

Научная статья  
УДК 550.424  
doi: 10.17223/25421379/23/7

## ТИПОХИМИЗМ ПИРИТА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОВЕТСКОЕ (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)



Сергей Анатольевич Сильянов<sup>1</sup>, Анатолий Максимович Сазонов<sup>2</sup>,  
Борис Михайлович Лобастов<sup>3</sup>, Дарья Александровна Шадрина<sup>4</sup>,  
Ксения Александровна Тихонова<sup>5</sup>, Николай Сергеевич Медведев<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>6</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> silyanov-s@mail.ru

<sup>2</sup> sazonov\_am@mail.ru

<sup>3</sup> lbm02@ya.ru

<sup>4</sup> dshadrina-gg18@mail.ru

<sup>5</sup> tihonovakseniya94@mail.ru

<sup>6</sup> medvedev@niic.nsc.ru

**Аннотация.** Впервые приведены результаты изучения распределения элементов-примесей в пирите месторождения Советское (LA-ICP-MS). Примесным («невидимым») золотом обогащен пирит из кварцевых жил (~ 0,56 ppm) и крупнокристаллический гнездовой пирит (~ 0,83 ppm). Минерал из зальбандов кварцевых жил и вмещающих сланцев содержит меньше Au (~ 0,15 и ~ 0,16 ppm). Изученные разновидности пирита контрастно разделены на классификационной диаграмме As–Se. На основании содержания Se в минерале определены температуры его кристаллизации (309–507 °С).

**Ключевые слова:** месторождение Советское, Енисейский кряж, пирит, геохимия, «невидимое» золото, LA-ICP-MS

**Источники финансирования:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-45-243001\20 и частично поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 121031700315-2.

**Для цитирования:** Сильянов С.А., Сазонов А.М., Лобастов Б.М., Шадрина Д.А., Тихонова К.А., Медведев Н.С. Типохимизм пирита золоторудного месторождения Советское (Енисейский кряж) // Геосферные исследования. 2022. № 2. С. 112–126. doi: 10.17223/25421379/23/7

Original article  
doi: 10.17223/25421379/23/7

## PYRITE TYPOCHEMISTRY OF THE SOVETSKOE GOLD DEPOSIT (YENISEI RIDGE, RUSSIA)

Sergey A. Silyanov<sup>1</sup>, Anatoly M. Sazonov<sup>2</sup>, Boris M. Lobastov<sup>3</sup>,  
Daria A. Shadrina<sup>4</sup>, Kseniya A. Tikhonova<sup>5</sup>, Nikolay S. Medvedev<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>6</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> silyanov-s@mail.ru

<sup>2</sup> sazonov\_am@mail.ru

<sup>3</sup> lbm02@ya.ru

<sup>4</sup> dshadrina-gg18@mail.ru

<sup>5</sup> tihonovakseniya94@mail.ru

<sup>6</sup> medvedev@niic.nsc.ru

**Abstract.** The results of studying the distribution of trace elements (LA-ICP-MS) in the pyrite of the Sovetskoye gold ore deposit (Yenisei Ridge, Russia) are presented. The Sovetskoye deposit is located in the northern part of the Yenisei Ridge and is one of the largest and most developed for a long time within the Yenisei gold province. The deposit belongs to the gold-quartz type, and the main sulfide mineral is pyrite.

Until now, no information has been provided on the distribution of trace elements in the pyrite of the deposit. We have studied pyrite from the host shales, quartz veins and their selvages, as well as coarse-crystalline pyrite. Electron microscopic studies have shown that the content of iron and sulfur in the studied samples varies within (wt.%): Fe 42.67–48.47; S 50.61–55.04. The deficiency in the anionic and cationic parts for some samples is compensated by the presence of impurities of arsenic (0.48–3.02 wt.%) and cobalt (1.71–3.38 wt.%). Taking into account the isomorphism ( $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Co}$ ;  $\text{S} \leftrightarrow \text{As}$ ), the S/Fe ratio averages 1.98, which indicates a high chemical stoichiometry of the mineral.

A total of 67 point determinations of trace elements were performed using the LA-ICP-MS method. The most typical (~ 90 % analyzes) impurities are, ppm: Co ~ 0.2–1700.0; Ni ~ 1.8–1300; Zn ~ 1.2–80.0; Ge ~ 3.0–5.7; As ~ 1.4–3700.0; Se ~ 4.6–50; Pb ~ 0.1–390.0. More than 50 % of analyzes also contain, ppm: Cu ~ 0.6–1000.0; Ag ~ 0.2–10.0; Sb ~ 0.04–13.00; Bi ~ 0.1–25.0. In about one third of analyzes, Te ~ 1.0–7.0 ppm and Au ~ 0.1–1.3 ppm were found. In single analyzes are present, ppm: V ~ 0.1–5.0; Cr 7.0; Mn ~ 39.0–110.0; Ga ~ 0.3–1.2; In ~ 0.2–0.9; Sn ~ 0.2–0.6; W ~ 0.5–2.1; Tl ~ 0.1–0.3. Mo and Cd contents are below the detection limit in all analyzes.

