

Научная статья
УДК 553.411 (571.1)
doi: 10.17223/25421379/23/2

ОСОБЕННОСТИ ОРОГЕННОГО ЗОЛОТО-КВАРЦЕВОГО ОРУДЕНЕНИЯ ФЕДОРОВСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО ПОЛЯ (ГОРНАЯ ШОРИЯ) НА ПРИМЕРЕ ЛАЗАРЕТНОГО И ФЕДОРОВСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЙ



Владислав Владимирович Колпаков¹, Петр Александрович Неволько²,
Анна Андреевна Редина³, Юрий Олегович Редин⁴

^{1, 2, 3, 4} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

¹ vladk@igm.nsc.ru

² nevolko@igm.nsc.ru

³ redina@igm.nsc.ru

⁴ redin@igm.nsc.ru

Аннотация. На примере двух объектов золото-кварцевого сульфидного типа Федоровского рудного поля показаны различия минерального, вещественного состава и особенностей формирования метаморфогенно-гидротермального Лазаретного рудопроявления в существенно черносланцевых толщах и магматогенно-метаморфогенного Федоровского. На последнем важным источником золота явились девонские дайки долеритов, вероятно, парагенетически связанные со становлением Федоровской гранитоидной интрузии (D₁).

Ключевые слова: золото-кварцевое оруденение, минеральные ассоциации, геохимический профиль, условия формирования

Благодарности: Авторы выражают благодарности генеральному директору ООО «Тэтис-Т» А.Е. Аввакумову за предоставленную возможность использовать для написания статьи результаты ICP-MS анализа пород и руд, карты и разрезы, а также сотрудникам ИГМ СО РАН В.П. Мокрушикову и А.В. Малютиной за проведенное определение возраста гранодиоритов по циркону.

Источник финансирования: Работа выполнена по Государственному заданию ИГМ СО РАН.

Для цитирования: Колпаков В.В., Неволько П.А., Редина А.А., Редин Ю.О. Особенности орогенного золото-кварцевого оруденения Федоровского рудно-россыпного поля (Горная Шория) на примере Лазаретного и Федоровского рудопроявлений // Геосферные исследования. 2022. № 2. С. 23–46. doi: 10.17223/25421379/23/2

Original article
doi: 10.17223/25421379/23/2

FEATURES OF OROGENIC GOLD-QUARTZ MINERALIZATION OF THE FEDOROVSKY ORE-PLACER FIELD (GORNAYA SHORIYA) ON THE EXAMPLE OF LAZARETNY AND FEDOROVSKY ORE OCCURRENCES

Vladislav V. Kolpakov¹, Petr A. Nevolko², Anna A. Redina³, Yury O. Redin⁴

^{1, 2, 3, 4} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

¹ vladk@igm.nsc.ru

² nevolko@igm.nsc.ru

³ redina@igm.nsc.ru

⁴ redin@igm.nsc.ru

Abstract. New mineralogical-geochemical and thermobarogeochemical data on the nature and conditions of the formation of orogenic gold-quartz mineralization of the Lazaretny and Fedorovsky ore occurrences were derived. They are localized in the identical geological structure, however differ in their content composition and genesis. Both objects were an important source of native gold from the Fedorovka River placer, the largest placer in Gornaya Shoria, and deserve to be studied. The aim of the study is to identify the genetic features of gold mineralization that caused such significant mineralogical and geochemical

differences. The age of mineralization ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ by the sericite method) and the age of granodiorites of the Fedorovskaya intrusion (U-Pb by the zircon method) were determined to clarify the role of the intrusion in the formation of gold mineralization. The gold mineralization is concluded in the long-lived tectonic zone at the northern face of the Mrassky anticlinorium. It is represented by vein-metasomatic linear zones among essentially black-shale deposits and volcanogenic rocks V- C_1 metamorphosed in the green-shale facies. The gold mineralization is located near dikes and sills of gabbro-dolerites of C_1 and D_{1-2} ages. It was formed as a result of tectonic processes associated with the closure of the Paleoasiatic Ocean at the end of C_1 . Mineral associations and geochemical profiles of mineralization indicate the metamorphogenic-hydrothermal (Au-As) character of the Lazaretny ore occurrence and the magmatogenic-metamorphogenic (Au, Ag, Te, Ba, Se, As, Sb, Pb, W, Bi, Cr, Ni) Fedorovsky. The first has a simple mineral composition and is formed in 2 stages: pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite and chalcopryrite-sphalerite-tetrahedrite. Native gold is small and fine, has relatively high fineness, it is found both in quartz veins and in metasomatites. The Fedorovsky ore occurrence has an early pyrite-pyrrhotite and a late, sulfide-sulfosol-sulfotelluride productive stage of mineralization. Native gold is larger, lower fineness, associated with low-temperature minerals (hessite, argentite, freibergite, pyrrargyrite, polybasite, etc.). Instead of arsenopyrite, gersdorffite is found in the ores. The main amount of gold is found in quartz veins. The study of gas-liquid inclusions in quartz by cryothermometry and Raman spectroscopy showed that the gold mineralization was formed at a temperature of 190–275 °C by weakly concentrated NaCl solutions (3.3–6.6 wt.% NaCl-eq.). The gas phase of the inclusions consists of CO_2 and N_2 , with a small amount of CH_4 . CO_2 predominates over N_2 . If carbonaceous shales predominate among the rocks containing mineralization, then there is a weak direct correlation between the increased N_2 content in the inclusions and gold in the sample. The age of the gold mineralization is very different from the age of the granodiorites: 322 ± 4 – 291 ± 1.3 million years (C_2 - P_1) and 410 ± 1.5 million years (D_1), but the gold-bearing devonian dolerite dikes, probably paragenetically related to granodiorites, played an important ore-forming role in the Fedorovsky ore occurrence. The dikes were an important source of gold during the metamorphogenic-hydrothermal ore formation in the period from C_2 to P_1 , which caused the magmatogenic-metamorphogenic character of gold mineralization.

Keywords: gold-quartz mineralization, mineral associations, geochemical profile, formation conditions

Acknowledgments: The authors are grateful to the General Director of Tetis-T LLC A.E. Avvakumov for the opportunity to use the results of ICP-MS analysis of rocks and ores, maps and cross-sections for this article.

Source of financing: This study is done on state assignment of IGM SB RAS.

For citation: Kolpakov, V.V., Nevolko, P.A., Redina, A.A., Redin, Y.O. (2022) Features of orogenic gold-quartz mineralization of the Fedorovsky ore-placer field (Gornaya Shoriya) on the example of Lazaretny and Fedorovsky ore occurrences. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 23–46. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/23/2

Введение

Федоровское рудно-россыпное поле расположено в восточной части Ортон-Федоровского рудно-россыпного узла и включает в себя Лазаретное, Федоровское рудопоявления и отработанные россыпи р. Федоровки и нескольких ее притоков. Россыпь р. Федоровки, известная с 1836 г., является крупнейшей в Горной Шории, из нее добыто более 10 т золота [Щербаков и др., 2003]. Отработка россыпи стимулировала геологическое изучение площади, им, в частности, занимались В.А. Обручев (1910) и Ю.А. Кузнецов (1933). Первая Государственная геологическая съемка масштаба 1:200 000 проведена в 1950-е гг. В дальнейшем поисково-разведочные работы производились Красноярским (1956–1964), Западно-Сибирским (1974, 1975, 1990–1993) геологическими управлениями, В.В. Сыроватским (1969–1973) и др. В результате этих работ выявлены Федоровский, Калмыкский, Лазаретный, Сенной золоторудные участки. Наиболее перспективным считалось Федоровское рудопоявление, однако все попытки перевести его в ранг месторождения не увенчались успехом. Одной из причин этого явилось сложное пространственное расположение рудных тел и крайне

неравномерное распределение в них золота (3-я категория сложности), что затрудняет разведку и добычу.

В 2012–2014 гг. ООО «Тэтис-Т» (Новокузнецк) в рамках Госзадания проводило поисковые работы на золото в Ортон-Федоровском рудно-россыпном узле, в том числе на Лазаретном рудопоявлении. Авторы статьи принимали в них участие в качестве субподрядчиков от Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, что позволило собрать представительный фактический материал. Приводимые в данной статье фактические и аналитические данные касаются в основном Лазаретного рудопоявления. Федоровское подробно охарактеризовано Ю.Г. Щербаковым и др. [2003] и рассматривается кратко (с учетом новых данных), в качестве примера золотого оруденения несколько другого генезиса в этой же геологической структуре.

По геолого-генетической промышленной классификации орогенных месторождений [Горячев, 2019], Лазаретное и Федоровское рудопоявления относятся к золото-кварцевому, а по классификации Н.В. Петровской [1973] – к золото-сульфидно-кварцевому убогосульфидному типу. В связи с генетическими особенностями они различаются по вещественному составу руд, крупности и пробности самородного

золота. Оруденение, проявленное на обоих объектах, явилось источником золота россыпи р. Федоровки и, несмотря на пока небольшую практическую значимость, заслуживает внимания. Цель данной статьи – установление характера и особенностей формирования золотого оруденения. Изучены минеральный и вещественный состав руд (по керну скважин и поверхностным горным выработкам), а также газожидкие включения в рудном кварце. Определены возраста золотого оруденения на Лазаретном рудопроявлении и гранодиоритов близрасположенной Федоровской интрузии.

Краткие сведения о геологическом строении и золотом оруденении района

Район приурочен к Ортогскому тектоническому блоку, являющемуся частью Мартайгинско-Верхне-лебедской структурно-формационной зоны Кузнецкого Алатау, вмещающей значительную часть золотого оруденения [Алабин, Калинин, 1999]. Блок сложен сильно дислоцированными вулканогенно-осадочными породами ($V-C_1$), с юга ограничен Мрасским антиклинорием, а с запада и востока – Кузнецко-Алтайским и Балыксинским региональными разломами (рис. 1).

В истории тектонического развития территории выделяются байкальская (R_3), раннекаледонская (R_3-O_1), позднекаледонско-герцинская (O_1-P_3) и более молодые эпохи складчатости. В период C_2-O_1 окончательно сформировалось блоковое строение, произошло внедрение гранитоидных массивов, вдоль Кузнецко-Алтайского разлома образовался главный золото-рудный пояс Кузнецкого Алатау шириной 30–60 км. С O_1 по D_1 существовал режим пассивной, а в D_{1-2} – активной континентальной окраины, последний также сопровождался гранитоидным магматизмом. В конце C_1 произошло закрытие палеоазиатского океана, что привело к коллизионным событиям. В дальнейшем развитие территории происходило в континентальном режиме [Юрьев и др., 2001].

В геологическом строении рудного поля принимают участие породы верхнеунушкольской свиты ($V-C_{1us2}$) и Кундусуюльского габбро-диорит-гранодиорит-долеритового комплекса (mvC_1k). Породы прорываются Федоровской интрузией (штоком) гранодиоритов, относимой [Юрьев и др., 2001] ко второй фазе внедрения гранитоидов садринского комплекса ($удC_3-O_1s$).

Отложения верхнеунушкольской свиты представлены углеродисто-глинистыми, углеродисто-кремнистыми сланцами, темными тонкослоистыми известняками с разным количеством органического вещества в слойках и – в подчиненном количестве –

песчаниками, лавами и туфами средне-основного состава. Отложения формировались в глубоководных условиях. Сланцы и известняки часто содержат вкрапленность пирита. Углеродистые сланцы имеют кварц-хлорит-серицит-карбонатный состав, иногда встречаются редкие зерна альбита, среди слюдистых минералов преобладает серицит. Углеродистое вещество отмечается как в распыленном по массе породы виде, так и группируется в виде субсогласных мелких полосок, тонких просечек и секущих жилков. Количество $C_{орг}$ составляет 1–3 %. Отложения вмещают послойные или слабо секущие силлы и дайки габбро-долеритов кундусуюльского комплекса, относимого к офиолитовой ассоциации [Юрьев и др., 2001] и прорываются девонскими дайками долеритов. Вся пачка $V-C_1$ пород имеет крутое северо-западное падение и метаморфизована в условиях зеленосланцевой фации. Господствующее простирание геологических структур северо-восточное, параллельное разломам, оперяющим главный Кузнецко-Алтайский.

Золотоносные жильно-метасоматические зоны Лазаретного рудопроявления приурочены к линейным зонам смятия и рассланцевания вулканогенно-осадочных пород северо-восточного простирания. Рудные зоны штокверкового типа, крутопадающие, субсогласные или слабо секущие по отношению к залеганию вмещающих пород, прослежены на 2 км по простиранию и на 70–200 м по падению при мощности до 40 м. Ресурсы золота северо-восточной части рудных зон оценены в 1,5 раза выше, чем юго-западной. Оруденение тяготеет к дайкам и силлам кундусуюльского комплекса и локализуется вблизи них (рис. 2). Метасоматиты развиты в основном по дайкам, редко – по осадочным породам. В состав метасоматитов входят кварц, кальцит, доломит, анкерит, серицит, парагонит, хлорит, альбит, пирит. Перечисленные минералы присутствуют и в кварцевых жилах и линзах, мощность которых достигает 1,5 м. Кварц образует по меньшей мере две генерации: молочно-белый и цементирующий его серый и темно-серый. Содержание сульфидов в кварцевых жилах не превышает 1 %, в метасоматитах может достигать 3–5 %. Рудные минералы представлены пиритом, арсенопиритом, халькопиритом, пирротинном, реже – сульфоарсенидами Fe, Co, Ni, сфалеритом, тетраэдритом $(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$. Содержания Au в рудах низкие, чаще всего это десятые доли г/т, редко до 3–5 г/т, самородное золото находится как в кварцевых жилах, так и в метасоматитах. Вмещающие породы существенно черносланцевые. По описанию керна скважин углеродистые сланцы составляют 50 % разреза, габбро-долериты – 35 %, известняки – 10 %, глинистые сланцы – 5 %.

