты	(368767)	220	60.23	0.159
C ₁₄ H ₂₀ O ₂	Гептильный эфир бензойной кислоты	7155-12-6	220	68.73	0.075

1	2	3	4	5	6
$C_{12}H_{22}O_2$	γ -Додекалактон	2305-05-7	198	73.22	0.055
$C_{11}H_{12}O_4$	Моно (1-метилэтил) эфир 1,2-бензолдикарбоновой кислоты	35118-50-4	208	78.60	0.708
$C_{11}H_8O_4$	Монопроп-2-этилфталат	6139-61-3	204	96.82	0.018
$C_{15}H_{30}O_2$	Метил тетрадеканоат	124-10-7	242	107.08	0.066
$C_{14}H_{18}O_4$	Дипропилфталат	131-16-8	250	117.22	1.702
<i>Альдегиды</i>					
C_2H_4O	Ацетальдегид	75-07-0	44	5.36	0.392
C_3H_4O	2-Пропеналь	107-02-8	56	7.43	0.005
C_3H_6O	<i>n</i> -Пропаналь	123-38-6	58	7.79	0.428
C_4H_6O	2-Метил-2-пропеналь	78-85-3	70	9.83	0.002
C_4H_8O	2-Метилпропаналь	78-84-2	72	9.86	0.003
C_4H_8O	<i>n</i> -Бутаналь	123-72-8	72	10.68	0.045
C_4H_6O	(<i>Z</i>)-2-Бутеналь	15798-64-8	70	12.39	0.003
$C_5H_{10}O$	3-Метилбутаналь	590-86-3	86	13.82	0.018
$C_5H_{10}O$	<i>n</i> -Пентаналь	110-62-3	86	14.79	0.008
$C_5H_4O_2$	2-Фуральдегид	98-01-1	96	17.72	0.003
$C_5H_4O_2$	3-Фуральдегид	498-60-2	96	18.67	0.040
$C_6H_{12}O$	<i>n</i> -Гексаналь	66-25-1	100	19.12	0.014
$C_7H_{14}O$	<i>n</i> -Гептаналь	111-71-7	114	23.21	0.007
$C_6H_6O_2$	5-Метил-2-Фуранкарбоксальдегид	620-02-0	110	23.71	0.010
C_7H_6O	Бензальдегид	100-52-7	106	24.35	0.029
$C_8H_{16}O$	2-Этилгексаналь	123-05-7	128	25.56	0.015
$C_8H_{16}O$	<i>n</i> -Октаналь	124-13-0	128	26.94	0.007
$C_6H_4O_3$	2,5-Фуранкарбоксальдегид	823-82-5	124	28.31	0.009
$C_9H_{18}O$	<i>n</i> -Нонаналь	124-19-6	142	30.38	0.013
$C_{10}H_{20}O$	<i>n</i> -Деканаль	112-31-2	156	33.54	0.014
$C_{11}H_{22}O$	<i>n</i> -Ундеканаль	112-44-7	170	37.17	0.004
$C_{12}H_{24}O$	<i>n</i> -Додеканаль	112-54-9	184	42.85	0.039
$C_{14}H_{28}O$	<i>n</i> -Тетрадеканаль	124-25-4	212	62.95	0.026
$C_{15}H_{30}O$	<i>n</i> -Пентадеканаль	2765-11-9	226	82.96	0.047
<i>Кетоны</i>					
C_3H_6O	2-Пропанон	67-64-1	58	7.81	0.469
$C_4H_6O_2$	2,3-Бутандион	431-03-8	86	10.73	0.001
C_4H_8O	2-Бутанон	78-93-3	72	10.86	0.051
$C_5H_{10}O$	2-Пентанон	107-87-9	86	14.61	0.013
C_5H_8O	Циклопентанон	120-92-3	84	17.50	0.001
$C_6H_{12}O$	2-Гексанон	591-78-6	100	18.87	0.013
$C_7H_{14}O$	2-Гептанон	110-43-0	114	22.93	0.011
$C_5H_4O_3$	3-Метил-2,5-фурандион	616-02-4	112	23.45	0.008
$C_8H_{16}O$	2-Октанон	111-13-7	128	26.65	0.008
$C_9H_{18}O$	2-Нонанон	821-55-6	142	30.06	0.011
$C_9H_{10}O$	1-(3-Метилфенил)этанон	585-74-0	134	31.82	0.015
$C_9H_{10}O$	1-(4-Метилфенил)этанон	122-00-9	134	32.26	0.007
$C_{10}H_{20}O$	2-Деканон	693-54-9	156	33.21	0.007
$C_8H_4O_3$	1,3-Изобензофурандион	85-44-9	148	36.55	0.053
$C_{11}H_{22}O$	2-Ундеканон	53452-70-3	170	36.74	0.015
$C_{12}H_{24}O$	2-Додеканон	6175-49-1	184	42.03	0.008