The "invisible" gold is enriched in pyrite from quartz veins (~ 0.56 ppm) and coarse-crystalline pyrite (~ 0.83 ppm). Mineral from selvages of quartz veins and host shales contains less Au (~ 0.15 and ~ 0.16 ppm). The position of the points of composition on the Au-As diagram below the line of structurally bound gold indicates its isomorphic nature. However, the established concentrations of the metal are not of industrial significance, and the bulk of the gold at the deposit is present in native form.

The studied pyrite varieties are enriched in silver relative to gold (Au/Ag from 0.09 to 3.75), the excess of silver can be associated in the form of ultrafine particles of Au-Ag sulfides, or in the form of compounds with Te, Se, Sb, Bi.

The most contrastingly studied pyrite varieties differ in the content of Se and As. Pyrite from the host shales is characterized by the highest As and Se contents. Pyrite from quartz veins contains minimal As concentrations. Coarse-crystalline pyrite occupies a region of low Se and As contents. Pyrite from selvage quartz veins has a variable composition.

Based on the Se content in ore pyrite, the temperatures of mineral formation were established: pyrite from the host shales ~ 343 °C; coarse-crystalline pyrite ~ 417 °C; pyrite from quartz veins ~ 456 °C; pyrite from selvages of quartz veins ~ 439 °C. These parameters of mineral formation show a significant heterogeneity of the temperature field in the area of ore formation.

**Keywords:** *Sovetskoe gold deposit, pyrite, geochemistry, "invisible" gold, LA-ICP-MS*

**Source of financing:** The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-45-243001\20 and partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project number 121031700315-2.

**For citation:** Silyanov, S.A., Sazonov, A.M., Lobastov, B.M., Shadrina, D.A., Tikhonova, K.A., Medvedev, N.S. (2022) Pyrite typochemistry of the Sovetskoe gold deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 112–126. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/23/7

## Введение

В настоящее время актуальным подходом в изучении золоторудных месторождений является комплексирование лабораторных методов минераграфии и геохимии с применением LA-ICP-MS. Последний является одним из наиболее значимых инструментов, позволяющих проводить парагенетический анализ микроэлементов, определять основные минералы-носители и концентраторы благородного металла, его геохимические ассоциации и источники. Большое количество публикаций с результатами подобных работ показывает состоятельность и эффективность таких исследований [Sung et al., 2009; Large et al., 2011; Gregory et al., 2015; Meffre et al., 2016; Maslennikov et al., 2017; Augustin, Gaboury, 2019; Wu et al., 2019; Large, Maslennikov, 2020; Gourcerol et al., 2020].

Пирит является одним из наиболее распространенных сульфидных минералов в месторождениях золота. Многими работами показана возможность концентрирования им «невидимого» золота и широкого ряда других примесных элементов [Large, Maslennikov, 2020; Dmitrijeva et al., 2020; и др.].

Подобные исследования распределения элементов-примесей в пирите с применением LA-ICP-MS в настоящее время очень актуальны и показывают, что получаемая геохимическая информация может быть использована при интерпретации генезиса золоторудных месторождений.

Месторождение Советское является одним из наиболее крупных и длительно разрабатываемых в пределах Енисейской золоторудной провинции. Месторождение относится к золото-кварцевому типу, а главным сульфидным минералом является пирит. Несмотря на более чем вековую историю изучения месторождения, некоторые аспекты золото-кварц-сульфидной минерализации не освещены в научной литературе.

Одним из них является геохимическая характеристика пирита – главного сульфидного минерала месторождения – с применением современных методов анализа (LA-ICP-MS). В недавней работе Г.А. Пальяновой и соавт. приводятся краткие данные по содержанию элементов-примесей в пирите месторождения, но основной целью статьи является изучение составов пиритина как потенциального индикатора

условий рудного минералообразования [Пальянова и др., 2019]. В статьях А.А. Томиленко и коллег была предпринята попытка изучения распределения РЗЭ во флюидных включениях в кварце месторождения [Томиленко и др., 2008; Tomilenko et al., 2010]. Этот же коллектив исследователей провел прецизионное изучение составов флюидов из включений в кварце, пирите и самородном золоте месторождения [Бульбак и др., 2020]. До настоящего времени нет сведений о микроэлементном составе пирита – главного сульфидного минерала руд Советского месторождения. Поэтому основной целью нашей работы явилось изучение распределения элементов-примесей в пирите месторождения с применением LA-ICP-MS.

### Геология месторождения

Месторождение золота Советское расположено в северо-восточной части Енисейского кряжа, который представляет собой неопротерозойский (860–800 млн лет) коллизионный ороген, перешедший к рифтогенной стадии развития на рубеже ~750–680 млн лет [Kuzmichev, Sklyarov, 2016].

Рудное поле месторождения сложено породами удерейской и горбилкокской свит сухопитской серии. Породы горбилкокской свиты представлены филлитовидными сланцами. Алеврито-глинистые углистые сланцы и алевролитовые сланцы удерейской свиты непосредственно вмещают рудные тела месторождения (рис. 1). В пределах 0,5–1,0 км на северо-восток от рудных тел закартированы небольшие тела долеритов и дайки трахитов. Месторождение приурочено к юго-западному крылу Оллоноконской антиклинали, осложненной многочисленными складками более высоких порядков и тектоническими разрывами взбросового, взбросо-сдвигового характера. На месторождении преобладают дизъюнктивные нарушения северо-западного простирания, которые являются основными рудоконтролирующими структурами.