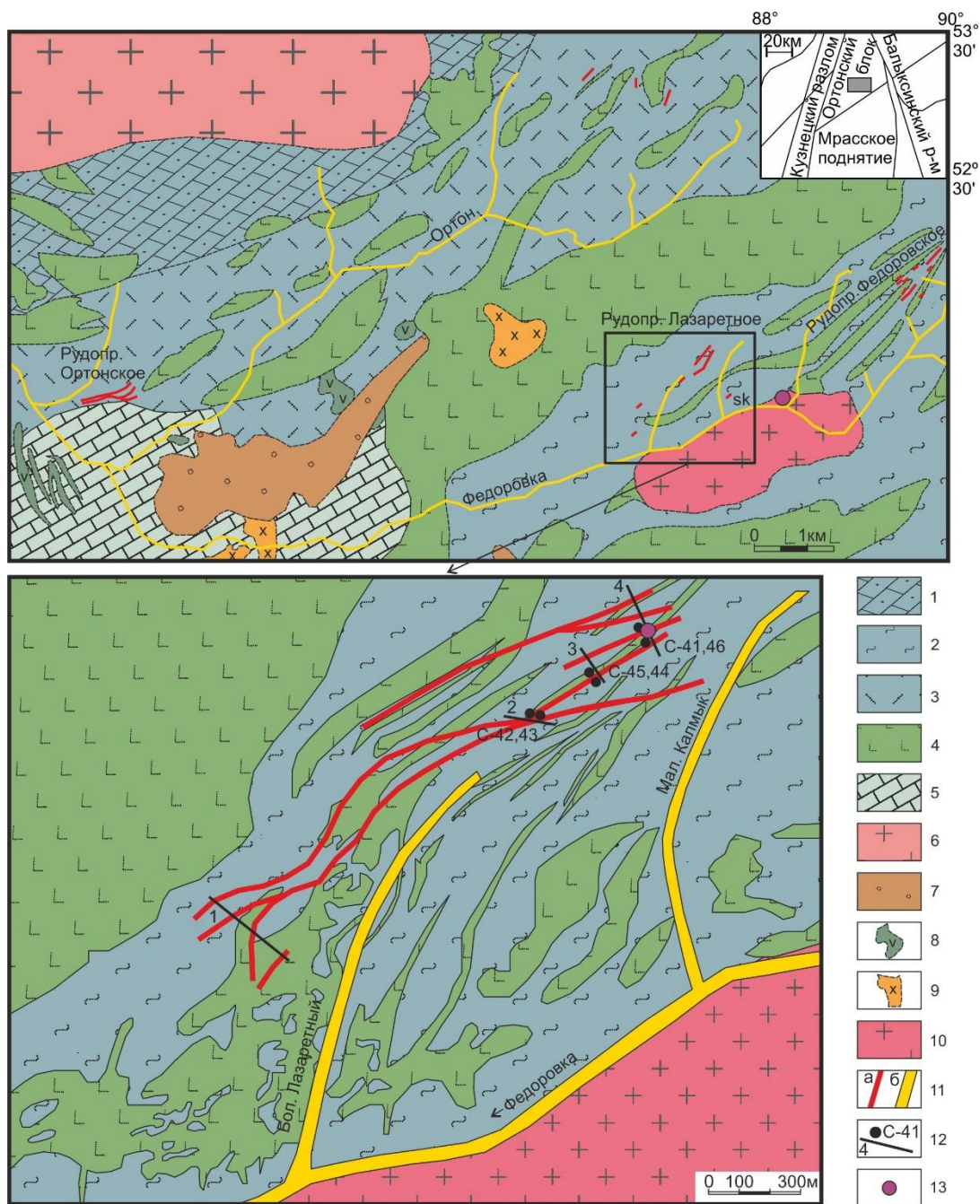


Рис. 1. Схема геологического строения района

1 – унушкольская свита, нижняя подсвита (V- ϵ_{1us1}): известняки, доломиты, песчаники, сланцы углеродисто-глинистые, кремнистые; 2 – унушкольская свита, верхняя подсвита (V- ϵ_{1us2}): сланцы углеродисто-глинистые, кремнистые, известняки, песчаники, лавы и туфы средне-основного состава; 3 – усть-анзасская свита (V- ϵ_{1un}): базальты, их туфы, сланцы углеродисто-глинисто-кремнистые, известняки; 4 – Кундусуюльский габбро-диорит-гранодиорит-долеритовый комплекс (mv ϵ_{1k}); 5 – мазасская свита (ϵ_{1mz}): известняки, доломиты; 6 – Садринский комплекс, Восточно-Ортонский гранодиоритовый массив (ϵ_2); 7 – усть-кундусуюльская свита (D $_{1uk}$): песчаники, алевролиты; 8 – габброиды патынского комплекса (vD $_{1p}$); 9 – кварцевые монзониты, монцодиориты патынского комплекса ($\mu\delta D_{1p}$); 10 – Федоровская интрузия, гранодиориты тельбесского? комплекса (D $_1$); 11 – рудные зоны (а) и отработанные россыпи золота (б); 12 – скважины и каналы; 13 – места отбора проб на возраст золотого оруденения и гранодиоритов

Fig. 1. Geological structure of the region

1 – unushkol formation, lower sub-formation (V- ϵ_{1us1}): limestones, dolomites, sandstones, carbonaceous-clay, siliceous shales; 2 – unushkol formation, upper sub-formation (V- ϵ_{1us2}): carbonaceous-clay, siliceous shales, limestones, sandstones, lavas and tuffs of medium-basic composition; 3 – ust-anzas formation (V- ϵ_{1un}): basalts, their tuffs, carbonaceous-clay-siliceous shales, limestones; 4 – Kundusuyul gabbro-diorite-granodiorite-dolerite complex (mv ϵ_{1k}); 5 – mazas formation (ϵ_{1mz}): limestones, dolomites; 6 – Sadrin complex, East-Orton granodiorite massif (ϵ_2); 7 – ust-kundusuyul formation (D $_{1uk}$): sandstones, siltstones; 8 – gabbroids of the patyn complex (vD $_{1p}$); 9 – quartz monzonites, monzodiorites of the patyn complex ($\mu\delta D_{1p}$); 10 – Fedorovskiy intrusion, granodiorites of the telbessky? complex (D $_1$); 11 – ore zones (a) and worked placers of gold (b); 12 – drill holes and trenches; 13 – sampling sites for the age of gold mineralization and granodiorites

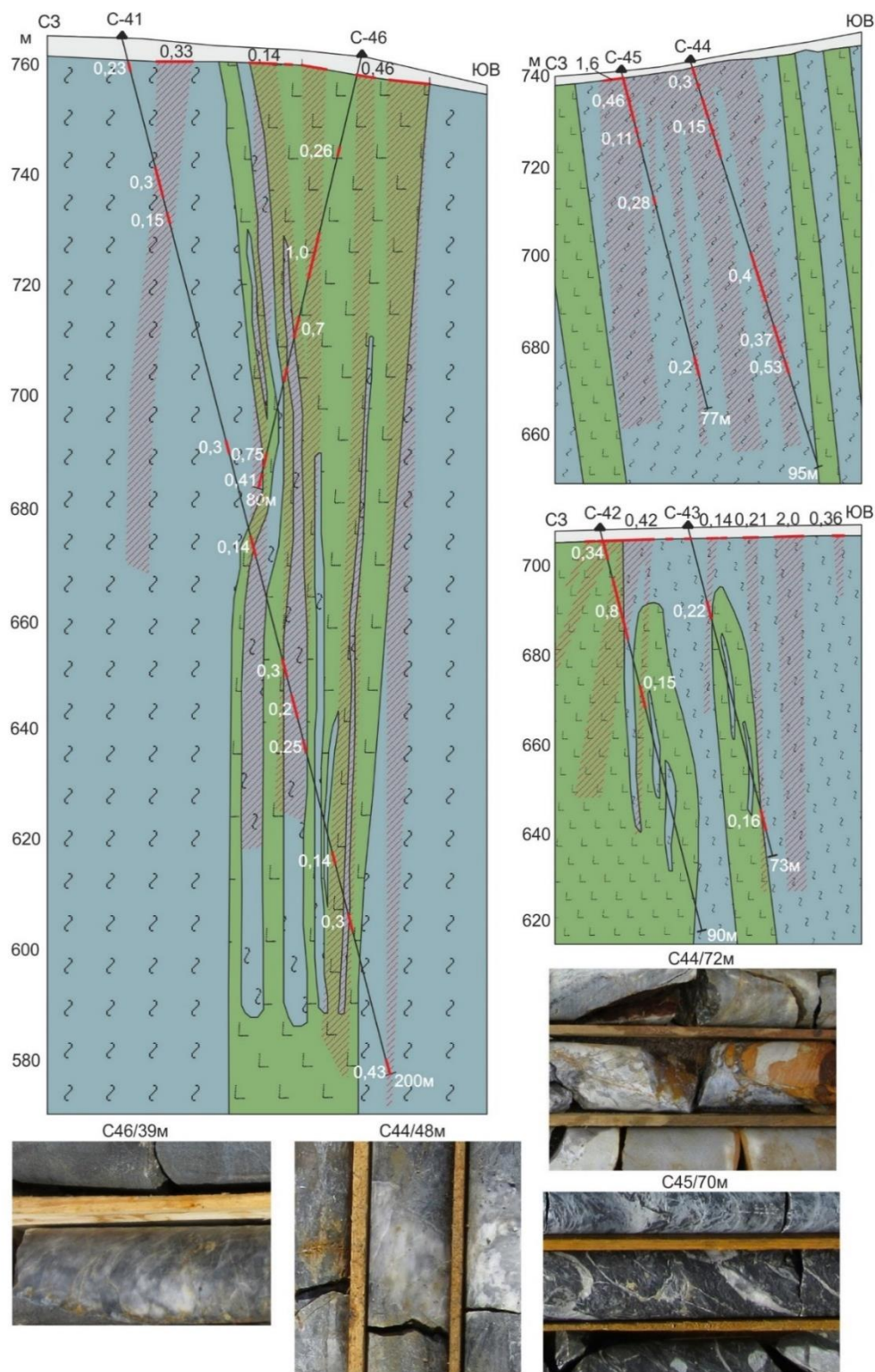


Рис. 2. Геологические разрезы по линиям скважин и фотографии керна

Цифрами на разрезах показаны содержания золота (г/т) в кернах на выделенные интервалы. Фотографии керна: C44/48м – кварцевая жила в черных сланцах, содержание Au 1 г/т; C44/72м – контакт черных сланцев и известняка, содержание Au 0,5 г/т, коричневое – анкерит; C45/70м – черные сланцы с прожилками кварца, содержание Au 0,2 г/т; C46/39м – кварцевая жила в долерите, содержание Au 1,5 г/т. Диаметр керна 45 мм

Fig. 2. Geological cross sections by lines of drill holes and the drill samples photos

The numbers on the cross sections show the gold content (ppm) in the drill samples on the selected intervals. Kern photos: C44/48m – quartz vein in black shales, Au content – 1 ppm; C44/72m – contact of black shales and limestone, Au content – 0,5 ppm, brown – ankerite; C45/70m – black shales with quartz veins, Au content – 0,2 ppm; C46/39m – quartz vein in dolerite, Au content – 1,5 ppm. The kern diameter is 45 mm

Условия локализации Федоровского рудопоявления можно охарактеризовать на примере Стержневой жильно-метасоматической зоны, прослеженной на 2 км по простиранию. На ее пересечении штольной последовательность пород следующая: тонкоплитчатые и полосчатые мраморизованные известняки (70 м), вмещающие три дайки долеритов, – мощное тело долеритов (50 м) с крупнозернистым габбро (15 м) в центре – рудовмещающие кварц-хлорит-серицит-полевошпат-карбонатные углеродизированные сланцы (20 м) с золотоносной кварцевой жилой вдоль контакта с телом долеритов – дайка долеритов – известняки.

Простирание рудной зоны преимущественно северо-восточное, падение пород крутое, северо-западное, до северного. Рудоносная сланцевая пачка вмещает силлы габбро-долеритов и совпадает с разломом. Породы пересекаются дайками девонских долеритов ССВ простирания и разбиты со смещением более поздними субширотными разломами. Породы сложно деформированы и гидротермально изменены, кварцевая жила будинирована и имеет среднюю мощность 0,7 м. Кварц белого, серого и темно-серого цвета, в приальбандовых частях жилы из-за захвата вмещающих пород имеет полосчатую текстуру. Обычные содержания золота в кварцевых жилах и метасоматитах составляют 0,5–2 г/т, в бонанцах они могут быть очень высокими. Бонанцы приурочены к участкам пересечения рудной зоны дайками и разломами и локализуются в кварцевых жилах, залегающих между сланцами и дайками или силлами.

Содержание рудных минералов в кварцевых жилах менее 1 %, в метасоматитах – до 5 %. Преобладающий рудный минерал – пирит, остальные распространены широко, но в очень малых количествах, – это халькопирит, пирротин, герсдорфит NiAsS , миллерит NiS , пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$, рутил, кубанит CuFe_2S_3 , сфалерит, галенит, арсенопирит, монацит, флоренсит $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$, гессит Ag_2Te , аргентит Ag_2S , фрайбергит $(\text{Ag}, \text{Cu})_{8,6-10,4}\text{Fe}_{1,5}\text{Sb}_4\text{S}_{11-12}$, пираргирит Ag_3SbS_3 , полибазит $(\text{Ag}, \text{Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$, Ag-Sb сульфотеллурид $\text{Ag}_{10}\text{SbTe}_3\text{S}_3$.

Федоровская интрузия располагается в 1,5–2,5 км от рудных зон, и, как отмечают Ю.Г. Щербаков и др. [2003], ее становление сыграло важную роль в формировании золотого оруденения. К экзоконтакту Федоровской интрузии приурочено рудопоявление золота (0,84 г/т) в гранат-волластонитовых скарнах, в левом борту приустьевой части рч. Мал. Калмык [Юрьев и др., 2001].

Методы исследования

Образцы пород и руд были получены из керна скважин колонкового бурения с различных горизон-

тов, а также из поверхностных горных выработок. Их минеральный состав, текстурно-структурные особенности и взаимоотношения между минералами изучались в шлифах под оптическим и электронным (MIRA 3 LMU, Tescan Ltd, с системой микроанализа INCA Energy 450 XMax 80, Oxford Instruments Ltd–NanoAnalysis Ltd, с термополевой эмиссией) микроскопами. Самородное золото получено путем промывки рыхлых элювиальных отложений, вскрытых канавами, а из керна скважин – промывкой после предварительного его дробления.

Химический состав сульфидов и самородного золота определен на микрозондах JXA-8100 (аналитик В.Н. Королюк) и Camebax-micro (аналитик О.С. Хмельникова). Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток в образце – 20 нА, время экспозиции составляло 10 с. Арсенопирит и пирит анализировались на Fe, Ni, Co, As, Au, S и Sb. При анализе были использованы стандарты: FeS_2 (Fe, S), FeAsS (As), $\text{Au}_{0,75}\text{Ag}_{0,25}$ (Au), Sb_2S_3 (Sb), FeNiCo (Ni, Co). Пределы обнаружения при заданных параметрах составляли (мас. %): 0,03 для Fe; 0,04 для Ni; 0,03 для Co; 0,05 для As; 0,02 для S; 0,04 для Sb; 0,05 для Au; 0,08 для Ag, Cu; 0,1 для Hg.

Содержания в породах и рудах Ag, As, Ba, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V, Zn, W, Bi определены методом ICP-MS, содержания Au – пробирным методом с атомно-абсорбционным окончанием. Эти анализы были выполнены в лаборатории SGS (ЗАО «СЖС Восток Лимитед», Чита). Пределы обнаружения (г/т): 0,01 для Au; 0,5 для Cu, Sr, Zr; 1 для Ba, Cr, Co, Ni; 2 для Ag, Mn, Pb, V; 3 для As; 5 для Bi; 10 для W; 100 для P; 0,01 % для Fe, Ti.

Для изучения флюидных включений в кварце использовались методы криотермометрии и Раман-спектроскопии. Температуры гомогенизации газожидких включений определены при помощи микротермокамеры THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от –196 до 600 °C. Состав газовой фазы включений определен методом КР-спектроскопии на спектрометре LabRam HR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II и конфокальным микроскопом Olympus BX 41. В качестве возбуждающего использовано излучение Ar лазера CVI MellesGriot с длиной волны 514 нм и выходной мощностью 50–30 мВт.