1	2	3	4	5	6
C ₁₃ H ₂₆ O	2-Тридеканон	593-08-8	198	50.09	0.012
C ₁₄ H ₂₈ O	2-Тетрадеканон	2345-27-9	212	60.45	0.069
C ₁₅ H ₃₀ O	2-Пентадеканон	2345-28-0	226	78.57	0.201
<i>Карбоновые кислоты</i>					
CH ₂ O ₂	Муравьиная кислота	64-18-6	46	10.31	0.028
C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная кислота	64-19-7	60	11.28	0.374
C ₃ H ₆ O ₂	<i>n</i> -Пропановая кислота	79-09-4	74	15.24	0.004
C ₄ H ₈ O ₂	<i>n</i> -Бутановая кислота	107-92-6	88	18.82	0.072
C ₅ H ₁₀ O ₂	3-Метилбутановая кислота	503-74-2	102	21.80	0.004
C ₅ H ₁₀ O ₂	<i>n</i> -Пentanовая кислота	109-52-4	102	22.82	0.011
C ₆ H ₁₂ O ₂	<i>n</i> -Гексановая кислота	142-62-1	116	26.38	0.024
C ₇ H ₁₄ O ₂	<i>n</i> -Гептановая кислота	111-14-8	130	29.74	0.010
C ₈ H ₁₆ O ₂	<i>n</i> -Октановая кислота	124-07-2	144	32.86	0.021
C ₉ H ₁₈ O ₂	<i>n</i> -Нонановая кислота	112-05-0	158	36.15	0.020
C ₁₀ H ₂₀ O ₂	<i>n</i> -Декановая кислота	334-48-5	172	41.07	0.116
C ₁₁ H ₂₂ O ₂	<i>n</i> -Ундекановая кислота	112-37-8	186	48.76	0.004
C ₁₂ H ₂₄ O ₂	<i>n</i> -Додекановая кислота	143-07-7	200	61.07	0.025
C ₁₃ H ₂₆ O ₂	3-Метилдодекановая кислота	х	214	67.43	0.015
C ₁₄ H ₂₈ O ₂	<i>n</i> -Тетрадекановая кислота	544-63-8	228	110.29	0.044
Гетероциклические соединения					
<i>Диоксаны</i>					
C ₄ H ₈ O ₂	1,4-Диоксан	123-91-1	88	13.81	0.001
<i>Фураны</i>					
C ₄ H ₄ O	Фуран	110-00-9	68	7.26	0.012
C ₅ H ₆ O	2-Метилфуран	534-22-5	82	10.26	0.017
C ₅ H ₆ O	3-Метилфуран	930-27-8	82	10.56	0.002
C ₆ H ₈ O	2-Этилфуран	3208-16-0	96	12.71	0.001
C ₆ H ₈ O	3-Этилфуран	х	96	14.02	0.003
C ₆ H ₈ O	2,5-Диметилфуран	625-86-5	96	14.02	0.011
C ₆ H ₈ O	2,3-Диметилфуран	(458499)	96	14.44	<0.001
C ₆ H ₈ O	2,4-Диметилфуран	3710-43-8	96	15.34	<0.001
C ₇ H ₁₀ O	2-Пропилфуран	4229-91-8	110	18.69	0.002
C ₈ H ₁₂ O	2-Бутилфуран	4466-24-4	124	22.13	0.001
C ₉ H ₁₄ O	2-Пентилфуран	3777-69-3	138	25.93	0.002
C ₁₀ H ₁₆ O	2-Гексилфуран	3777-70-6	152	29.41	0.001
C ₁₁ H ₁₈ O	2-Гептилфуран	3777-71-7	166	32.64	0.001
C ₁₂ H ₂₀ O	2-Октилфуран	4179-38-8	180	36.14	0.001
Азотсодержащие соединения					
N ₂	Азот	7727-37-9	28	1.63	0.212
H ₃ N	Аммиак	7664-41-7	17	2.93	0.075
C ₂ H ₃ N	Ацетонитрил	75-05-8	41	7.03	0.064
C ₃ H ₅ N	Пропаргиламин	2450-71-7	55	9.64	0.001
C ₄ H ₅ N	Пиррол	109-97-7	67	14.67	0.006
C ₅ H ₅ N	Пиридин	110-86-1	79	16.32	0.004
C ₃ H ₅ NO ₂	2-Оксопропанамида	х	87	17.84	0.008
C ₆ H ₉ N	2,3-Диметил-1Н-пиррол	600-28-2	95	18.75	0.001
C ₆ H ₇ N	2-Метилпиридин	109-06-8	93	19.42	0.001
C ₆ H ₁₃ NO	1-Метил-3-пиперидинол	3554-74-3	115	25.83	0.007