Рудные тела ( $\text{SiO}_2$  до 80 мас.%) сложены жильным кварцем, золотосодержащими вмещающими углеродсодержащими серицитовыми милонитами (в практике называемыми сланцами) и сульфидами (до 5 мас. %). Главным сульфидом в рудах является пирит; в подчиненном количестве развиты пирротин, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит и самородное золото. Обогащенные золотом участки кварцево-жильных зон характеризуются средним содержанием благородного металла 10–25 г/т, в отдельных случаях его содержание достигает 3 600 г/т [Томиленко и др., 2008].

На начальном этапе рудообразования сформировались сложные по морфологии кварцево-жильные тела, группирующиеся в зоны, а также гнездовые,

прожилковые выделения пирита, пирротина и арсенопирита. Сульфидная минерализация развита в кварцево-жильных образованиях, их зальбандах и вмещающих милонитизированных сланцах. Самородное золото этого этапа преимущественно мелкое и развито в виде включений в ранних сульфидах и кварце.

Формирование поздней рудной ассоциации происходило после длительного перерыва и дробления ранее сформированного кварцево-сульфидного материала [Петровская, 1954]. Рудная ассоциация этого этапа приурочена к трещинам субмеридианального и северо-восточного направлений. Эти образования представляют прожилковую вкрапленность и гнезда сидерита, анкерита, кристаллически зернистые агрегаты пирита, пирротина, халькопирита, сфалерита, галенита и видимых частиц самородного золота. Здесь же в сростании с сульфидами полиметаллов отмечаются спорадические проявления висмутита, козалита, самородного висмута, блеклых руд, самородного серебра и теллуридов [Петровская, 1954]. Большая часть видимого самородного золота представлена мономинеральными агрегатами, выполняющими межзерновое пространство и трещины катаклаза в кварце.

Всего на месторождении известно восемь рудоносных кварцево-жильных зон, шесть из которых отработаны. Седьмая и восьмая зоны опоискованы частично и расположены на глубоко залегающих флангах отработанных кварцево-жильных зон. Возможно, седьмая и восьмая рудные зоны будут являться в будущем предметом подземной отработки. За период эксплуатации месторождения открытым и подземным способами добыто около 90 т металла. Подземная отработка руд на месторождении прекращена в начале 1990-х гг., карьерная отработка продолжалась до 2016 г. В настоящее время месторождение не разрабатывается.

Термобарогеохимические исследования, выполненные А.А. Томиленко и Н.А. Гибшер с коллегами свидетельствуют, что безрудные кварцево-жильные тела месторождения сформированы в процессе регионального зеленосланцевого метаморфизма при температурах 100–410 °С и давлении 0,5–1,5 кбар, гомогенными флюидами соленостью 4–8 мас. % NaCl-экв., с содержанием  $\text{CO}_2 < 12,5$  мол. %,  $\text{CH}_4 < 1,3$  мол. %,  $\text{N}_2 < 1,7$  мол. %. Рудоносные кварцево-жильные зоны образовались при более высоких температурах – 100–630 °С, давлении 0,7–2,0 кбар, гомогенными и гетерогенными растворами, соленость которых достигала 20–25 мас. % NaCl-экв., содержания  $\text{CO}_2$  29,3–62,0 мол. %,  $\text{CH}_4$  0,0–3,0 мол. %,  $\text{N}_2$  2,7–13,2 мол. % [Томиленко, Гибшер, 2001; Tomilenko et al., 2010].