U-Pb датирование цирконов из гранитоидов Федоровской интрузии выполнено методом LA-ICP-MS. После дробления и промывки образца гранитоидов из полученного концентрата под бинокулярным микроскопом отобрано 50 зерен циркона, они были смонтированы в полированную эпоксидную шашку. По катодоллюминесцентным изображениям, полученным на сканирующем электронном микроско-

пе (MIRA 3 LMU), для датирования было выбрано 22 зерна циркона с наиболее четко проявленной внутренней зональностью. Датирование производилось при помощи масс-спектрометра высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Thermo Scientific Element XR, соединенного с системой лазерной абляции NWR UP 213. Параметры измерения оптимизировались для получения максимальной интенсивности сигнала ^{208}Pb , использовался стандарт NIST SRM612. Диаметр лазерного луча составлял 30 мкм, частота повторения импульсов 5 Гц, плотность энергии лазерного излучения 3,0–3,5 Дж/см². Анализ проводился с использованием международных эталонных образцов цирконов: 91500 – внешний стандарт (1 064 млн лет); Plešovice – контрольный

образец (337 млн лет). Данные измерений обработаны с помощью программ Glitter и Iolite 3.65, встроенной в Igor Pro.

Все анализы, кроме ICP-MS определения содержания химических элементов в породах и рудах и пробирного на Au, выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Результаты исследований

Характеристика рудных минералов. Содержания рудных минералов в породах и рудах, вскрытых скважинами (см. рис. 2), и их количественные соотношения приведены в табл. 1, а примеры минеральных ассоциаций в аншлифах – на рис. 3.

Таблица 1

Распространенность рудных минералов в аншлифах из керна скважин Лазаретного рудопроявления

Table 1

The prevalence of ore minerals in polished samples from the kern of boreholes of the Lazaretny ore occurrence

Скважина / интервал, м	Порода	Жилы и прожилки	%	Соотношение рудных минералов, %						Au, г/т
				Py	Cpy	Apy	Po	Spl	Te	
C-41/17	Сланец ч.		5	97	2			1		< 0,1
25,6	Сланец ч.	Qu жила	1	50	5	5	40	< 1		0,23
34	Сланец ч.	Qu	5	90	5			2,5	2,5	0,15
42,7	Сланец ч.	Qu	3	85	5		10	< 1		< 0,1
53	Сланец ч.	Qu	2	95	5		< 1	< 1		< 0,1
65	Сланец ч.		2	85	10			5		< 0,1
70,2	Долерит	Qu-карб.	2	95	5		< 1	< 1	< 1	< 0,1
70,5	Сланец ч.		1	95	5			< 1	< 1	< 0,1
72	Сланец ч.	Qu	2	97	2			1		< 0,1
76	Сланец ч.	Qu-карб.	2	95	5			< 1	< 1	0,42
188,6	Сланец ч.	Qu	5	95	< 1	5		< 1	< 1	< 0,1
190,6	Сланец ч.	Qu	5	60	10	20	10	< 1		0,47
C-46/17,7	Долерит	Qu жила	1		5	30	60	5		0,26
26,5	Долерит	Qu-карб.	1	50	10	10	30	< 1		< 0,1
33,2	Долерит	Qu жила	1		5	5	90			0,16
40,5	Долерит	Qu жила	2	98	< 1	1	1	< 1		0,23
41,7	Долерит	Qu жила	1		< 1	100	< 1	< 1		< 0,1
43,9	Порфирит	Qu	1	95	1	1	1		1	< 0,1
44,6	Порфирит	Qu	1		1	1	98	< 1		< 0,1
45,4	Порфирит	Qu жила	1		70	30	< 1	< 1		< 0,1
49,1	Порфирит	Qu жила	1		10	80	10			1,3
56,1	Известняк		2	90	1	5	3	1		< 0,1
57	Известняк		1	80	5	10	5	< 1		< 0,1
62,2	Известняк		1	99	< 1	1	< 1	< 1		< 0,1
65,5	Долерит	Qu	1	80	10		10			< 0,1
67,6	Долерит	Qu жила	4	99	< 1	1	< 1	< 1		< 0,1
C-44/34,8	Сланец ч.		1	95	5			< 1		< 0,1
39,5	Сланец ч.	Qu-карб.	1	98	1			1		< 0,1
44,7	Сланец ч.	Qu-карб.	2	98	1		1	< 1		< 0,1
50,9	Сланец ч.		10	85	5	5	< 1	5	< 1	< 0,1
53	Сланец ч.	Qu	7	85	5	10	< 1	< 1		0,17
58,2	Известняк	Qu-карб.	5	98	1		1	< 1		< 0,1
59,2	Сланец ч.	Qu-карб.	2	98	1		1	< 1		< 0,1
62,7	Сланец ч.	Qu	2	99	< 1	< 1		1		0,38
63	Сланец ч.	Qu	1	90	< 1	10		< 1		0,27
65,2	Сланец ч.	Qu	1	85	10			5	< 1	0,2

Скважина / интервал, м	Порода	Жилы и прожилки	% рудн.	Соотношение рудных минералов, %						Au, г/т
				Pу	Сру	Ару	Po	Spl	Te	
68,1	Долерит	Qu	1	99	1			< 1		< 0,1
86,7	Известняк		1	98	1		< 1	1		< 0,1
C-45/35,1	Сланец ч.	Qu	25	98	1			1	< 1	< 0,1
43,4	Сланец ч.		8	98	1			1		< 0,1
44,4	Сланец ч.	Qu	1	98	1			1	< 1	< 0,1
64,9	Известняк	Qu жила	1	80	10			6	4	< 0,1
70	Сланец ч.	Qu	1	94	5			1	< 1	< 0,1

Примечание. Минералы: Qu – кварц; Pу – пирит; Сру – халькопирит; Ару – арсенопирит; Po – пирротин; Spl – сфалерит; Te – тетраэдрит.

Note. Minerals: Qu – quartz; Pу – pyrite; Сру – chalcopirite; Ару – arsenopyrite; Po – pyrrhotite; Spl – sphalerite; Te – tetrahedrite.

Пирит и арсенопирит в основном представлены зернами с ярко выраженным идиоморфизмом, обособления сфалерита, халькопирита, пирротина и тетраэдрита аллотриоморфные. Размер выделений рудных минералов изменяется от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров, минералы располагаются в породах в виде отдельных зерен или небольших скоплений их агрегатов вдоль сланцеватости или трещиноватости. В кварцевых жилах и метасоматитах находится один и тот же набор минералов.

Пирит является самым распространенным рудным минералом и встречается как в сланцах, так и в дайках и силлах. Габитус его кристаллов кубический, размер зерен до 4 мм, сростается пирит чаще всего с арсенопиритом. В зернах пирита наблюдаются включения всех рудных минералов, сам он очень редко образует аллотриоморфные вкрапления в халькопирите.

Основное количество арсенопирита (как и сульфидов Fe, Co, Ni) приурочено к гидротермально измененным породам основного состава, размер его зерен до 1 мм. По трещинам в арсенопирите могут развиваться пирит и халькопирит. В некоторых зернах арсенопирита находятся мельчайшие включения самородного золота, наблюдаются также сростания арсенопирита, пирита и самородного золота. Наличие арсенопирита в рудных зонах коррелирует с повышенной золотоносностью.

Пирротин также характерен для даек основного состава (см. табл. 1, скважина 46). Он образует сростки с арсенопиритом, халькопиритом, изредка – с самородным золотом, и включения в пирите, арсенопирите (вместе с халькопиритом). Размер выделений пирротина – до 0,3 мм.

Халькопирит встречается как в дайках, так и в сланцах, размер его зерен до 0,5 мм. Он находится в ассоциации со всеми рудными минералами, может выполнять трещины в пирите и нарастать на зерна пирита и арсенопирита. В редких случаях в халькопирите встречаются включения самородного золота, образует он с ним и сростки.

Сфалерит, как и халькопирит, встречается во всех типах пород, но в меньших количествах. Ассоциация этих минералов очень устойчивая. Размер выделений сфалерита – до 0,2 мм. В виде включений сфалерит может находиться в пирите, арсенопирите, пирротине, в нем иногда присутствует эмульсионная вкрапленность халькопирита.

Тетраэдрит весьма редок и почти не образует самостоятельных выделений (их размер – до 0,05 мм). Он находится в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом, во включениях в пирите и халькопирите и нарастает на пирит.

Самородное золото (размером до 0,1 мм) образует сростки с арсенопиритом и пиритом, с пирротинном, а также встречается в виде мелких включений в арсенопирите и халькопирите. Такие выделения самородного золота более характерны для метасоматитов. В кварцевых и кварц-карбонатных жилах оно находится чаще в виде свободных выделений, размеры золотин в жилах достигают 1 мм.

Химические составы пирита, арсенопирита и минералов состава (Fe,Co,Ni)[AsS] из керна скважин отображены (в разных координатах) на рис. 4.

Примерно в 10 % зерен пирита обнаружены примеси Co (до 0,16 мас. %) и Ni (до 0,47 мас. %), в одном зерне 0,64 мас. % As и еще в одном 0,4 мас. % Au. В арсенопирите примеси Co, Ni встречаются в 25–30 % анализов (до 1,86 и 0,5 мас. %), Au – в двух зернах (0,11 и 0,23 мас. %), Sb – в трех зернах (0,15–0,43 мас. %).

Отношение Co к Ni в пиритах составляет 0,3–0,5, в арсенопиритах – 1–5. Такие значения Co/Ni типичны для золото-кварцевой минерализации [Тюкова, Ворошин, 2007]. Пирит несильно отклоняется от своего стехиометрического состава, в основном в сторону дефицита Fe. Для арсенопирита характерен дефицит As. Зависимости между наличием примесей Co, Ni и составами пирита, арсенопирита нет. Минералы состава (Fe,Co,Ni)[AsS] чаще обогащены Co, чем Ni.

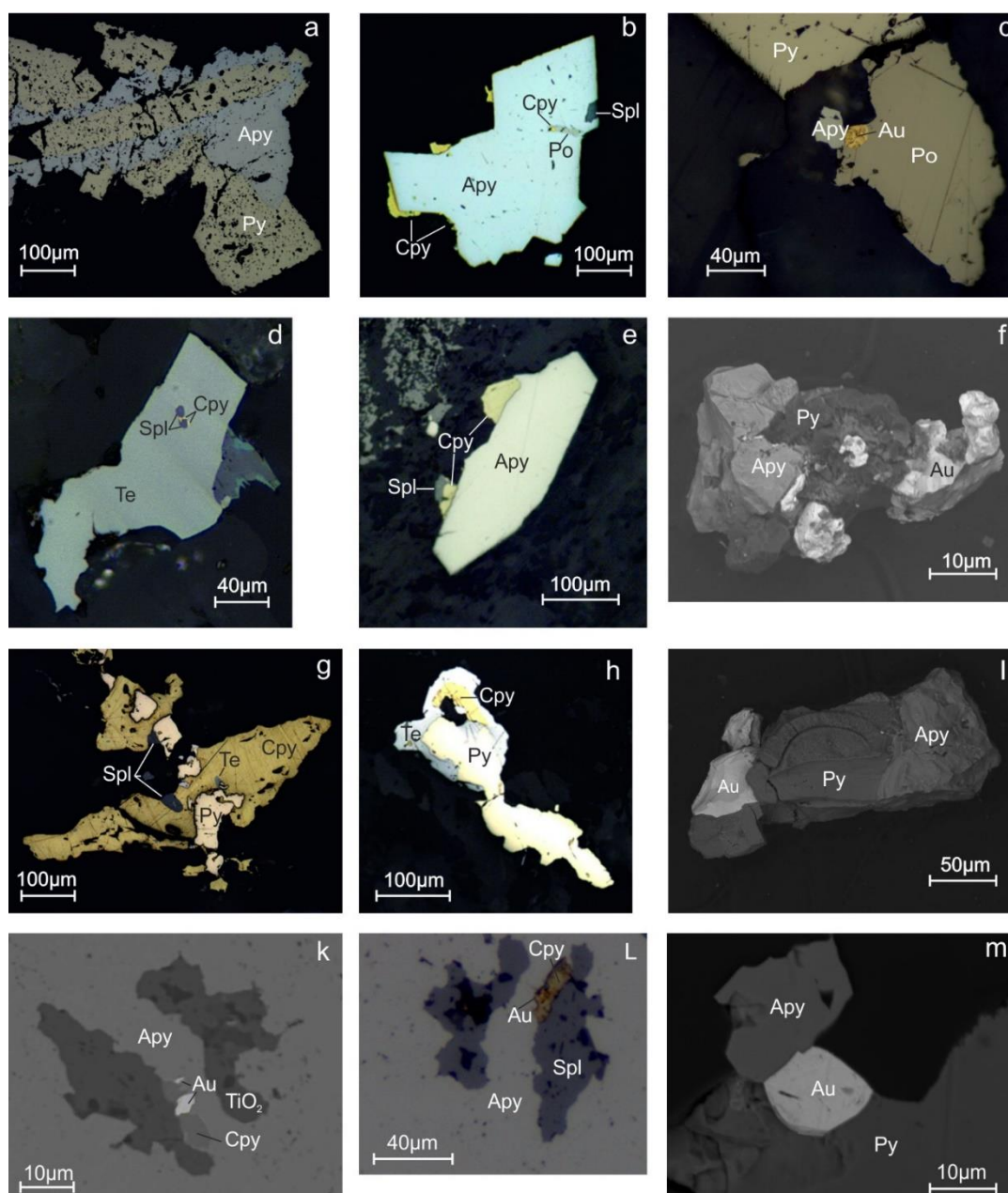


Рис. 3. Аншлифы и SEM-изображения рудных минералов Лазаретного рудопроявления

a – сростание пирита и арсенопирита; b – халькопирит нарастает на арсенопирит, включение в котором представлено сростком халькопирита и пирротина; c – сростание частички самородного золота и пирротина; d – сросток халькопирита и сфалерита во включении в тетраэдрите; e – на зерно арсенопирита нарастает халькопирит, на него – сфалерит; f – сростание самородного золота, арсенопирита и пирита; g – халькопирит в сростании с пиритом и сфалеритом, в халькопирите включение тетраэдрита, в пирите – халькопирита и сфалерита; h – нарастание тетраэдрита и халькопирита на зерно пирита; i – сростание золота, пирита и арсенопирита; k – включение в арсенопирите представлено сростком минерала состава TiO_2 , халькопирита и самородного золота; L – на включение сфалерита в арсенопирите последовательно нарастают халькопирит и самородное золото; m – сростание идиоморфных зерен самородного золота, пирита и арсенопирита

Fig. 3. Polished samples and SEM-images of ore minerals of the Lazaretny ore occurrence

a – intergrowth of pyrite and arsenopyrite; b – chalcopyrite increases on arsenopyrite, the inclusion of which is represented by an intergrowth of chalcopyrite and pyrrhotite; c – intergrowth of a particle of native gold and pyrrhotite; d – intergrowth of chalcopyrite and sphalerite in the inclusion in tetrahedrite; e – chalcopyrite increases on the grain of arsenopyrite, sphalerite on it; f – intergrowth of native gold, arsenopyrite and pyrite; g – chalcopyrite in intergrowth with pyrite and sphalerite, in chalcopyrite the inclusion of tetrahedrite, in pyrite – chalcopyrite and sphalerite; h – the increase of tetrahedrite and chalcopyrite on the grain of pyrite; i – intergrowth of gold, pyrite, and arsenopyrite; k – inclusion in arsenopyrite is represented by intergrowth of a mineral of the composition TiO_2 , chalcopyrite, and native gold; L – on the inclusion of sphalerite in arsenopyrite, chalcopyrite and native gold successively increase; m – intergrowth of idiomorphic grains of native gold, pyrite, and arsenopyrite