1	2	3	4	5	6
C ₇ H ₁₁ N	1,2,5-Триметилпиррол	930-87-0	109	26.10	0.001
C ₈ H ₁₅ N	Октаннитрил	124-12-9	125	29.49	0.002
C ₄ H ₅ NO ₂	Сукцинимид	123-56-8	99	29.34	0.006
C ₉ H ₈ ClNO ₄	(2-Хлор-5-нитрофенил)метилловый эфир уксусной кислоты	303965-18-6	229	93.71	0.003
Серосодержащие соединения					
H ₂ S	Сероводород	7783-06-4	34	2.81	0.128
COS	Карбонилсульфид	463-58-1	60	3.36	0.029
O ₂ S	Диоксид серы	7446-09-5	64	5.03	1.084
CH ₄ S	Метантиол	74-93-1	48	5.51	0.024
CS ₂	Сероуглерод	75-15-0	76	7.83	0.178
C ₃ H ₈ S	Пропантиол	107-03-9	76	10.96	0.001
C ₄ H ₄ S	Тиофен	110-02-1	84	12.29	0.012
C ₂ H ₆ S ₂	Диметилдисульфид	624-92-0	94	15.35	0.001
C ₅ H ₆ S	2-Метилтиофен	554-14-3	98	16.47	0.009
C ₅ H ₆ S	3-Метилтиофен	616-44-4	98	16.82	0.016
C ₆ H ₈ S	2-Этилтиофен	872-55-9	112	20.57	0.003
C ₆ H ₈ S	3-Этилтиофен	1795-01-3	112	20.97	0.002
C ₇ H ₁₀ S	2-Пропилтиофен	1551-27-5	126	24.15	0.001
C ₇ H ₁₀ S	3-Пропилтиофен	х	126	24.43	0.003
C ₅ H ₄ OS	3-Тиофенкарбоксальдегид	498-62-4	112	25.23	0.002
C ₈ H ₁₂ S	2-(1,1-Диметилэтил)-тиофен	1689-78-7	140	26.94	0.003
C ₈ H ₁₂ S	2,5-Диэтилтиофен	5069-23-8	140	27.98	0.003
C ₈ H ₁₂ S	2-Бутилтиофен	1455-20-5	140	28.23	0.004
C ₆ H ₆ OS	5-Метил-2-тиофенкарбоксальдегид	13679-70-4	126	29.54	0.002
C ₉ H ₁₄ S	2-Пентилтиофен	4861-58-9	154	31.64	0.006
C ₁₀ H ₁₆ S	2-Гексилтиофен	18794-77-9	168	34.97	0.004
C ₁₁ H ₁₈ S	3-Гептилтиофен	х	182	39.50	0.009
C ₁₁ H ₁₈ S	2-Гептилтиофен	18794-78-0	182	39.90	0.012
C ₁₂ H ₂₀ S	2-Октилтиофен	880-36-4	196	46.40	0.015
Неорганические соединения					
<i>Оксиды</i>					
CO ₂	Диоксид углерода	124-38-9	44	1.90	53.880
H ₂ O	Вода	7732-18-5	18	3.08	35.997
<i>Благородные газы</i>					
Ar	Аргон	7440-37-1	40	1.62	0.011
<i>Другие соединения</i>					
CCl ₂ O	Карбонил дихлорид	75-44-5	98	4.95	0.014
Hg	Ртуть	7439-97-6	202	5.38	0.024
F ₄ Si	Тетрафторид кремния	7783-61-1	104	14.26	0.001