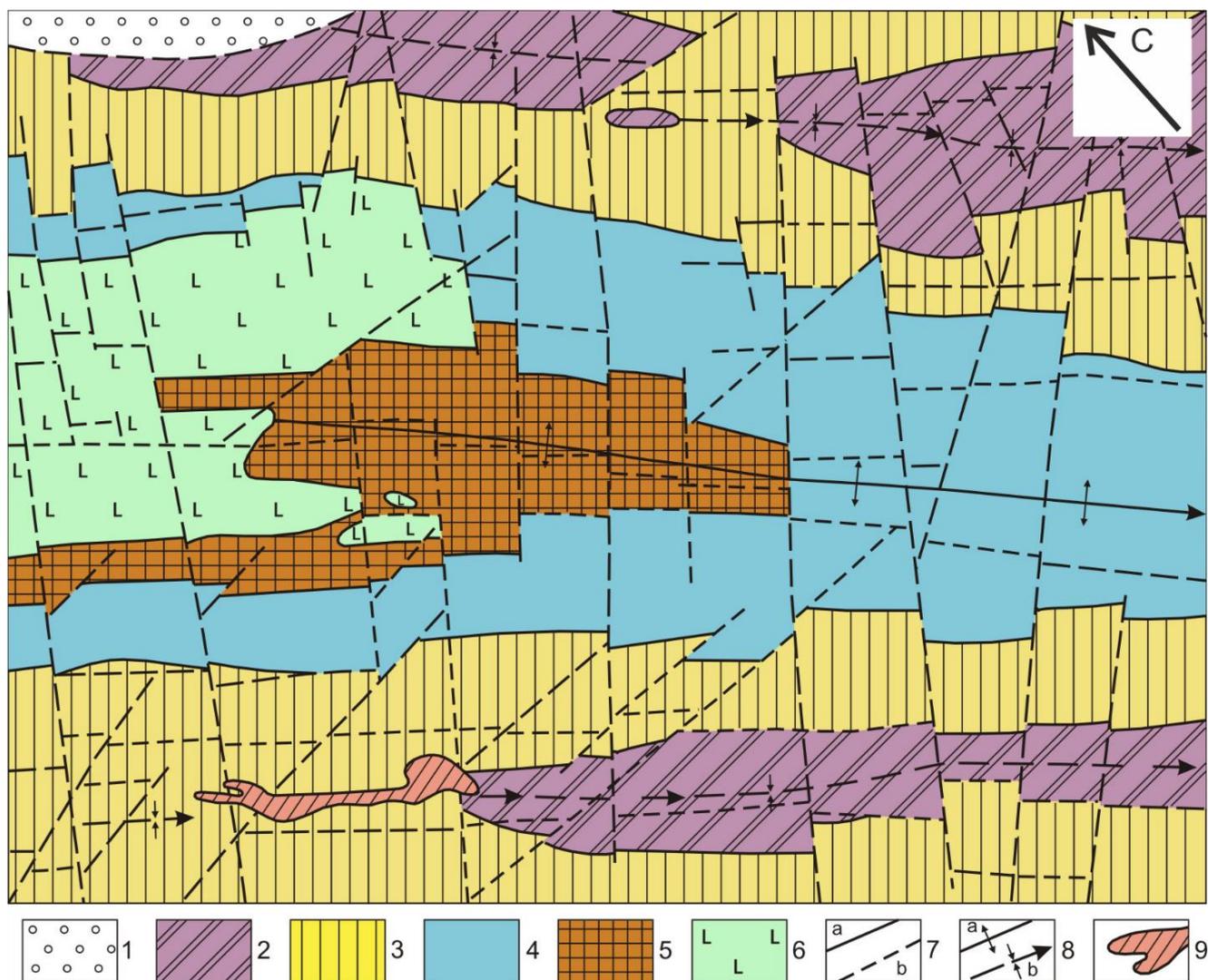


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Советское [Сазонов, 1998]

1 – чингасанская серия, лопатинская свита (RF<sub>3lp</sub>), песчаники и гравелиты; 2–5 – сухопитская серия: 2 – верхняя подсвита удерейской свиты (RF<sub>2ud<sub>3</sub></sub>), темно-серые до черных алеврито-глинистые сланцы с прослоями контрастно-слоистых сланцев и мелкозернистых песчаников; 3 – нижняя и средняя подсвиты удерейской свиты (RF<sub>2ud<sub>1+2</sub></sub>), нерасчлененные отложения, алеврито-глинистые сланцы; 4 – горбилоская свита (RF<sub>2gb</sub>), зеленые алеврито-глинистые сланцы; 5 – кординская и горбилоская свиты (RF<sub>2kd + gb</sub>), нерасчлененные отложения, зеленые алевриты, линзы и прослои доломитизированных известняков; 6 – измененные долериты и габбро-долериты токминского комплекса (βRF<sub>3tk</sub>); 7, а – границы стратифицированных и интрузивных пород, 7, б – разломы; 8 – оси складок: а – Татьянинской антиклинали, б – синклиналей; 9 – проекция контура отработанных руд на дневную поверхность

Fig. 1. Geological map of Sovetskoe gold deposit [Sazonov, 1998]

1 – Chingasan series, Lopatinskaya suite (RF<sub>3lp</sub>), sandstones and gravelstones; 2-5 – Sukhopitskaya series: 2 – upper subformation of the Udereiskaya suite (RF<sub>2ud<sub>3</sub></sub>), dark gray to black silty-argillaceous shales with interlayers of contrasting-layered shales and fine-grained sandstones; 3 – lower and middle subformations of the Udereiskaya suite (RF<sub>2ud<sub>1+2</sub></sub>), undivided deposits, silty-clayey shales; 4 – Gorbilok Formation (RF<sub>2gb</sub>), green silty-clayey shales; 5 – Kordinskaya and Gorbilokskaya formations (RF<sub>2kd + gb</sub>), undivided deposits, green siltstones, lenses and interlayers of dolomitized limestones; 6 – dolerites and gabbro-dolerites of the Tokminsky complex (βRF<sub>3tk</sub>); 7 – a) boundaries of stratified and intrusive rocks, b) faults; 8 – axes of folds: a – Tatiana anticline, b – synclines; 9 – projection of the contour of mined ores on the day surface

Проведенное Ag-Ag датирование гидротермальных серицитов месторождения указывает на четыре (~ 890, ~ 850, ~ 830–820, ~ 730 млн лет) возрастных эпизода формирования кварцево-жильных тел, при-

чем два из них (~ 890, ~ 850 млн лет) – незолотоносных [Томиленко и др., 2008; Tomilenko et al., 2010]. На сегодняшний день существует три гипотезы генезиса месторождения – осадочная [Петров, 1974], ме-

таморфогенная [Буряк, 1982; Сазонов и др., 1991; Сазонов, 1998; Сазонов и др., 2010] и магматическая [Петровская, 1954; Ли, 2001].