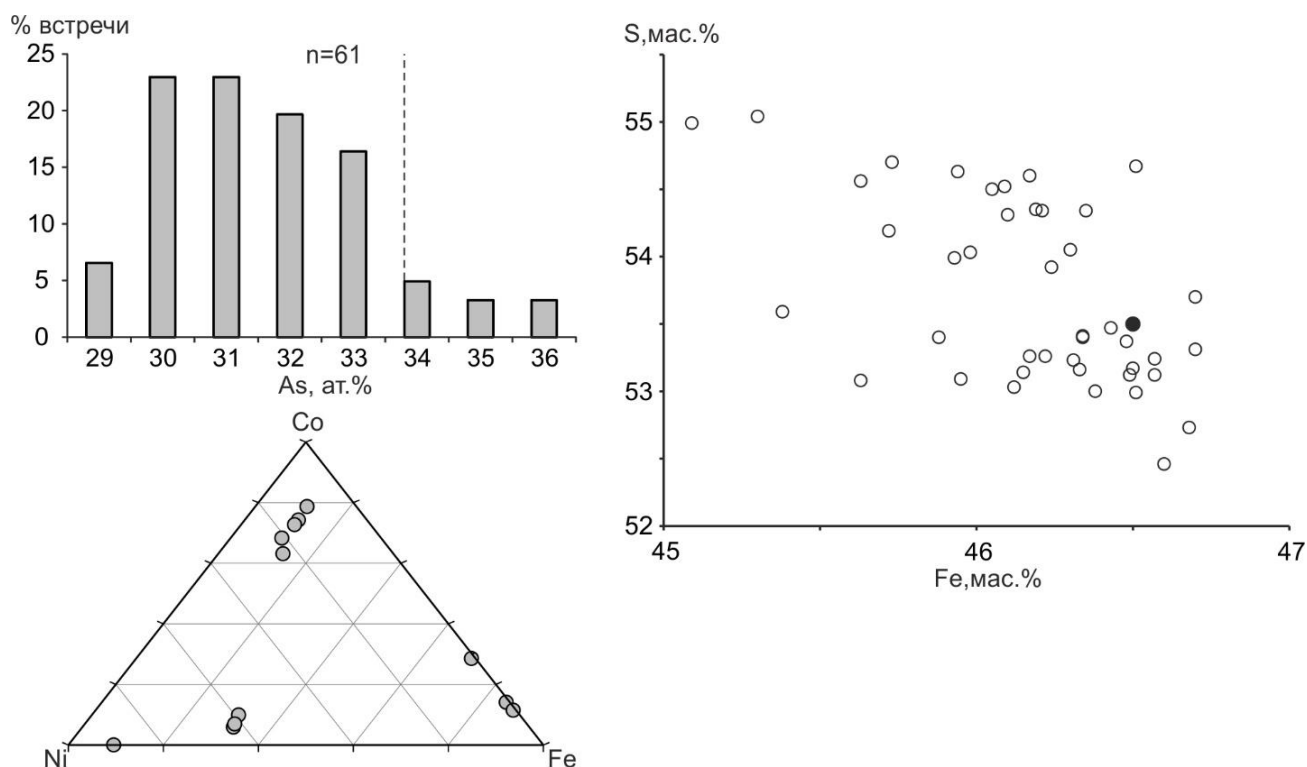


Рис. 4. Химический состав пирита, содержание As в арсенопирите и сульфоарсениды Ni, Co, Fe

Fig. 4. Pyrite chemical composition, As content in arsenopyrite and Ni, Co, Fe sulfoarsenides

В составе самородного золота, кроме Ag, присутствует небольшая примесь Hg (в 30 % золотин, от 0,1 до 0,6 мас. %, среднее – 0,2 мас. %), примесь Cu не обнаружена. Пробность Au выдержана по простиранию рудных зон (табл. 2), но в их выходах на поверхность она чаще выше, чем у золота из скважин (рис. 5): 709–971 (среднее 880 ‰) и 722–935

(838 ‰). По канавам самородное золото получено из песчано-глинистого структурного элювия, содержащего большое количество обломков рудного и молочно-белого кварца. Интенсивных гипергенных преобразований золотин (высокопробных кайм, прожилков) или новообразований золота не наблюдается.

Таблица 2

Гранулометрия, пробность и шлиховые минеральные ассоциации самородного золота

Table 2

The grain size distribution, fineness and schlich mineral assemblages of native gold

№ на рис. 1	Объект	Au, штук	Размер Au, мм	Пробность Au, ‰	Минералы в шлихах
1	Канава	20	<0,1–0,25	751–924	Limp, Mgt, Ep, Ilm
2	Канава	>200	<0,1–0,8	788–920	Limp, Ep, Mgt, Ilm, Lim
3	Канава	80	<0,1–0,15	709–955	Limp, Ep, Mgt, Ilm, Lim, Zir
3	C44/ 48; 72м	11	<0,1–0,1	774–922	Py
4	Канава 168	>200	<0,1–0,5	774–941	Limp, Py, Ep, Amf, Px
4	C41/ 26; 128м	3	<0,1–0,25	722–820	Py, Po
4	C46/ 36–57м	25	<0,1–0,25	799–935	Py, Apy, Cpy
	Отвал россыпи рч. Б. Лазаретный	28	0,1–1,0	753–927	Mgt, Ep, Amf, Px, Ilm, Gr, Zir, Cr, Limp, Py

Примечание. Минералы: Limp – окисленный пирит; Ep – эпидот; Mgt – магнетит; Ilm – ильменит; Lim – лимонит; Zir – циркон; Amf – амфибол; Px – пироксен; Gr – гранат; Cr – хромит; Py – пирит; Apy – арсенопирит; Cpy – халькопирит; Po – пирротин.

Note. Minerals: Limp – oxidized pyrite; Ep – epidote; Mgt – magnetite; Ilm – ilmenite; Lim – limonite; Zir – zircon; Amf – amphibole; Px – pyroxene; Gr – garnet; Cr – chromite; Py – pyrite; Apy – arsenopyrite; Cpy – chalcopyrite; Po – pyrrhotite.

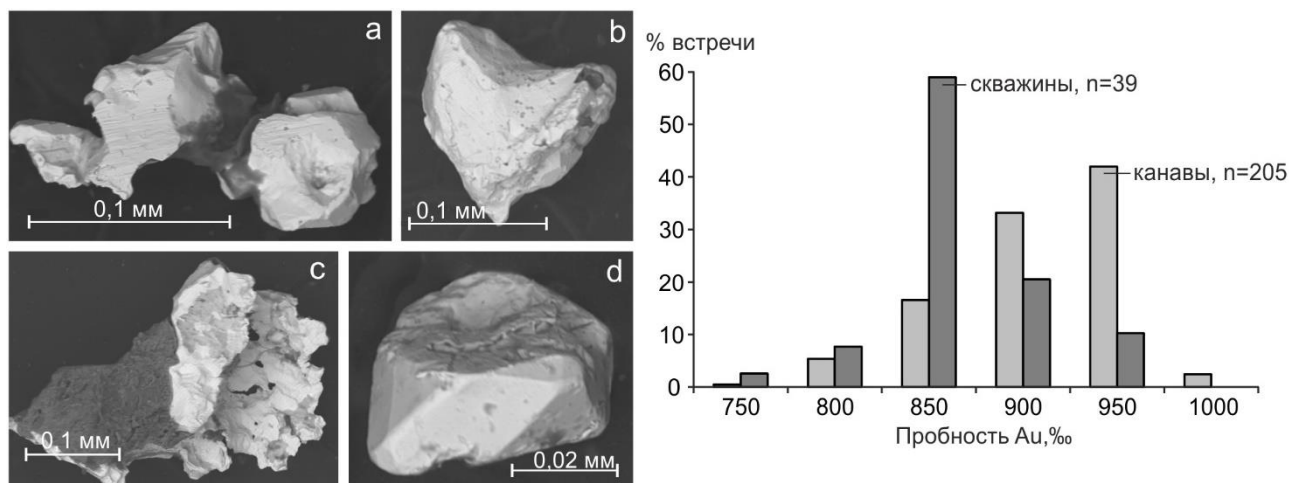


Рис. 5. Примеры морфологии и гистограммы пробности самородного золота

Морфология: а – друзовидная, б – массивная, с – ксеноморфная, d – кристаллоподобная

Fig. 5. Examples of morphology and histogram of the fineness of native gold

Morphology: a – druroid, b – massive, c – xenomorphic, d – crystal-like

Преобладающий размер золотинок – менее 0,25 мм, по морфологии золотинок можно разделить на четыре группы (в порядке распространенности): ксеноморфные (интерстиционные и жилковидно-пластинчатые); массивные; друзовидные и кристаллоподобные (см. рис. 5). Кроме того, встречаются комбинированные формы – ксеноморфные с идиоморфными фрагментами, массивные с отпечатками минералов, комковато-массивные и др. В шлиховых концентрациях элювия рудных зон преобладающим минералом является окисленный пирит, остальных минералов намного меньше или даже единичные знаки. Выход шлиха небольшой.

Пробность самородного золота из канав хорошо соответствует таковой из отвалов отработки россыпей рч. Бол. Лазаретный, а из керна скважин – россыпей рч. Мал. Калмык и р. Федоровки [Колпаков и др., 2016]. В россыпях очень мало золотинок с гипергенными каймами.

Сквозным минералом на Федоровском рудопроявлении является пирит, в основном кубического габитуса, в кварцевых жилах он может быть золотоносен (до 2 кг/т), из примесей в нем чаще всего находятся Bi, Ni; включения, кроме Au, представлены минералами Ag, халькопиритом, сфалеритом, пирротинном. Для химического состава пирита характерен небольшой дефицит серы. Единичные определения ее изотопного состава (из пирита, парагенного с золотом) свидетельствуют о глубинном происхождении ($\delta^{34}\text{S} = 1\text{‰}$). Арсенипирит встречается очень редко, вместо него в рудах находится герсдорфит, содержащий во включениях остальные минералы Ni, пирротин и халькопирит. Герсдорфит

образует сростания с пиритом, доломитом и минералом состава TiO_2 в метасоматитах (рис. 6), а также находится в кварцевых жилах вместе со сфалеритом, халькопиритом и минералами серебра. Последние содержат примеси As, Bi (0,1 мас. %) и образуют между собой тесные ассоциации. Галенит очень редок. Монацит и флоренсит встречаются в слюдястых агрегатах, иногда вместе с самородным золотом. Флоренсит является типичным акцессорным минералом золотоносных черносланцевых толщ [Паленова и др., 2012]. Основное количество самородного золота выполняет трещины и пустоты в рудном кварце. В рудах преобладают золотины крупнее 0,5 мм, самородное золото находится в основном в виде свободных выделений, реже в сростках. Мелкие и тонкие частицы Au приурочены к полосчатости в зальбандах жил (часто вместе с графитом) или густой сыпью покрывают стенки трещин. Выделяется две стадии оруденения [Щербаков и др., 2003]: ранняя пирит-пирротинная, слабо золотоносная, и продуктивная, включающая в себя все рудные минералы и основное количество самородного золота. Редко встречающиеся минералы находятся в основном в богатых рудах.

Пробность самородного золота, по данным 224 определений, составляет 530–890 (среднее 743 ‰) [Колпаков и др., 2016], что заметно ниже, чем на Лазаретном рудопроявлении. Характер распределения пробности на гистограмме близок к нормальному. Кроме Ag в 10 % золотинок находится небольшая примесь Hg (0,1–0,45 мас. %, среднее – 0,2 мас. %) и в ряде золотинок десятые доли мас. % Bi [Щербаков и др., 2003]. Гипергенные преобразова-

ния золотин из элювия рудных зон слабые и выражаются в наличии на поверхности некоторых из них следов растворения или видимых в аншлифах тонких высокопробных прожилков. В пустотах

выщелачивания сульфидов среди гидроокислов Fe иногда находятся мельчайшие золотины с пробностью около 1 000 ‰. На них встречаются каймы аргентита.

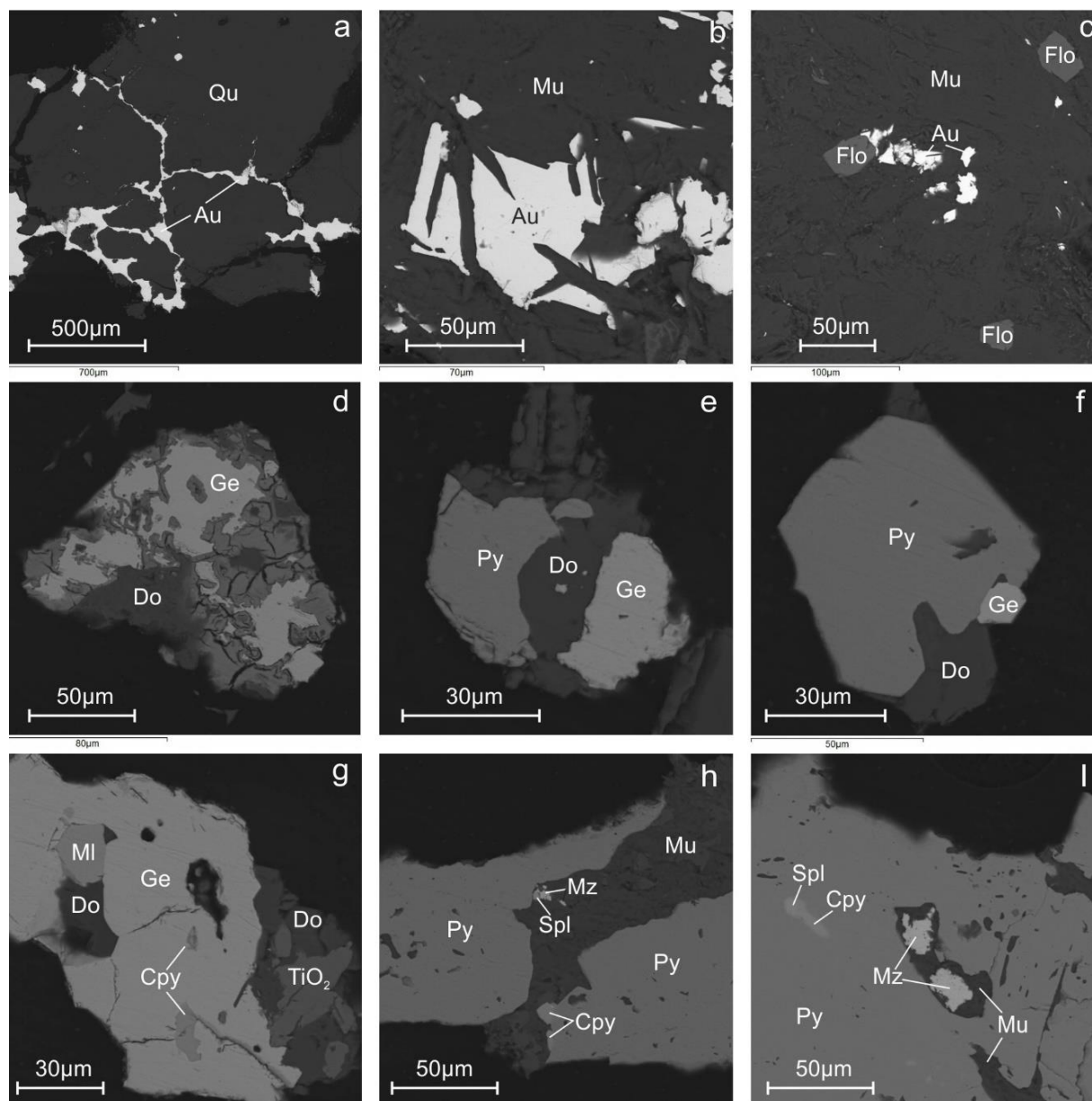


Рис. 6. SEM-изображения аншлифов Федоровского рудопроявления

a – самородное золото (820 ‰) выполняет трещинки в кварце; b – закономерное сростание золота (840 ‰) и мусковита; c – вкрапления золота (820 ‰) и флоренсита в мусковитовом агрегате; d – сростание герсдорфита, замещающего его минерала с составом NiAsO_6 и доломита; e, f – сростания пирита, герсдорфита и доломита; g – в герсдорфите включения халькопирита, миллерита и доломита, герсдорфит сростается с агрегатом доломита и минерала состава TiO_2 ; h – пирит сцементирован мусковитом, на поверхности пирита мелкие наросты халькопирита, сфалерита, монацита; i – в пирите включения халькопирита в сростании со сфалеритом и монацита в мусковитовом агрегате