максимальные содержания (отн. %): азотсодержащих соединений (~10.5), галогенсодержащих соединений (~0.14), олефинов (~2.1), циклических алканов (~0.2), аренов (~1.4), спиртов и эфиров (~19.6), альдегидов (~6.4), кетонов (~3.5), карбоновых кислот (~5.1), ртути (~0.3). Отличительной особенностью этого флюида также является присутствие кремнийорганических соединений (в сумме до ~0.06 отн. %), которые не встречаются во включениях в кварце.

2. Во флюидных включениях в пирите законсервирован более водный флюид (H₂O до ~36.0 отн. %), содержащий максимальное количество углекислоты (~53.9 отн. %) и серосодержащих соединений (~1.6 отн. %). Для флюида включений в пирите также определены повышенные содержания (относи-

Таблица 4. Состав летучих, извлеченных при однократном механическом ударном разрушении минералов из золоторудных кварцевых жил на месторождении Советское, Енисейский край

Название	<i>MW</i>	Золото	Кварц	Пирит
Алифатические углеводороды:	—	3.87	4.15	1.20
Алканы (C ₄ -C ₁₈ H ₃₈)	16—254	1.82	3.47	1.09
Алкены (C ₂ H ₄ -C ₁₆ H ₃₂)	28—224	2.05	0.68	0.11
Циклические углеводороды:	—	1.56	1.00	0.35
Циклоалканы (нафтены) (C ₅ H ₁₀ -C ₆ H ₁₀)	70—82	0.20	0.01	0.01
Арены (C ₆ H ₆ -C ₁₅ H ₂₄)	78—204	1.36	0.96	0.32
Полициклические ароматические углеводороды (C ₁₀ H ₈ -C ₁₄ H ₁₀)	128—178	—	0.03	0.02
Кислородсодержащие углеводороды:	—	34.6	9.78	6.62
Спирты и эфиры (C ₄ H ₈ O-C ₁₄ H ₁₈ O ₄)	32—250	19.6	0.76	3.70
Альдегиды (C ₂ H ₄ O-C ₁₅ H ₃₀ O)	44—226	6.43	4.40	1.18
Кетоны (C ₃ H ₆ O- C ₁₅ H ₃₀ O)	58—226	3.47	1.51	0.97
Карбоновые кислоты (CH ₂ O ₂ -C ₁₅ H ₃₀ O ₂)	46—242	5.10	3.11	0.77
Гетероциклические соединения:	—	0.07	0.05	0.06
Диоксаны (C ₄ H ₈ O ₂)	88	—	0.01	0.01
Фураны (C ₄ H ₄ O-C ₁₂ H ₂₀ O)	68—180	0.07	0.04	0.05
Азотсодержащие соединения (N ₂ -C ₉ H ₈ ClNO ₄)	28—229	10.5	1.58	0.39
Серосодержащие соединения (H ₂ S-C ₁₃ H ₂₂ S)	34—210	1.0	1.49	1.55
CO ₂	44	47.8	37.3	53.9
H ₂ O	18	0.30	44.65	35.9
Карбонил дихлорид (CCl ₂ O)	98	0.01	—	0.01
Ртуть (Hg)	202	0.29	—	0.02
Количество определенных компонентов	—	143	211	207
CO ₂ /(H ₂ O+CO ₂)	—	0.9	0.5	0.6
CO ₂ /углеводороды	—	1.2	2.1	5.2
Σ(C ₅ -C ₁₂)/ Σ(C ₁ -C ₄)	—	240.25	0.40	1.32

Примечание. Относительные концентрации (отн. %) летучих компонентов в изучаемой смеси были получены методом нормализации площадей индивидуальных хроматографических пиков к общей площади всех пиков.

тельно кварца) спиртов и эфиров (~3.6 отн. %), а также присутствие галогенсодержащих парафинов (~0.003 отн. %), которые не встречаются в образцах золота и кварца.