### Образцы и методы исследования

Штуфные образцы, содержащие рудную минерализацию (пирит, пирротин, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит, самородное золото), отобраны из Северо-Западного карьера месторождения. В дальнейшем из них изготовлены полированные аншлифы для минераграфического, электронно-микроскопического и LA-ICP-MS изучения.

Химический состав пирита и ассоциирующих минералов изучен с применением сканирующего электронного микроскопа (SEM) Tescan Vega III SBH с интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа (EDS) Oxford X-Act в R&D центре Норникель СФУ, Красноярск (аналитик С.А. Сильянов) и Томском региональном центре коллективного пользования НИ ТГУ (аналитик Е.В. Корбовяк). Исследования выполнены при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 1,2 нА. Аналитический спектр накапливался в течении 120 с. Для анализа использованы следующие аналитические линии: S (K $\alpha$ ), Fe (K $\alpha$ ), Co (K $\alpha$ ), Ni (K $\alpha$ ), Cu (K $\alpha$ ), Zn (K $\alpha$ ), As (L $\alpha$ ), Sb (L $\alpha$ ) и Pb (M $\alpha$ ). В качестве внутренних стандартов использованы чистые элементы (Co, Ni), а также FeS, FeS<sub>2</sub>, FeAsS, ZnS, CuFeS<sub>2</sub>, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, PbTe. Предел обнаружения составил 0,1 мас. %. Данные анализа обрабатывались с помощью программного обеспечения Oxford Instruments.

LA-ICP-MS исследования выполнены на квадрупольном масспектрометре iCAP Qc (Thermo Scientific) с устройством лазерного пробоотбора NWR 213 (ESI). Измерения проведены при следующих инструментальных параметрах: длина волны лазера 213 нм, диаметр пучка лазера 100 мкм, частота импульсов лазера 20 Гц, продолжительность действия лазерного излучения на образец за один импульс 4 нс, плотность энергии лазерного излучения 9 Дж/см<sup>2</sup>, продолжительность накопления сигнала одного измерения 0,05 с на аналитический изотоп.

Градуировка выполнена по стандартным образцам NIST 610, 612. В качестве внутреннего стандарта использовано железо (изотоп <sup>57</sup>Fe).

При проведении анализа измерения выполнялись в точках диаметром 100 мкм. В каждой точке проводилось по 10 параллельных измерений. Положение точек сканирования выбиралось таким образом, чтобы в испаряемый материал не попали видимые включения и дефекты (микротрещины) образца. Из измеренных интенсивностей при помощи градуировки по стандартным образцам NIST 610, 612 с учетом сигналов

внутреннего стандарта в каждой точке были рассчитаны средние значения и доверительные интервалы содержания определяемых элементов. Стандартное отклонение параллельных измерений обычно составляло 10–20 отн. % и не превышало 30 отн. %.

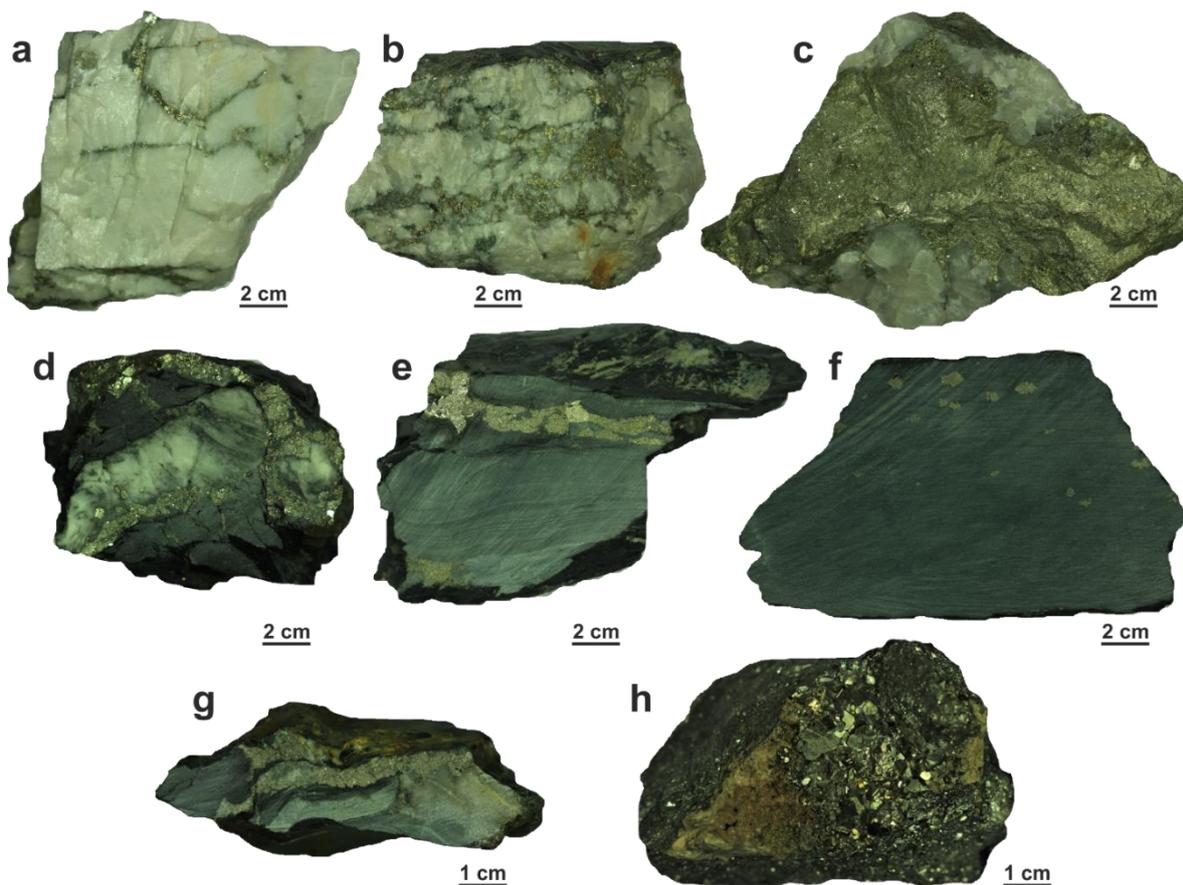
### Результаты минералого-геохимических исследований