Fig. 6. SEM-images of polished samples of the Fedorovsky ore occurrence

a – native gold (820 ‰) in cracks in quartz; b – regular intergrowth of gold (840 ‰) and muscovite; c – inclusions of gold (820 ‰) and florencite in the muscovite aggregate; d – intergrowth of gersdorffite, its replacement mineral with the composition of NiAsO_6 and dolomite; e, f – intergrowth of pyrite, gersdorffite and dolomite; g – inclusions of chalcopyrite, millerite and dolomite in gersdorffite, gersdorffite intergrowth with the aggregate of dolomite and a mineral of the composition TiO_2 ; h – pyrite is cemented with muscovite, on the surface of the pyrite there are small increases of chalcopyrite, sphalerite, monazite; i – in pyrite, inclusions of chalcopyrite in intergrowth with sphalerite and monazite in the muscovite aggregate

Геохимическая характеристика оруденения.

В табл. 3 приведены нормированные содержания химических элементов в породах в зависимости от уровня содержаний золота.

Кларк концентрации золота в околорудных породах (с содержаниями $Au < 0,1$ г/т) превышен более чем в 4 раза, мышьяка – в 20–30 раз, в рудах концентрация мышьяка увеличивается еще на порядок. Содержания Co, Cu, Fe, Mn, Zn в породах и рудах незначительно надкларковые, остальные – на уровне, или ниже, или сильно ниже (Ti, Ba, Sr) кларка. Содержания элементов (кроме Au, As) по отдельным анализам превышают кларк максимум в 3–10 раз. По простиранию рудных зон (с юго-запада на северо-восток) содержания элементов в них выдержаны,

лишь концентрация As в северо-восточной, более продуктивной части в среднем в 2,5 раза выше. Ag, Bi, W обнаружены во всех пробах в количествах, равных пределам их обнаружения, W в 15 % анализов – в 2–3 раза больше. Чувствительность анализа на эти элементы слишком низкая, такие данные не использовались. Так как Ag входит в состав самородного золота, геохимический профиль на Лазаретном рудопроявлении может быть обозначен как Au, Ag-As.

Золото имеет сильную корреляционную связь с мышьяком и слабую – с Cu, Fe, Mn, Co (табл. 4). Также коррелируют между собой содержания подвижных (транзитных) элементов (Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, Zn), входящих в состав рудных минералов.

Таблица 3

Коэффициенты концентрации элементов (средние значения) в пробах из керна скважин (1) и поверхностных горных выработок (2) Лазаретного рудопроявления

Table 3

Coefficients of element concentration (average values) in samples from the drill samples (1) and surface mine workings (2) of the Lazaretny ore occurrence

Au, г/т	№	n	Au $4,3 \times 10^{-3}$	As 1,7	Co 18	Ni 58	Cu 47	Zn 83	Pb 16	Fe 4,6 %	Cr 83	Mn 1000	Ti 4500	V 90	P 930	Ba 650	Sr 340
Σ	1	490	7,3	42,6	1,1	0,7	1,2	0,7	0,3	0,9	0,4	0,9	0,0	0,4	0,6	0,1	0,6
	2	1234	7,2	28,9	1,6	0,9	1,4	1,2	0,4	1,4	0,7	1,1	0,2	1,1	1,0	0,2	0,1
< 0,1	1	395	4,3	29,3	1,0	0,6	1,1	0,6	0,3	0,8	0,4	0,8	0,0	0,4	0,6	0,1	0,7
	2	1004	4,5	20,3	1,5	0,8	1,3	1,1	0,4	1,3	0,7	1,0	0,1	1,1	1,0	0,2	0,1
> 0,1	1	95	67	201	1,4	0,9	1,7	0,9	0,4	1,2	0,4	1,2	0,1	0,3	0,6	0,1	0,4
	2	230	55	137	1,9	1,1	1,9	1,3	0,5	1,6	0,7	1,3	0,1	0,9	0,9	0,2	0,1
> 0,5	1	22	204	318	1,6	0,9	2,1	0,9	0,4	1,4	0,4	1,3	0,1	0,5	0,7	0,1	0,3
	2	29	263	359	1,9	1,0	2,2	1,1	0,5	1,6	0,6	1,0	0,1	0,9	0,8	0,2	0,1

Примечание. Для расчетов использовались кларки концентраций элементов в земной коре по А.П. Виноградову [1962]. Они приведены (в г/т) под названиями химических элементов.

Note. For calculations were used clarks of the concentrations of elements in the earth's crust according to A.P. Vinogradov [1962]. They are given (in ppm) under the names of chemical elements.

Таблица 4

Значимые коэффициенты корреляции элементов в пробах из керна скважин ($n = 490$, $r_{0,99} = 0,12$) и канав ($n = 1234$, $r_{0,99} = 0,07$)

Table 4

Significant correlation coefficients of elements in drill samples ($n = 490$, $r_{0,99} = 0,12$) and trenches ($n = 1234$, $r_{0,99} = 0,07$)

	Au	As	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Ti
As	0,48 0,54	1									
Cr			1								
Co	0,17		0,50 0,56	1							
Cu	0,20 0,17	0,13 0,16	0,10	0,53 0,42	1						
Fe	0,18 0,09	0,18	0,28 0,10	0,78 0,54	0,67 0,55	1					
Mn	0,17		0,19	0,61 0,38	0,49 0,20	0,68 0,30	1				
Ni		0,30 0,10	0,54 0,78	0,51 0,63	0,14 0,08	0,26	0,30	1			
P			0,21	0,40	0,36	0,51	0,50	0,17	1		

	Au	As	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Ti
Pb	0,14			0,28	0,49	0,38	0,34	0,17	0,38	1	
Ti			0,38	0,36		0,33	0,20		0,27 0,31		1
Zn			0,21	0,58 0,13	0,80 0,17	0,75 0,26	0,54 0,30	0,22	0,47	0,49 0,14	0,21

По результатам 33 количественных спектральных анализов 9 проб из богатых руд (26 г/т Au и более) Стержневой рудной зоны Федоровского рудопроявления, Au сопровождается Ag, Te, Ba, Se, As, Sb, Pb, W, Bi – подвижными элементами, характерными для верхней части глубоко проникающего оруденения [Щербаков и др., 2003]. Средние содержания Pb, Cu, Zn превышают кларковые в 4–17 раз, Ni, Cr, As – в 3, 6 и 60 раз. Наиболее устойчивая корреляция наблюдается между содержаниями Au и Ag, As, W [Бакшеев и др., 2009]. По фоновым данным, химический анализ по трем технологическим пробам из этой же рудной

зоны с рядовыми содержаниями золота (выполнен ОАО «Иргиредмет») дает концентрации Pb, Cu, Zn ниже кларка, а Ni, Cr, As – в 7, 20 и 120 раз выше кларка. Подтверждается высокое содержание золота в монофракции магнетита (без видимых выделений Au).

Результаты термобарогеохимических исследований. В сингенетичном рудном минералам сером кварце золотоносных жил изучались первичные и псевдотеричные (по Röedder [1984]) включения. Они имеют изометричную, неправильную, отрицательных кристаллов или удлиненную форму (рис. 7), размер их составляет от менее 10 до 20 мкм.

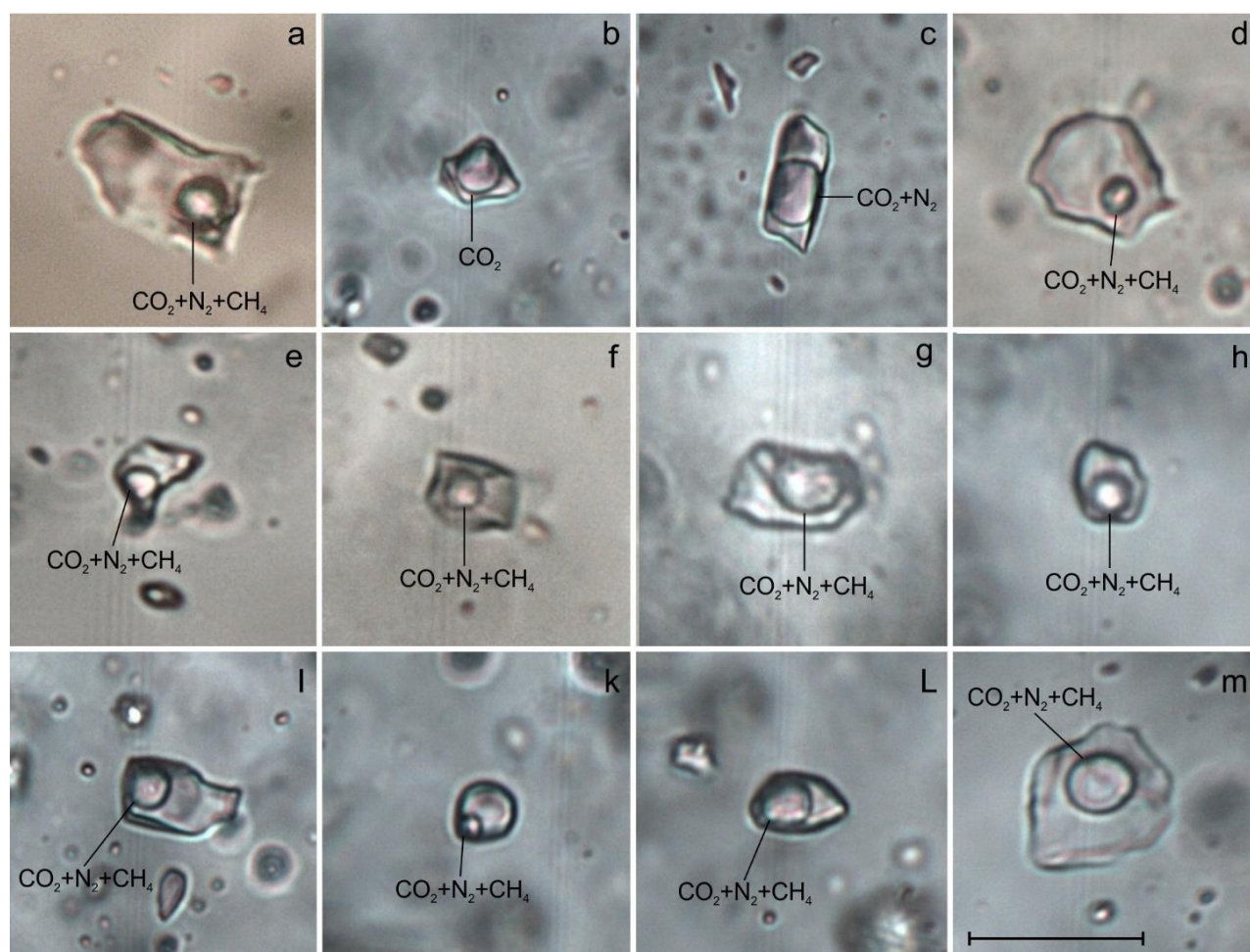


Рис. 7. Фотографии газо-жидких включений в рудном кварце
a, b – C44/48,1м; c – C44/72,3м; d – F-14-1; e-m – K168. Масштабная линейка соответствует 20 мкм

Fig. 7. Photos of gas-liquid inclusions in ore quartz
a, b – C44/48,1m; c – C44/72,3m; d – F-14-1; e-m – K168. The scale corresponds to 20 microns

Рудообразующие флюиды представляли собой водно-солевой раствор, содержащий пузырьки газа, в кварце присутствовали сингенетичные разнонаполненные включения (с переменным соотношением газовой и водно-солевой фаз). В одном из них обнаружена также твердая фаза NaCl. Температура гомогенизации включений составила 190–275 °С, а соленость растворов – 3,3–6,6 мас. % NaCl-эквивалента (табл. 5). NaCl–H₂O состав раствора был определен с использованием данных по температурам эвтектик водно-солевых систем [Борисенко, 1977]. По данным [Щербаков и др., 2003], T_{гом} рудного серого кварца из богатых руд Стержневой рудной зоны составляет 140–300 °С, чаще – 150–200 °С.

С помощью Рамановской спектроскопии был установлен состав газовой фазы индивидуальных

включений в кварце (табл. 6). Доля газовой фазы составляет 5–50 %, изредка встречаются существенно газовые включения (CO₂). В газовых пузырьках находится смесь CO₂, N₂ и CH₄. Содержания метана незначительные, в единичных случаях превышают 1 мол. %. Главным компонентом газовой фазы является углекислый газ (47,5–100 мол. %, среднее 86 мол. %). Содержания азота составляют от < 0,1 до 51,8 мол. % (среднее 16 мол. %). Азот более характерен для образцов Лазаретного рудопроявления, здесь существует слабая положительная корреляция между содержаниями азота в газовой фазе флюидных включений и золота в руде. Меньшее количество азота в образцах Федоровского рудопроявления может быть обусловлено меньшим количеством углеродистого вещества во вмещающих породах.