3. Флюид из включений в кварце наиболее обогащен водой (~44.5 отн. %) и содержит минимальное количество углекислоты (~37.3 отн. %). Для этого флюида также характерно максимальное содержание парафинов (~3.5 отн. %). Относительно образца пирита флюид обогащен (отн. %): олефинами (~0.6), аренами (~1.0), альдегидами (~4.4), кетонами (~1.5), карбоновыми кислотами (~3.1) и азотсодержащими соединениями (~1.6).

4. Отличительной особенностью флюидов из включений в пирите и кварце является присутствие полициклических ароматических углеводородов на уровне 0.0n отн. % и диоксанов на уровне 0.00n отн. %, не встреченных в образце золота.

5. В качестве главной особенности рудоносного флюида при формировании Советского золоторудного месторождения можно рассматривать активное участие углеводородов, в том числе и высокомолекулярных, в транспортировке золота. Выявление таких флюидов на основе термобарогеохимического и хромато-масс-спектрометрического картирования кварцево-жильных зон — один из наиболее перспективных путей для осуществления прогноза в них золоторудного объекта.

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИР ИГМ СО РАН 0330-2019-0005 и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90050.

ЛИТЕРАТУРА

Ахмадуллина Н.С., Чураков А.В., Ретинев В.М., Санду Р.А., Шишилов О.Н. Хлоридные и ацетатные комплексы золота (III) с бипиридином и фенантролином // Координационная химия, 2012, т. 38, № 9, с. 611—617.

Бабкин П.В., Куклин А.П. К вопросу о газовых пузырьках в самородном золоте // Генетические особенности и общие закономерности развития золотой минерализации Дальнего Востока. М., Наука, 1966, с. 196—200.

Богданович В.А. Новые данные о строении Советского золоторудного месторождения // Геология и геофизика, 1962 (7), с. 87—96.

Богданович В.А. О структурном контроле золотого оруденения Советского месторождения. // Геология и геофизика, 1964 (12), с. 72—81.

Бондар Р.А., Наумко И.М., Любчак А.В., Хоха Ю.В. К вопросу о формах переноса благородных и редкометалльных металлов в зоны рудоотложения месторождений золота // Самородное золото, типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований. М., ИГЕМ РАН, 2010, т. 1, с. 76—78.

Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Раздолина И.В. Генезис золото-кварцевого месторождения Чармитан (Узбекистан) // Геология рудных месторождений, 1996, т. 38, № 3, с. 238—256.

Буряк В.Н. Метаморфизм и рудообразование. М., Недра, 1982, 256 с.

Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в проблеме миграции рудного вещества. М., Наука, 1989, 152 с.

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

Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (1), с. 35—52.

Гапон А.Е. Некоторые данные о газовых и жидких включениях в самородном золоте // Зап. Вост.-Сиб. отделения ВМО, 1962, вып. 4, с. 192—196.

Горбатый Ю.Е., Бондаренко Г.В. Сверхкритическое состояние воды // Сверхкритические флюиды: теория и практика, 2007, т. 2, № 2, с. 5—19.

Жемчужный С.Ф. Физико-химическое исследование золотых самородков в связи с вопросом об их генезисе // Известия Института физ.-хим. анализа. Петроград, 1922, т. 2, вып. 1, с. 5—28.

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.

Кокин А.В. Термобарометрия самородного золота и его минералов-спутников // Геология и геофизика, 1981 (5), с. 74—79.

Кряжев С.Г. Изотопно-геохимический режим формирования золоторудного месторождения Мурнтау. М., ЦНИГРИ, 2002, 91 с.

Кряжев С.Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах: Автореф. дис.... д.г.-м.н., М., ЦНИГРИ, 2017, 52 с.

Левицкий Ю.Т., Неронский Г.И., Скабелкин А.В., Пантаев А.Д. Визуально-фотографическое определение температур декрепитации // Термобарогеохимия эндогенных процессов. Благовещенск, ДВНЦ АН СССР, 1984, с. 149—150.

Летников Ф.А., Шумилова Т.Г., Медведев В.Я., Иванова Л.А. Транспорт и кристаллизация самородной платины в условиях сверхкритического C-O-H флюида // ДАН, 2018, т. 479, № 4, с. 430—432.