*Пиритовая минерализация.* По данным Н.В. Петровской, на месторождении выделяется три разновидности пирита: крупнокристаллические агрегаты, часто совместно с арсенопиритом; мелкокристаллические жилки и гнезда в ассоциации с халькопиритом, сфалеритом и галенитом; тонкозернистые коллоидные выделения по трещинам в кварце [Горностаев, 1936; Петровская, 1954; Петров, 1974; Сазонов и др., 1991; Сазонов, 1998].

Нами для исследования подобраны образцы пирита из прожилков в кварцевых жилах (рис. 2, a, b); из зальбандов кварцевых жил (рис. 2, b, d); гнездовой крупнокристаллический пирит (рис. 2, c, h); пирит из вмещающих углеродистых сланцев (рис. 2, f). В ассоциации и во включениях в пирите из сланцев развиты пирротин, халькопирит, сфалерит и галенит. Их особенностью является также наличие включений и каемок минералов редких земель (ксенотим-(Y), монацит-(Ce), апатит).

В раннем пирите сланцев, преимущественно кубического габитуса, единично отмечаются субмикронные включения самородного золота низкой пробы (750). Для позднего пирита из кварцевых жил и их зальбандов характерна ассоциация с пирротин, галенитом, халькопиритом, сфалеритом, самородным золотом высокой пробы (900–960) и редкими теллуридами (алтаит). Морфология этого пирита обычно представлена комбинациями куба, пентагондодекаэдра и октаэдра. Поздний гнездовой крупнокристаллический пирит, как правило, свободен от включений других рудных минералов.

Самородное золото в рудах обычно ассоциирует с кварцем в виде пленочных и трещинных выделений в жилах вне сростаний с сульфидами [Петровская, 1954]. Это послужило для Н.В. Петровской основанием выделить стадию самородного золота, заключающую отложение сульфидов полиметаллов. Однако нами неоднократно наблюдалась тесная ассоциация благородного металла и позднего пирита в кварцевых жилах в ассоциации с галенитом и сфалеритом (рис. 3). Так, в одном из образцов с ураганым содержанием металла самородное золото образует тесные сростания с пиритом, иногда в виде ориентированных включений, напоминающих структуры распада (см. рис. 3, a).

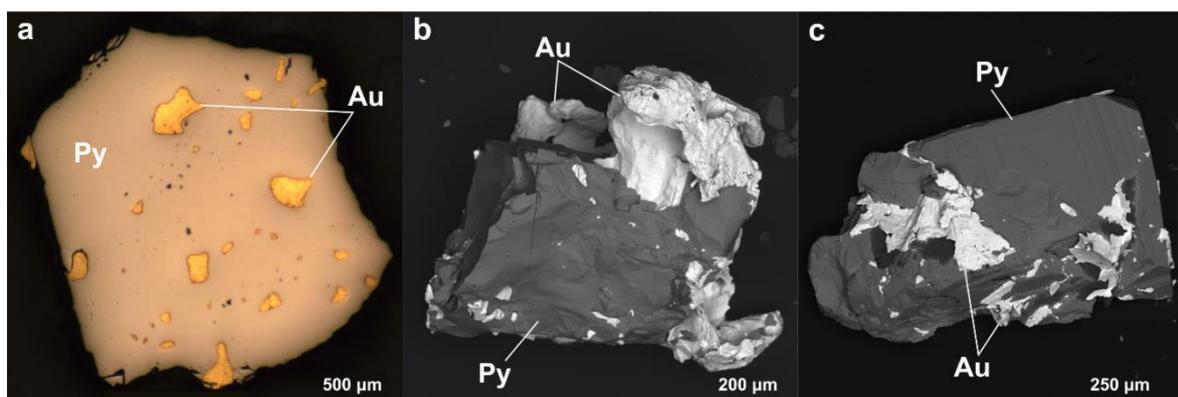


**Рис. 2. Пирит месторождения Советское**

a – прожилки мелкозернистого пирита в жильном молочном кварце (образец 1/71); b – мелкозернистый пирит в трещинах и зальбанде жилы молочного кварца (образец СП-1); c – гнездо пирита в ядре жилы молочного кварца (образец СП-2); d – эвгедральный пирит в зальбанде жилы молочного кварца (образец 1/79); e – прожилок кристаллов пирита в углеродистом сланце (образец 1/55); f – эвгедральные кристаллы пирита в углеродистом сланце (образец 1-1/3); g – кварц-пиритовый прожилок в углеродистом сланце (образец 1/67); h – крупные эвгедральные кристаллы пирита (образец 2/27)