Таблица 5

Обобщенные результаты термометрии и криометрии флюидных включений в рудном кварце Лазаретного рудопроявления

Table 5

Generalized results of thermometry and cryometry of fluid inclusions in the ore quartz of the Lazaretny ore occurrence

№ на рис. 1	Образец	n	T _{гом} , °С	T _{эв} , °С	T _{пл} , °С	NaCl, мас. % экв.	Au, г/т
4	C46/40.5	7	210–245	–21,9 ... –20,5	–4 ... –2,9	4,7–6,2	0,23
4	C46/41.5	5	230–270	–22 ... –21,5	–3,6 ... –2,8	4,5–5,7	0,23
3	C44/48.1	4	250–270	–21,5	–3,9 ... –3,2	5,1–6,1	1,15
3	C44/72.3	5	225–250	–22,8 ... –20,1	–3,9 ... –2,5	4–6,1	0,6
4	K168	9	190–260	–21,2 ... –19	–3,4 ... –2,6	4,2–5,4	3,2
4	K168	10	190–255	–23 ... –18,6	–4,3 ... –2,5	4–6,6	2,15
4	K168	4	240–275	–22,3 ... –21	–3,8 ... –2	3,3–6	2
4	K168	6	240–265	–22 ... –20,8	–4,1 ... –2,6	4,2–6,4	1,8
4	K169	3	240–265	–22,7 ... –21,5	–3,7 ... –2,7	4,3–5,8	0,29
4	K169	8	200–240	–21,1 ... –20,1	–4,3 ... –3	4,8–6,6	0,2

Примечание. Плотность флюида составляет 0,8–0,9 г/см³.

Note. The fluid density is 0,8–0,9 g/sm³.

Таблица 6

Результаты Рамановской спектроскопии газовой фазы включений в кварце

Table 6

Results of Raman spectroscopy of the gas phase of inclusions in quartz

Образец	Содержание газа, мол. %			Форма включений, содержание в них газовой фазы	T _{гом} , содерж. Au
	CO ₂	N ₂	CH ₄		
C44/48,1м	74,2	25,6	0,2	неправильной формы, удлиненные или изометричные, C _{газ} = 15–20 %	250–270 °С, 1,15 г/т
	77,8	22,0	0,2		
	82,6	17,2	0,2		
	91,6	8,1	0,2		
	92,8	6,6	0,5		
	100	< 0,1	< 0,1	существенно газовое	
	100	< 0,1	< 0,1		
C44/72,3м	95,3	4,7	< 0,1	изометричные или удлиненные, C _{газ} = 35–50 %	225–250 °С, 0,6 г/т
	97,9	2,1	< 0,1		
	98,4	1,6	< 0,1		
	98,5	1,5	< 0,1		
	98,8	1,2	< 0,1		
	100	< 0,1	< 0,1		

Образец	Содержание газа, мол. %			Форма включений, содержание в них газовой фазы	T _{гом} , содерж. Au			
	CO ₂	N ₂	CH ₄					
K168	49,7 87,0 89,6 100	47,3 13,0 9,0 < 0,1	3,0 < 0,1 1,3 < 0,1	неправильной формы, отрицательных кристаллов	190–255 °С, 2,15 г/т			
K168	78,6 66,4 80,3 81,7 97,1	21,1 32,3 19,0 18,0 2,6	0,3 1,2 0,7 0,2 0,3			изометричное, C _{газ} = 20 % неправильной формы, C _{газ} = 10–20 % тв. фаза – NaCl, C _{газ} = 25–30 %	240–275 °С, 2 г/т	
K168	47,5 54,7 76,8 99,0	51,8 44,4 21,7 < 0,1	0,7 1,0 1,5 1,0			неправильной формы, C _{газ} = 10 % C _{газ} = 20 %		190–260 °С, 3,2 г/т
K169	72,2 78,2 80,9 88,1	27,3 20,9 17,1 11,4	0,4 0,9 2,0 0,5			неправильной формы, очень мелкие		
K169	97,2 98,6 99,0 99,5	2,8 1,3 1,0 0,5	< 0,1 0,1 < 0,1 < 0,1	неправильной или удлиненной формы, C _{газ} = 10–15 %	200–240 °С, 0,2 г/т			
F-14-1 *	97,6 95,6 95,2 85,9	2,4 4,2 4,5 14,1	< 0,1 0,3 0,2 < 0,1	неправильной формы, в основном мелкие, C _{газ} = 5–40 %		200–250 °С, 1 г/т		
F-14-9 *	99,8 87,0 94,9 91,6	< 0,1 13,0 5,1 7,4	0,2 < 0,1 < 0,1 1,0				200–250 °С, 0,5 г/т	

Примечание. * – Федоровское рудопроявление.

Note. * – Fedorovskoe ore occurrence.

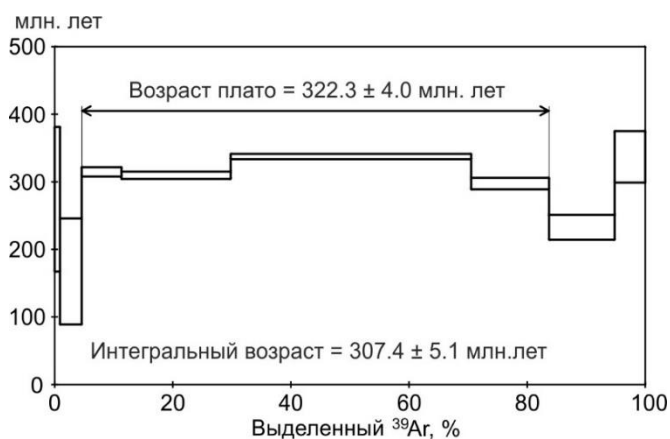


Рис. 8. Результаты ³⁹Ar/⁴⁰Ar определения возраста золотого оруденения Лазаретного участка по серициту

Fig. 8. Results of ³⁹Ar/⁴⁰Ar dating of gold mineralization of the Lazaretny ore occurrence by sericite

Результаты изотопно-геохронологических исследований. Возраст оруденения определен ³⁹Ar/⁴⁰Ar методом по серициту из призальбандовой части золотоносной кварцевой жилы, вскрытой канавой 168 в гидротермально измененных долеритах. Возраст

составил 322,3 ± 4 млн лет (рис. 8), что соответствует границе С₁ и С₂.

На Федоровском рудопроявлении возраст оруденения близок к Лазаретному и составляет: по серициту из богатого золотом штуфа 291,1 ± 1,3 млн лет [Щер-

баков и др., 2003]; по фукситу из околожильных метасоматитов с содержаниями золота 0,5–1 г/т – $307,2 \pm 2,2$ и $319,4 \pm 2,4$ млн лет [Колпаков и др., 2015].

Образец гранодиоритов для определения возраста по циркону отобран из коренного выхода Федоровской интрузии в правом борту долины р. Федоровки ниже устья рч. Бол. Калмык. Зерна циркона представлены хорошо ограненными бесцветными кристаллами дипирамидально-призматического габитуса, средне

и слабо удлиненными (рис. 9). На катодолюминесцентных изображениях отчетливо видна зональность их внутреннего строения, что свидетельствует о магматогенной природе цирконов. 22 выполненных определения (табл. 7), по 1 на каждое зерно циркона в краевой его части, показало возраст $410,2 \pm 1,5$ млн лет (D_1) при малой погрешности анализа и хорошей сходимости конкордий (рис. 10). Содержания Th в цирконах составляет 73–277 г/т, урана – 249–617 г/т, вариация отношения Th/U небольшая (0,29–0,48).

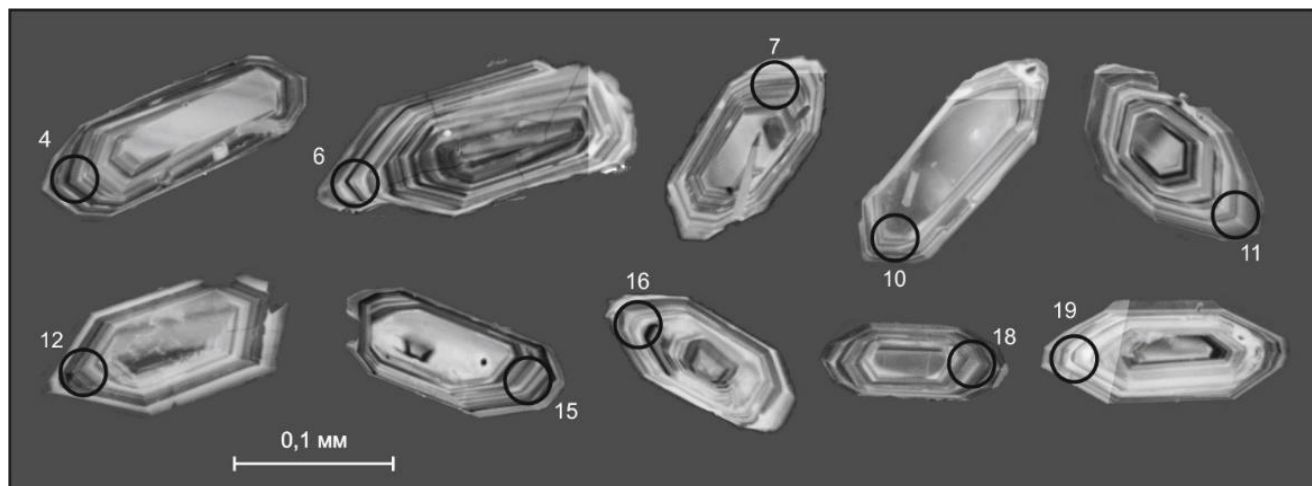


Рис. 9. Катодолюминесцентные изображения представительной выборки цирконов из гранодиоритов Федоровской интрузии
Номера анализов соответствуют номерам в табл. 7

Fig. 9. Cathodoluminescent images of a representative sample of zircons from granodiorites of the Fedorovsky intrusion
The analysis numbers correspond to the numbers in table 7

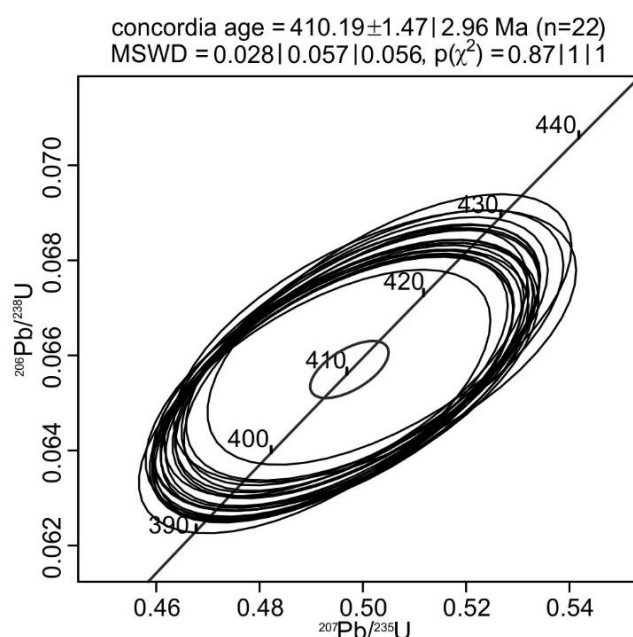


Рис. 10. Диаграмма с конкордией для цирконов из гранодиоритов Федоровской интрузии

Fig. 10. Concordia diagram for zircons from granodiorites of the Fedorovsky intrusion

Результаты U-Pb изотопного датирования (млн лет) цирконов из гранодиоритов Федоровской интрузии

Table 7

Results of U-Pb isotope dating (ma) of zircons from granodiorites of the Fedorovskaya intrusion

№ ан.	Th (г/г)	U (г/г)	Th/U	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb возр.	1σ	²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U возр.	1σ	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U возр.	1σ
1	147	399	0,37	0,0550	0,0013	0,5012	0,0146	0,0661	0,0012	411	26	413	12	413	7
2	135	424	0,32	0,0549	0,0013	0,4989	0,0144	0,0659	0,0012	407	26	411	12	412	7
3	277	609	0,45	0,0550	0,0012	0,4998	0,0141	0,0659	0,0011	411	25	412	12	412	7
4	231	548	0,42	0,0549	0,0013	0,4945	0,0142	0,0653	0,0011	407	26	408	12	408	7
5	250	617	0,40	0,0551	0,0012	0,5052	0,0144	0,0665	0,0012	415	25	415	12	415	7
6	164	433	0,38	0,0547	0,0012	0,4907	0,0139	0,0650	0,0011	401	25	405	11	406	7
7	177	435	0,41	0,0549	0,0013	0,4986	0,0145	0,0658	0,0012	410	26	411	12	411	7
8	156	414	0,38	0,0550	0,0013	0,5023	0,0149	0,0662	0,0012	413	27	413	12	413	7
9	73	249	0,29	0,0550	0,0014	0,5023	0,0159	0,0662	0,0012	414	29	413	13	413	7
10	161	450	0,36	0,0549	0,0013	0,4970	0,0144	0,0656	0,0011	409	26	410	12	410	7
11	127	360	0,35	0,0549	0,0013	0,4969	0,0147	0,0656	0,0012	409	27	410	12	410	7
12	153	427	0,36	0,0550	0,0014	0,4967	0,0152	0,0656	0,0011	410	28	410	13	409	7
13	112	371	0,30	0,0547	0,0013	0,4967	0,0144	0,0659	0,0012	400	26	410	12	411	7
14	253	531	0,48	0,0548	0,0012	0,4936	0,0141	0,0653	0,0011	404	25	407	12	408	7
15	218	546	0,40	0,0549	0,0013	0,4960	0,0144	0,0655	0,0011	408	26	409	12	409	7
16	224	492	0,46	0,0549	0,0013	0,4939	0,0144	0,0653	0,0011	407	26	408	12	408	7
17	178	547	0,32	0,0550	0,0013	0,4990	0,0144	0,0659	0,0012	410	26	411	12	411	7
18	186	537	0,35	0,0549	0,0013	0,5003	0,0145	0,0661	0,0012	408	26	412	12	413	7
19	104	321	0,32	0,0549	0,0014	0,4963	0,0151	0,0655	0,0012	409	28	409	12	409	7
20	129	403	0,32	0,0549	0,0013	0,4950	0,0146	0,0654	0,0011	408	27	408	12	408	7
21	216	599	0,36	0,0549	0,0013	0,4941	0,0143	0,0653	0,0011	407	26	408	12	408	7
22	93	279	0,33	0,0549	0,0014	0,4950	0,0152	0,0654	0,0012	408	28	408	13	408	7

Обсуждение результатов

Согласно классическому определению [Groves et al., 1998], орогенные золоторудные месторождения формируются при аккреционных и коллизионных событиях, в террейнах, из метаморфогенных и магматогенных гидротермальных растворов. Существует следующая геолого-генетическая промышленная классификация этих месторождений [Горячев, 2019]: золото-мышьяк-сульфидные с вкрапленными рудами; золото-кварцевые жильные; золото-висмутовые с жильными и вкрапленными рудами (аналог intrusion-related типа); золото-серебряно-кварцевые жильные.

Как отмечается многими исследователями, для золото-кварцевого оруденения характерны: отсутствие явной связи с гранитоидными интрузиями; приуроченность к разломным зонам и локализация в кварцевых жилах и штокверках среди осадочных и вулканогенных пород, метаморфизованных, как правило, не выше зеленосланцевой фации; низкое (от менее 1

до 5 %) содержание сульфидов, простой (пирит, арсенопирит, реже – халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, блеклые руды) и выдержанный минеральный состав [Тюкова, Ворошин, 2007]; высокая россыпеобразующая способность; Au, Ag-As геохимический профиль с добавлением Sb, Te, W, Pb и других элементов в зависимости от генетических особенностей оруденения [Горячев, 2019]; метаморфогенно-гидротермальный генезис, предполагающий извлечение золота из вмещающих пород растворами разного происхождения, возникшими под влиянием метаморфических и магматических процессов [Николаева и др., 2013]. Все эти признаки характерны для Лазаретного и Федоровского рудопроявлений, различия между ними обусловлены главным образом привнесением вещества золотоносных девонских даек на последнем.