Ли Л.В. Золоторудные месторождения докембрия Енисейского кряжа // Геология и полезные ископаемые Центральной Сибири. Красноярск, КНИИГиМС, 1997, с. 184—222.

Ляхов Ю.В., Павлунь Н.Н. Некоторые геолого-геохимические особенности процессов золото-концентрации в метаморфогенно-гидротермальных и магматогенно-гидротермальных минералообразующих системах // Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений. М., ИГЕМ РАН, 2013, с. 144.

Малышев А.И. Газовая диффузия в эволюции магматических систем // ДАН, 2008, т. 422, № 2, с. 233—235.

Марчук М.В. Экспериментальное изучение процесса переноса петрогенных и рудных компонентов в восстановленных флюидах: Автореф. дис.... к.г.-м.н., Иркутск, ИЗК СО РАН, 2008, 15 с.

Миронова О.Ф. Летучие компоненты природных флюидов по данным изучения включений в минералах: методы и результаты // Геохимия, 2010, №1, с. 89—97.

Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М., Недра, 1977, 304 с.

Неронский Г.И., Левицкий Ю.Т. Газово-жидкие включения в самородном золоте и их структурное положение // Минералообразующие флюиды и рудогенез. Киев, Наук. думка, 1988, с. 137—140.

Неронский Г.И., Левицкий Ю.Т., Остапенко Н.С., Белоусов В.И. К вопросу о термовакuumной декрепитации золота // Термобарогеохимия в геологии. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1982, с. 165—170.

- Николаева Л.А.** Газовые включения в самородном золоте // Зап. ВМО, 1954, ч. 83, вып. 4, с. 401—402.
- Новгородова М.И.** Самородные металлы в гидротермальных рудах. М., Наука, 1983, 286 с.
- Остапенко Н.С.** О температурах декрепитации и составе газовой-жидких включений в самородном золоте // Геология, минералогия и геохимия благородных металлов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1989, с. 69—77.
- Остапенко Н.С., Левицкий Ю.Т., Шахрай С.А.** К оценке температур декрепитации минералов по термобарограммам // Минералообразующие флюиды и рудогенез. Киев, Наук. думка, 1988, с. 229—237.
- Паддефет Р.** Химия золота. М., Мир, 1982, 259 с.
- Петровская Н.В.** Некоторые особенности внутрирудного метаморфизма золото-кварцевых образований на примере месторождений Енисейского кряжа // Труды Института «НИГРИЗОЛОТО», 1956, вып. 21, с. 3—45.
- Петровская Н.В.** Самородное золото. М., Наука, 1973, 345 с.
- Петровская Н.В.** Золотые самородки. М., Наука, 1993, 191 с.
- Петровская Н.В., Новгородова М.И., Цепин А.И.** О химическом составе реликтов минералообразующей среды в самородном золоте // Геология рудных месторождений, 1975, № 5, с. 53—61.
- Петровская Н.В., Элинсон М.М., Николаева Л.А.** Состав и условия образования газовых включений в самородном золоте // Международный геохимический конгресс. Гидротермальные процессы. Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1971, с. 441—451.
- Рябчиков И.Л., Новгородова М.И.** Восстановленные флюиды в гидротермальном рудообразовании // Докл. АН СССР, 1981, т. 258, № 6, с. 1453—1456.
- Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю.** Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранд // Геология рудных месторождений, 2006, т. 48, № 6, с. 475—511.
- Семенко В.А.** Новые данные о составе газовой-жидких включений в самородном золоте // Термобарогеохимия эндогенных процессов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1986, с. 108—110.
- Симкин Г.С.** Геологическая позиция и перспективы Советского золоторудного месторождения // Руды и металлы, 1997, № 2, с. 57—72.
- Слободской Р.М.** Элементоорганические соединения в магматических и рудообразующих процессах. Новосибирск, Наука, 1981, 134 с.
- Спиридонов Э.М.** Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН, «Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов». Апатиты, Изд-во К & М, 2010, с. 143—171.
- Тейлор Л., Миллер Л.** Сверхкритическая флюидная хроматография с насадочными колонками // Сверхкритические флюиды. Теория и практика, 2011, т. 6, № 1, с. 69—83.
- 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.
- Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Травин А.В.** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст серицитов из золотоносных и безрудных кварцево-жильных зон Советского месторождения, Енисейский кряж, Россия // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Т. 2. М., ГЕОС, 2006, с. 345—349.
- Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Козьменко О.А., Палесский С.В., Николаева И.В.** Лантаноиды во флюидных включениях, кварце и зеленых сланцах из золотоносных и безрудных кварцево-жильных зон Советского кварц-золоторудного месторождения, Енисейский кряж, Россия // Геохимия, 2008, № 4, с. 438—444.
- Эйриш Л.В.** Металлогения золота Приамурья (Амурская обл.) Владивосток, Дальнаука, 2002, 194 с.
- Эльшенбройх К.** Металлоорганическая химия. М., БИНОМ, 2011, 746 с.
- Ярошевский А.А.** О возможных геохимических условиях формирования локальных восстановительных обстановок в земной коре и верхней мантии // Геохимия, 2006, № 3, с. 345—346.
- Archibald S.M., Migdisov A.A., Williams-Jones A.E.** The stability of Au-chloride complexes in water vapor at elevated temperatures and pressure // Geochim. Cosmochim. Acta, 2001, v. 65, p. 4413—4423.
- Gizé A.F.** Organic alteration in hydrothermal sulfide ore deposits // Econ. Geol., 1999, v. 94, p. 967—980.
- Gizé A.F., Macdonald R.** Generation of compositionally atypical hydrocarbons in CO₂-rich geologic environment // Geology, 1993, v. 21, p. 129—132.