**Fig. 2. Hand samples of pyrite from Sovetskoe gold deposit**

a – veins of fine-grained pyrite in vein milk quartz (sample 1/71); b – fine-grained pyrite in cracks and a selvage of a vein of milk quartz (sample SP-1); c – crystalline pyrite in the core of the vein of milk quartz (sample SP-2); d – euhedral pyrite in the selvage of a vein of milk quartz (sample 1/79); e – veinlets of pyrite crystals in carbonaceous shale (sample 1/55); f – euhedral crystals of pyrite in carbonaceous shale (sample 1-1 / 3); g – quartz-pyrite vein in carbonaceous shale (sample 1/67); h – large euhedral pyrite crystals (sample 2/27)



**Рис. 3. Взаимоотношения самородного золота (Au) и пирита (Py) месторождения Советское**  
a – оптическое фото (образец 2-1/28); b, c – BSE-фото (образец 2-1/28)

**Fig. 3. Relationship between native gold (Au) and pyrite (Py) from Sovetskoe gold deposit**  
a – optical photo (sample 2-1/28); b, c – BSE-photo (sample 2-1/28)

В пирите месторождения также отмечаются многочисленные субмикронные включения и трещинные выделения самородного металла, что говорит о тесной парагенетической связи этих минералов.

*Химический состав пирита.* Содержание железа и серы в изученных образцах изменяется в пределах (мас. %): Fe 42,67–48,47; S 50,61–55,04. Дефицит в анионной и катионной части для некоторых образцов компенсируется присутствием примесей мышьяка (0,48–3,02 мас. %) и кобальта (1,71–3,38 мас. %). С учетом изоморфизма (Fe ↔ Co; S ↔ As), отношение S/Fe в среднем составляет 1,98, что указывает на высокую химическую стехиометрию минерала.

Химический состав пирита из разных геологических обстановок месторождения не показывает значимого различия. Также не наблюдалось неоднородного распределения концентраций главных минералообразующих элементов в пределах зерна, за исключением единичных зерен, по периферии обогащенных As.

*Распределение элементов-примесей.* Всего было выполнено 67 точечных определений содержаний элементов-примесей в пирите месторождения (таблица, рис. 4). Наиболее типичными (~ 90 % анализов) примесями являются, ppm: Co ~ 0,2–1 700,0; Ni ~ 1,8–1 300; Zn ~ 1,2–80,0; Ge ~ 3,0–5,7; As ~ 1,4–3 700,0; Se ~ 4,6–50; Pb ~ 0,1–390,0. В более чем 50 % анализов также присутствуют, ppm: Cu ~ 0,6–1 000,0; Ag ~ 0,2–10,0; Sb ~ 0,04–13,00; Bi ~ 0,1–25,0. Примерно в трети анализов были обнаружены Te ~ 1,0–7,0 ppm и Au ~ 0,1–1,3 ppm. В единичных анализах присутствуют, ppm: V ~ 0,1–5,0; Cr 7,0; Mn ~ 39,0–110,0; Ga ~ 0,3–1,2; In ~ 0,2–0,9; Sn ~ 0,2–0,6; W ~ 0,5–2,1; Tl ~ 0,1–0,3. Содержания Mo и Cd ниже предела обнаружения во всех анализах. Обращает на себя внимание, что значительные разбросы среднего содержания в рассматриваемых разновидностях минерала характерны для Co, Cu, As, Se, Sb, Au, Pb и Bi и незначительны для Ni, Zn, Ge, Ag и Te.