Изучение рудообразующего флюида по включениям в минералах является важным методом установления условий формирования оруденения [Сокерина и др., 2012]. Водно-углекислотный состав

флюида на метаморфогенно-гидротермальных месторождениях в существенно черносланцевых породах закономерен. Углекислый газ является конечным продуктом окисления углеродистого вещества вмещающих пород под воздействием воды. Кроме того, часть CO_2 могла сформироваться при разложении карбонатов. Присутствие азота во включениях также часто отмечается на месторождениях золота этого типа [Баранова и др., 1997; Прокофьев и др., 1994; Bodnar et. al., 2014], нередко существует прямая зависимость между содержаниями N_2 и богатством руд. Азот и метан образуются при взаимодействии углеродистого вещества и гидротермального флюида, содержащего ион NH_4^+ , источником которого являются калийсодержащие слюды [Duit et al., 1986]. От интенсивности этого взаимодействия, по-видимому, зависит не только количество азота во флюиде, но и содержание золота в рудах.

Температуры образования орогенных метаморфогенно-гидротермальных месторождений золота чаще всего составляют 150–350 °С, состав рудообра-

зующего флюида $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2 \pm \text{N}_2, \text{CH}_4$. Содержания CO_2 во включениях обычно низкие (4–25 мол. %), но встречаются и существенно углекислотные (с жидкой H_2CO_3), наиболее распространенные включения имеют соленость раствора 0–10 мас. % NaCl -экв. Более высокую соленость связывают с солеными подземными водами, но не с минерализацией. Кроме Na в растворе могут содержаться ионы K , Ca , Mg , а кроме Cl – F и Br , но Na и Cl встречаются чаще всего. Глубина образования месторождений составляет до 10 км [Bodnar et. al., 2014].

Графическим отображением привноса и выноса химических элементов в процессе рудообразования могут служить изоконцентрационные диаграммы [Grant, 1986]. Анализ такой диаграммы (рис. 11) для Лазаретного рудопоя показывает, что совместно с золотом в рудах существенно увеличивается концентрация мышьяка и, незначительно, меди, цинка, свинца, кобальта, никеля и бария. Накопления или выноса остальных элементов практически не наблюдается.

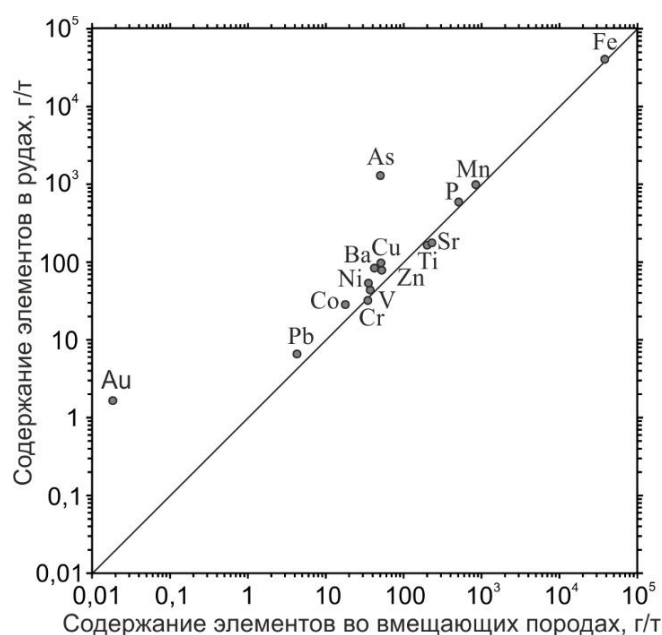


Рис. 11. Изоконцентрационная диаграмма привноса-выноса химических элементов

Fig. 11. Isoconcentration diagram of the introduction-removal of chemical elements

Это свидетельствует о том, что рудные минералы сформированы гидротермальным флюидом за счет существовавших ранее минералов вмещающих пород [Hofstra et al., 1991; Saunders et al., 2014]. Пирит изначально образует диагенетическую вкрапленность в углеродистых сланцах, пирротин и халькопирит, вероятно, присутствуют в дайках как акцессорные минералы (см. табл. 1). В конце C_1 , в колли-

зионной обстановке, начинается метаморфогенно-гидротермальное рудообразование. Оно происходит в тех же зонах смятия и рассланцевания вулканогенно-осадочных пород, что и имевшее место при каледонской складчатости в $\text{C}_2\text{-O}_1$. Под воздействием гидротермальных растворов, обогащенных Au , As и, вероятно, S , образуются арсенопирит и пирит. В них содержатся включения всех обнаруженных рудных

минералов и небольшие примеси Co, Ni. Одновременно возникают минералы состава (Fe,Co,Ni)[AsS]. Арсенопирит может замещать пирит (см. рис. 3, а) и, возможно, развиваться по ильмениту или титаномагнетиту даек, при этом обособляется фаза состава TiO_2 (см. рис. 3, к). В пользу замещения пирита арсенопиритом свидетельствует наблюдаемый в нем дефицит As (см. рис. 3, а) [Тюкова, Ворошин, 2007]. Пирит, арсенопирит и пирротин (см. рис. 3, с) образуют раннюю минеральную ассоциацию. Для сфалерита характерна тесная ассоциация с халькопиритом, к которой иногда присоединяется тетраэдрит (см. рис. 3, d, g). Эти минералы относятся к поздней стадии оруденения – нарастают на пирит и арсенопирит (см. рис. 3, b, e, h) и выполняют трещины в них. Самородное золото образует сростания с пиритом и арсенопиритом, а также с пирротинном и халькопиритом (см. рис. 3, с, f, i, k, L, m). Самородное золото находится как в кварцевых жилах, так и в метасоматитах, что подтверждается результатами опробования, но в жилах золотины достигают больших размеров. Судя по тому, что ранние рудные минералы содержат включения более поздних, отложение минералов происходило, вероятно, близкоодновременно.

На Лазаретном рудопоявлении возраст золотой минерализации составляет $322,3 \pm 4$ млн лет, что соответствует границе C_1-C_2 . Оруденение сформировано в коллизионной обстановке, обусловленной закрытием палеоазиатского океана, и не обнаруживает явной связи со становлением Федоровской гранитоидной интрузии (D_1). Формирование золотого оруденения происходило при температуре 190–275 °C метаморфогенными, слабо концентрированными NaCl-растворами (3,3–6,6 мас. % NaCl-экв.) за счет относительно бедных золотом вмещающих пород, вероятно, без заметного участия глубинного источника вещества. Последнее подтверждается тем, что вместе с Au в рудах накапливается только As, привноса других химических элементов практически нет. Прост и минеральный состав руд. В газовой фазе флюидных включений в рудном кварце преобладает CO_2 , заметное количество азота коррелирует с содержанием золота в образце. Содержания Au в углеродистых сланцах и породах кундусульского комплекса обычно не превышают 2–3 кларка. Наблюдаемые 4,5-кратно надкларковые концентрации Au (и 20–30-кратно As) в околорудных породах могут быть результатом метаморфогенно-гидротермального процесса, приведшего к рудообразованию, и / или имевшего место в Ортон-Федоровском рудном узле в E_2-O_1 [Юрьев и др., 2001], с которым связано и наличие в рудных зонах слабо золотоносных кварцевых жил с молочно-белым кварцем.

Рассматривая Федоровское рудопоявление, Ю.Г. Щербаков и соавт. [2003] отмечают, что в результате внедрения Федоровской интрузии, которая считалась кембрийской, вокруг нее возник ореол повышенных содержаний Au (до 50 мг/т) и Fe. Золото сконцентрировалось в магнетите и пирите. В пределах этого ореола происходило дальнейшее рудообразование, тесно связанное с золотоносными дайками долеритов (D_{1-2}) и тектонической активностью, продолжавшейся до границы карбона и перми. Источниками Au, Ag являются магнетит девонских долеритовых даек, содержащий в среднем по 4 анализам 110 г/т Au и 35 г/т Ag (магнетита в дайках 2–7 %, дайки фактически сами являются рудой), и кембрийские слабозолотоносные жильно-метасоматические зоны. Установленный D_1 возраст гранодиоритов и пространственная близость к ним даек позволяют предположить их происхождение из одного магматического очага.

Связь золотого оруденения с дайками (преимущественно основного состава) является давно подмеченным фактом. Существуют разные варианты этой связи – от чисто структурной до парагенетической [Горячев, 2005]. Например, в Яно-Колымском поясе находится ряд месторождений золота, в которых оруденение сосредоточено в дайках, чаще всего среднего состава [Волков и др., 2008]. Дайки сами являются бедной рудой за счет вкрапленных сульфидов с высокими содержаниями Au. Золотоносность даек напрямую связана с интенсивностью их березитизации. Рудные столбы приурочены либо к зальбандам даек, либо к кварцевым жилам в дайках, часто на участках пересечения даек тектоническими нарушениями. На Березовском месторождении, где оруденение также часто локализуется в дайках, а основность магматических пород в рудном поле выше, к геохимическому профилю оруденения добавляются Cr, Ni, Co. На этих месторождениях многие данные указывают на схожесть оруденения в дайках с оруденением, связанным с интрузивами гранитоидов. Возраста даек и золотой минерализации в них близки. Дайки могут иметь общие магматические очаги с невоскрытыми или выходящими на поверхность близрасположенными гранитоидными интрузивами.

Геохимический профиль на Федоровском рудопоявлении близок таковому орогенных месторождений мафического профиля (Au, Ag, As, Te, Sb, W, Pb) [Горячев, 2019], а также месторождений золота в дайках (Au, Ag, As, Te, Sb, W, Bi, Ni, Cr, Co, Pb, Cu, Zn) [Волков и др., 2008]. Рассматриваемое оруденение имеет смешанное, магматогенно-метаморфогенное происхождение. Это связано с вовлечением в процесс метаморфогенно-гидротермального

рудообразования вещества золотоносных девонских даек, вероятно, парагенных с гранодиоритами Федоровской интрузии. Но возраст даек сильно оторван от возраста золотого оруденения, также и по условиям формирования и локализации оруденение отличается от связанного с гранитоидными интрузиями.

Возраст гранитоидов садринского комплекса, ко второй фазе внедрения которого относят Федоровскую интрузию, определен как $501,8 \pm 2,9$ млн лет [Руднев и др., 2004]. Восточно-Ортонский массив, расположенный в 10 км к северо-западу от Федоровской интрузии (см. рис. 1) и относимый к третьей фазе внедрения садринского комплекса, имеет возраст 510 ± 7 млн лет [Врублевский и др., 2016]. Ю.Г. Щербаков и др. [2003] считали Федоровскую интрузию сателлитом многофазного Тигертышского гранитоидного массива ($\text{Є}_3\text{-O}_1$) Мартайгинского комплекса. Его крупный батолит, к северо-востоку от выхода интрузии, примыкает к Балыксинскому разлому. По полученному возрасту отнести Федоровскую интрузию к какому-либо комплексу гранитоидов пока невозможно, можно только отметить, что из сопоставимых по возрасту пространственно ближе всего к ней находятся нижнедевонские гранодиориты тельбесского комплекса, распространенные у западной и северо-западной границ Мрасского антиклинория. Здесь с ними связаны скарновые месторождения магнетитовых руд, а в северной части Кузнецкого Алатау – Fe-скарново-редкометалло-золоторудное Амपालкское и Au-Cu-скарновое Ольгинское месторождения.

Заключение

Золотое оруденение Федоровского рудного поля сформировано метаморфогенными флюидами в период с C_2 по P_1 , в коллизийной обстановке закрытия палеоазиатского океана. Оно приурочено к долгоживущей тектонической зоне северо-восточного простирания, оперяющей Кузнецко-Алтайский главный разлом, и локализовано среди метаморфизованных в зеленосланцевой фации вулканогенно-осадочных пород V-Є_1 . Оруденение относится к золото-кварцевому убогосульфидному типу.

Лазаретное рудопроявление носит метаморфогенно-гидротермальный характер, среди вмещающих пород преобладают углеродистые сланцы, содержащие 1–3 % $\text{C}_{\text{орг}}$. Рудные жильно-метасоматические зоны приурочены к линейным зонам смятия и рассланцевания северо-восточного простирания, локализованы вблизи широко распространенных даек и силлов габбро-долеритов Кундусульского комплекса и заходят в них. Минеральный состав руд простой. Пирит, арсенопирит и пирротин выдели-

лись на ранней стадии оруденения, а халькопирит, сфалерит и тетраэдрит – близко по времени после них. Самородное золото мелкое и тонкое, находится в ассоциации с минералами как ранней, так и более поздней стадии. В кварцевых жилах оно более крупное и более высокопробное, чем в метасоматитах, которые развиваются главным образом по габбро-долеритам. Содержания золота в рудах невысокие. Оруденение сформировано при температуре 190–275 °C слабо концентрированными NaCl-растворами (3,3–6,6 мас. % NaCl-экв.), обогащенными Au, As и, вероятно, S. Золото имеет четкую корреляционную связь с мышьяком. Существенного накопления в рудных зонах других химических элементов не наблюдается. Флюидные включения в рудном кварце в основном газовой-жидкие, газовая фаза состоит из CO_2 и N_2 , с незначительным количеством CH_4 . Существует слабая положительная корреляция между содержаниями азота в газовой фазе флюидных включений и золота в рудах, что нередко для орогенного золотого оруденения в черносланцевых толщах. Оруденение не обнаруживает видимой связи с близрасположенной интрузией гранитоидов. Ресурсы рудопроявления невысокие.

Главной отличительной особенностью Федоровского рудопроявления является широкая распространенность даек долеритов (D_{1-2}) с сильно золотоносным магнетитом. Внедрение даек, вероятно, связано со становлением Федоровской гранитоидной интрузии, во всяком случае оно происходило близкоодновременно. Дайки явились важным, возможно, главным источником золота при последующем метаморфогенно-гидротермальном рудообразовании. Рудные тела с высокими содержаниями золота находятся в кварцевых жилах, залегающих между гидротермально измененными дайками долеритов или силлами габбро-долеритов и углеродсодержащими сланцами и приурочены к тектонически нарушенным участкам рудных зон. Углеродсодержащие породы распространены более локально, чем на Лазаретном рудопроявлении. Основное количество самородного золота, вместе с гесситом, аргентитом, пираргиритом, полибазитом, фрайбергитом и другими минералами, выделилось в позднюю низкотемпературную (150–200 °C) стадию. Самородное золото крупное, средней пробы, содержания его в рудах могут быть очень высокими. Кроме даек источником золота явились, вероятно, как и на Лазаретном рудопроявлении, слабо золотоносные метаморфогенные жильно-метасоматические зоны, возникшие в $\text{Є}_2\text{-O}_1$. Золото в рудах сопровождается Ag, Te, Ba, Se, As, Sb, Pb, W, Bi – подвижными элементами, характерными для верхней части глубоко проникающего оруденения. По возрасту золотое оруденение сильно

оторвано от даек и имеет смешанное, магматогенно-метаморфогенное происхождение. Сложное пространственное расположение рудных тел и крайне неравномерное распределение в них золота, среди прочих причин, пока не позволяют достоверно оценить ресурс рудопроявления.