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

Jia Y., Kerrich R. A fluid inclusion study of Au-bearing quartz vein systems in the Central and North Deborah deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia // *Econ. Geol.*, 2000, v. 95, p. 467—494.

Krauskopf K.B. Separation of manganese from iron in sedimentary processes // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1957, v. 12, p. 61—84.

Mathez E.A., Dietrich V.J., Irving A.J. The geochemistry of carbon in mantle peridotites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, v. 48, p. 1849—1859.

Migdisov A.A., Guo X., Xu H., Williams-Jones A.E., Sun C.J., Vasyukova O., Sugiyama I., Fuchs S., Pearce K., Roback R. Hydrocarbons as ore fluids // *Geochem. Persp. Lett.*, 2017, v. 5, p. 47—52.

Robert F., Kelly W.C. Ore-forming fluids in Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma Mine, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada // *Econ. Geol.*, 1987, v. 82, p. 1464—1482.

Ronde C.E.J., Faure K., Bray C.J., Whitford D. Round Hill shear zone-hosted gold deposit, Macraes Flat, Otago, New Zealand: evidence of a magmatic ore fluid // *Econ. Geol.*, 2000, v. 95, p. 1025—1048.

Savage P.E., Gopalan S., Mizan T.I., Martino C.J., Brock E.E. Reactions at supercritical conditions: applications and fundamentals // *AIChE J.*, 1995, v. 41, № 7, p. 1723—1778.

Schoell M. Multiple origins of methane in the Earth // *Chem. Geol.*, 1988, v. 71, p. 1—10.

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

Sokol A.G., Palyanov Y.N., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Palyanova G.A. Carbon and nitrogen speciation in nitrogen-rich C-O-H-N fluids at 5.5—7.8 GPa // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2017, v. 460, p. 234—243.

Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dallai I. Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia) // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, № 2, p. 375—394.

Tomilenko A.A., Chepurov A.I., Sonin V.M., Bulbak 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 Press.*, 2015, v. 44, p. 451—465.

Tomilenko A., Sonin V., Bul'bak T., Chepurov A. Composition of volatile components in the polycrystalline CVD diamond (by coupled gas chromatographic–mass spectrometric analysis) // *Carbon Lett.*, 2019, v. 29, p. 327—336.

Ulrich T., Günther D., Heinrich C.A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits // *Nature*, 1999, v. 399, p. 676—679.

Williams-Jones A.E., Heinrich C.A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // *Econ. Geol.*, 2005, v. 100, p. 1287—1312.

Williams-Jones A.E., Bowell R.J., Migdisov A.A. Gold in solution // *Element*, 2009, v. 5, p. 281—287.

*Рекомендована к печати 7 мая 2020 г.
В.Н. Шарповым*

*Поступила в редакцию 29 июля 2019 г.,
после доработки — 14 апреля 2020 г.*