Список источников

- Алабин Л.В., Калинин Ю.А.** Металлогения золота Кузнецкого Алатау. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 237 с.
- Бакшеев Н.А., Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Тараканов К.В.** Минералогия и минерально-сырьевые ресурсы золотоносной коры выветривания Федоровского рудного поля Кузнецкого Алатау // Геология, минералогия и перспективы развития минерально-сырьевых ресурсов : материалы междунар. научно-практ. конф. «Сатпаевские чтения». Алматы, 2009. С. 172–177.
- Баранова Н.Н., Афанасьева З.Б., Иванова Г.Ф., Миронова О.Ф., Колпакова Н.Н.** Характеристика процессов рудообразования на Au-(Sb-W) месторождении Олимпиада (по данным изучения минеральных парагенезисов и флюидных включений) // Геохимия. 1997. № 3. С. 282–293.
- Борисенко А.С.** Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Виноградов А.П.** Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Волков А.В., Егоров В.Н., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А., Горячев Н.А., Бирюков А.В.** Месторождения золота в дайках яно-колымского пояса // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50, № 4. С. 311–337.
- Врублевский В.В., Котельников А.Д., Руднев С.Н., Крупчатников В.И.** Эволюция палеозойского гранитоидного магматизма Кузнецкого Алатау: новые геохимические и U-Pb (SHRIMP-II) изотопные данные // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 2. С. 287–311.
- Горячев Н.А.** Дайки и золотое оруденение: генетическая или парагенетическая ассоциация? // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2005. № 1. С. 36–43.
- Горячев Н.А.** Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61, № 6. С. 3–18.
- Колпаков В.В., Неволько П.А., Калинин Ю.А., Кириллов М.В., Шадрин А.А., Редин Ю.О., Дульцев В.Ф.** Условия формирования золото-кварцевого оруденения Ортон-Федоровского рудно-россыпного узла (Горная Шория) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2015. Т. 21, № 1. С. 103–115.
- Колпаков В.В., Неволько П.А., Дульцев В.Ф., Фоминных П.А.** Новые данные об источниках питания золотоносной россыпи р. Федоровка (Горная Шория) // Разведка и охрана недр. 2016. № 4. С. 12–17.
- Николаева Л.А., Некрасова А.Н., Милев С.А., Яблокова С.В., Гаврилов А.М.** Геохимические особенности самородного золота месторождений различных рудно-формационных типов // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55, № 3. С. 203–213.
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Котляров В.А., Новоселов К.А., Илева А.А.** Особенности флоренсита золотоносных черносланцевых формаций Бодайбинского рудного района (на примере месторождений Копыловское и Кавказ) // Новое в познании процессов рудообразования : материалы 2-й Научной молодежной школы. М. : ИГЕМ РАН, 2012. С. 150–152.
- Петровская Н.В.** Самородное золото. М. : Наука. 1973. 347 с.
- Прокофьев В.Ю., Афанасьева З.Б., Иванова Г.Ф., Буарон М.К., Мариньяк Х.** Исследование флюидных включений в минералах Олимпиадинского Au-(Sb-W) месторождения (Енисейский край) // Геохимия. 1994. № 4. С. 1012–1029.
- Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А., Крук Н.Н., Бабин Г.А., Борисов С.М.** Раннепалеозойские гранитоидные батолиты Алтае-Саянской складчатой области (латерально-временная зональность, источники) // Доклады Академии наук. 2004. Т. 396, № 3. С. 369–373.
- Сокерина Н.В., Шанина С.Н., Исаенко С.И.** Газовый состав рудообразующего флюида золоторудного проявления Синильга, приполярный Урал // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2012. Т. 207, № 3. С. 12–15.
- Тюкова Е.Э., Ворошин С.В.** Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах верхне-Колымского региона. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2007. 107 с.
- Щербаков Ю.Г., Рослякова Н.В., Колпаков В.В.** Федоровское месторождение золота и перспективы золотоносности Южно-Сибирской рудной провинции (Горная Шория) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 10. С. 979–992.
- Юрьев А.А., Рында Г.С., Зейферт Л.Л., Касимова Т.А., Колыхалов Ю.М., Арнаутова Е.И., Юрьева В.В.** Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200 000. 2-е изд. Сер. Кузбасская. Лист N-45-XXIX / ред. Г.А. Бабин. Новокузнецк, 2001. 324 с.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnis M.** Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Treatise on Geochemistry / H.D. Holland, K.K. Turekian (eds.). Oxford : Elsevier, 2014. V. 13. P. 119–142.
- Duit W., Jansen J.H., Breemen A., Bos A.** Ammonium micas in metamorphic rocks as exemplified by Dome de L'Agout (France) // Amer. J. Science. 1986. V. 286 (9). P. 702–732.
- Grant J.A.** The isocon diagrams – a simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration // Econ. Geol. 1986. V. 42. P. 91–106.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F.** Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // Ore Geol. Rev. 1998. V. 13. P. 7–27.
- Hofstra A.H., Leventhal J.S., Northrop H.R., Landis G.P., Rye R.O., Birak D.J., Dahl A.R.** Genesis of sediment-hosted disseminated gold deposits by fluid mixing and sulfidization: Chemical-reaction-path modeling of ore-depositional processes documented in the Jerritt Canyon district // Nev. Geol. 1991. V. 19. P. 36–40.
- Röedder E.** Fluid inclusions. Berlin ; Boston : De Gruyter, 1984. 646 p. (Reviews in Mineralogy & Geochemistry; v. 12). DOI: 10.1515/9781501508271
- Saunders J.A., Hofstra A.H., Goldfarb R.J., Reed M.H.** Geochemistry of hydrothermal gold deposits // Treatise on Geochemistry / H.D. Holland, K.K. Turekian (eds.). Oxford : Elsevier, 2014. V. 13. P. 383–424.

References

- Alabin L.V., Kalinin Yu.A. *Metallogeniya zolota Kuznetskogo Alatau* [Metallogeny of gold in Kuznetsk Alatau]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 1999. 237 p. In Russian
- Bakshiev N.A., Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Tarakanov K.V. *Mineralogiya i mineralno-syrjevye resursy zolotonosnoi kory vyvetrivaniya Fedorovskogo rudnogo polya Kuznetskogo Alatau* [Mineralogy and mineral resources of the gold-bearing weathering crust of the Fedorovsky ore field of the Kuznetsk Alatau] // *Geologiya, mineraniya i perspektivy razvitiya mineralno-syrjevykh resursov* / "Satpaevskie tshteniya". Almaty. 2009. pp. 172–177. In Russian
- Baranova N.N., Afanas'eva Z.B., Ivanova G.F., Mironova O.F., Kolpakova N.N. Mineralization at the Olimpiada Au-(Sb-W) deposit: evidence from mineral parageneses and fluid inclusions // *Geochemistry International*. 1997. 35 (3). pp. 239–249.
- Borisenko A.S. *Izutcheniye solevogo sostava rastvorov gasovo-zhidkikh vklyutchenii v mineralakh metodom kriometrii* [Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry] // *Russian Geology and Geophysics*. 1977. No. 8. pp. 16–27. In Russian
- Vinogradov A.P. *Srednie sodержaniya himicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornykh porod semnoi kory* [Average contents of chemical elements in the main types of eruptive rocks of the Earth's crust] // *Geokhimiya*. 1962. No. 7. pp. 555–571. In Russian
- Volkov A.V., Egorov V.N., Prokof'ev V.Yu., Sidorov A.A., Goryachev N.A., Biryukov A.V. Gold deposits in dikes of the Yana-Kolyma belt // *Geology of ore deposits*. 2008. 50 (4). pp. 311–337.
- Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Rudnev S.N., Krupchatnikov V.I. Evolution of the Paleozoic granitoid magmatism in the Kuznetsk Alatau: new geochemical and U-Pb (SHRIMP-II) isotope data // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. 57 (2). pp. 225–246.
- Goryachev N.A. *Daiki i zolotoe orudenenie: geneticheskaya ili parageneticheskaya asociatsiya?* [Dikes and gold mineralization: a genetic or paragenetic association?] // *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2005. No. 1. pp. 36–43. In Russian
- Goryachev N.A. Gold deposits in the Earth's history // *Geology of ore deposits*. 2019. 61 (6). pp. 495–511.
- Kolpakov V.V., Nevolk P.A., Kalinin Yu.A., Kirillov M.V., Shadrina A.A., Redin Y.O., Dultsev V.F. *Usloviya formirovaniya soloto-kvarzevogo orudeneniya Orton-Fedorovskogo rudno-rossypnogo uzla (Gornaya Shoriya)* [Conditions for the formation of gold-quartz mineralization of the Orton-Fedorovsky ore-placer district (Gornaya Shoria)] // *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*. 2015. V. 21. No. 1. pp. 103–115. In Russian
- Kolpakov V.V., Nevolk P.A., Dultsev V.F., Fominykh P.A. *Novye dannye ob istotchnikakh pitaniya zolotonosnoi rossypy r.Fedorovka (Gornaya Shoria)* [Ore food sources of gold placers Fedorovka River gold placer (Gornaya Shoria)] // *Prospect and protection of mineral resources*. 2016. No. 4. pp. 12–17. In Russian
- Nikolaeva L.A., Nekrasova A.N., Milyaev S.A., Yablokova S.V., Gavrilov A.M. Geochemistry of native gold from Deposits of various types // *Geology of Ore Deposits*. 2013. 55 (3). pp. 176–184.
- Palenova E.E., Belogub E.V., Kotlyarov V.A., Novoselov K.A., Ileva A.A. *Osobennosti florensita zolotonosnykh tchernoslantsevnykh formazii Bodaibinskogo rudnogo raiona (na primere mestorozhdenii Kopylovskoye I Kavkaz)* [Features of the florencite of the gold-bearing black-shale formations of the Bodaibinsky ore region (on the example of the Kopylovskoye and Kavkaz deposits)] // *Novoe v posnani processov rudobrasovaniya*. Moscow: IGE RAN. 2012. pp. 150–152. In Russian
- Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* [Native Gold]. Moscow: Nauka. 1973. 347 p. In Russian
- Prokof'ev V.Yu., Afanas'eva Z.B., Ivanova G.F., Buaron M.K., Marin'yak H. *Issledovanie flyuidnykh vklyutchenii v mineralakh Olimpiadinskogo Au-(Sb-W) mestorozhdeniya (Eniseiskii kryazh)* [Study of fluid inclusions in minerals of the Olympiadinsky Au-(Sb-W) deposit (Yenisei Ridge)] // *Geokhimiya*. 1994. No. 4. pp. 1012–1029. In Russian
- Rudnev S.N., Vladimirov A.G., Kruk N.N., Ponomarchuk V.A., Babin G.A., Borisov S.M. Early Paleozoic granitoid batholiths of the Altai-Sayan folded region (lateral-temporal zoning and sources) // *Doklady Earth Sciences*. 2004. 396 (4). pp. 492–495.
- Sokerina N.V., Shanina S.N., Isaenko S.I. *Gazovyi sostav rudobrazuyushchego flyuida zolotorudnogo prozveniya Sinil'ga, pripolyarnyi Ural* [Gas composition of ore-forming fluid of the Sinilga gold deposit, polar Urals] // *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the RAS*. 2012. V 207. No. 3. pp. 12–15. In Russian
- Tyukova E.E., Voroshin S.V. *Sostav i paragenesis arsenopyrita v mestorozhdeniyakh i vmeshayushih porodakh verhne-Kolymskogo regiona* [Composition and parageneses of arsenopyrite in deposits and host rocks of the upper-Kolyma region] // *Magadan: SKVNII DVO RAN*. 2007. 107 p. In Russian
- Shcherbakov Yu.G., Roslyakova N.V., Kolpakov V.V. Fedorovskoye gold deposit and gold-bearing potential of the South-Siberian ore province (Mountain Shoria) // *Russian Geology and Geophysics*. 2003. 44 (3). pp. 939–953.
- Yur'ev A.A., Rynda G.S., Zeifert L.L., Kasimova T.A., Kolyhalov Yu.M., Arnautova E.I., Yur'eva V.V. *Ob "yasnitel'naya zapiska k Gosudarstvennoy geologicheskoy karte Rossiyskoy Federazii masshtaba 1 : 200 000. Izd. 2. Seriya Kuzbasskaya. List N-45-XXIX* [Explanatory note to the state geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. Series Kuzbass. Sheet N-45-XXIX] / edit by G.A. Babin. Novokuznetsk. 2001. 324 p. In Russian
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnis M. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. In: Holland H.D. and Turekian K.K. (eds.) *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier. 2014. V. 13. pp. 119–142.
- Duit W., Jansen J.H., Breemen A., Bos A. Ammonium micas in metamorphic rocks as exemplified by Dome de L'Agout (France) // *Amer. J. Science*. 1986. V. 286 (9). pp. 702–732.
- Grant J.A. The isocon diagrams – a simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration // *Econ. Geol.* 1986. V. 42. pp. 91–106.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // *Ore Geol. Rev.* 1998. V. 13. pp. 7–27.
- Hofstra A.H., Leventhal J.S., Northrop H.R., Landis G.P., Rye R.O., Birak D.J., Dahl A.R. Genesis of sediment-hosted disseminated gold deposits by fluid mixing and sulfidization: Chemical-reactionpath modeling of ore-depositional processes documented in the Jerritt Canyon district // *Nev. Geol.* 1991. V. 19. pp. 36–40.

Röedder E. (Ed.). Fluid inclusions. De Gruyter, Berlin, Boston. 1984. DOI: 10.1515/9781501508271

Saunders J.A., Hofstra A.H., Goldfarb R.J., Reed M.H. Geochemistry of hydrothermal gold deposits. In: Holland H.D., Turekian K.K. (eds.) Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier. 2014. V. 13. pp. 383–424.

Информация об авторах:

Колпаков В.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рудообразующих систем, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: vladk@igm.nsc.ru

Неволько П.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рудообразующих систем, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший преподаватель кафедры петрографии и геологии рудных месторождений, геолого-геофизический факультет, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: nevolko@igm.nsc.ru

Редина А.А., научный сотрудник, лаборатория рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: redina@igm.nsc.ru

Редин Ю.О., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рудообразующих систем, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: redin@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kolpakov V.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of ore-forming systems, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: vladk@igm.nsc.ru

Nevolko P.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of ore-forming systems, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; Senior Lecturer, Section of Petrography and Ore Deposits Geology, Department of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: nevolko@igm.nsc.ru

Redina A.A., Researcher, Laboratory of ore content of alkaline magmatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: redina@igm.nsc.ru

Redin Y.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of ore-forming systems, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: redin@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.03.2021; одобрена после рецензирования 14.02.2022; принята к публикации 14.06.2022

The article was submitted 22.03.2021; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publication 14.06.2022