**Содержание элементов-примесей в пирите Советского золоторудного месторождения, ppm**

**Trace element content of pyrite from Sovetskoe gold deposit, ppm**

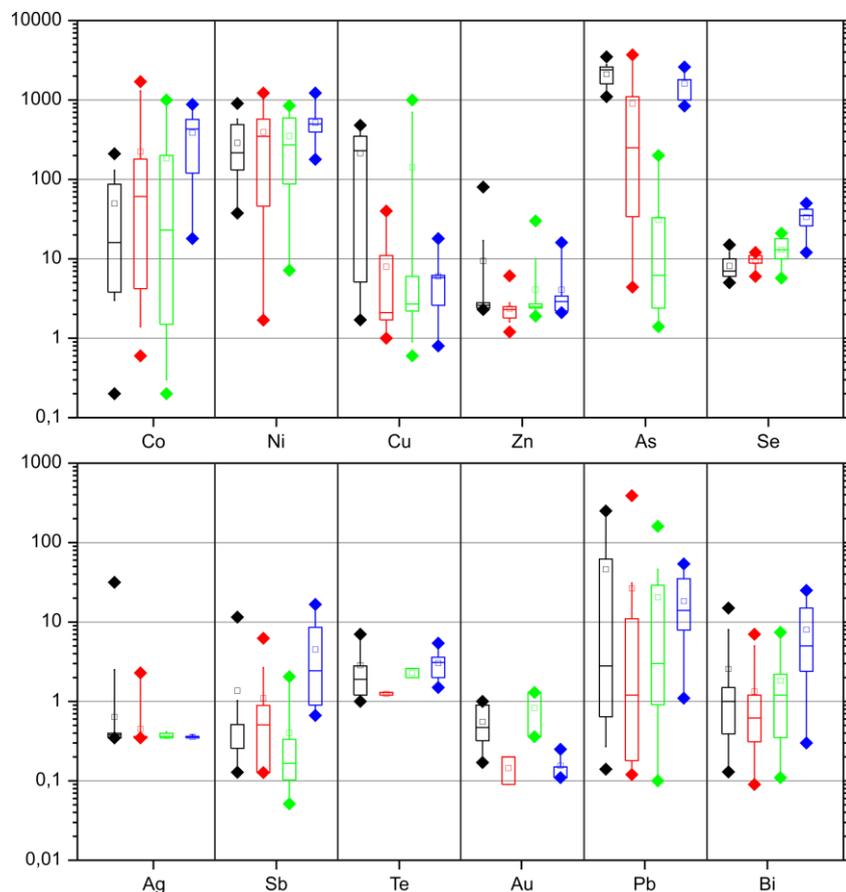
Values	<sup>59</sup> Co	<sup>60</sup> Ni	<sup>63</sup> Cu	<sup>66</sup> Zn	<sup>73</sup> Ge	<sup>75</sup> As	<sup>77</sup> Se	<sup>107</sup> Ag	<sup>121</sup> Sb	<sup>125</sup> Te	<sup>197</sup> Au	<sup>208</sup> Pb	<sup>209</sup> Bi
<i>Пирит из кварцевых жил</i>													
Min	0,2	40,0	1,7	2,3	3,8	1 100,0	5,0	0,2	0,1	1,0	0,2	0,1	0,1
Max	210,0	960,0	480,0	80,0	4,7	3 500,0	15,0	10,0	9,0	7,0	1,0	250,0	15,0
Mean	49,7	307,1	213,4	9,4	4,1	2 114,3	8,2	1,5	1,1	2,9	0,6	46,3	2,6
Std. dev.	61,9	261,7	211,1	20,7	0,3	707,0	2,9	2,9	2,5	2,4	0,3	85,3	4,3
<i>Пирит из зальбандов кварцевых жил</i>													
Min	0,6	1,8	1,0	1,2	3,0	4,4	6,0	0,2	0,1	1,2	0,1	0,1	0,1
Max	1 700,0	1 300,0	40,0	6,1	5,7	3 700,0	12,0	4,3	4,9	1,3	0,2	390,0	7,0
Mean	224,1	419,3	8,0	2,4	4,3	902,4	9,4	0,8	0,9	1,3	0,1	26,5	1,3
Std. dev.	464,6	414,4	12,2	1,0	0,7	1 247,5	1,7	1,4	1,4	0,1	0,1	91,1	2,0
<i>Гнездовый крупнокристаллический пирит</i>													
Min	0,2	7,6	0,6	1,9	3,2	1,4	5,7	0,2	0,0	2,0	0,4	0,1	0,1
Max	1 000,0	950,0	1 000,0	30,0	4,9	200,0	21,0	0,6	1,6	2,6	1,3	160,0	7,4
Mean	185,2	374,1	142,7	4,1	4,1	31,2	13,0	0,3	0,3	2,3	0,8	20,5	1,8
Std. dev.	293,6	305,6	321,8	6,0	0,5	55,9	5,0	0,2	0,5	0,4	0,7	39,2	2,3
<i>Пирит из вмещающих сланцев</i>													
Min	18,0	190,0	0,8	2,1	3,2	840,0	12,0	0,2	0,5	1,5	0,1	1,1	0,3
Max	880,0	1 300,0	18,0	16,0	4,7	2 600,0	50,0	0,4	13,0	5,4	0,3	54,0	25,0
Mean	386,8	549,0	6,0	4,1	3,8	1 611,0	33,6	0,2	3,5	3,0	0,2	18,3	8,0
Std. dev.	276,5	300,9	5,6	4,2	0,5	564,0	12,6	0,1	4,1	1,4	0,1	17,6	8,1

Большая часть элементов-примесей не показывает значимого различия содержаний в изученных разновидностях пирита. Медь и цинк концентрируются во всех разновидностях пирита примерно на одном уровне (см. рис. 4), при этом среднее содержание меди незначительно выше цинка. Медью также обогащен пирит кварцевых жил. Содержания германия стабильны и находятся в пределах ~ 3–5 ppm. Количество серебра в минерале невелико и в среднем составляет около 0,3 ppm, лишь единичные ураганные концентрации достигают ~ 4–10 ppm. Количество

теллура также примерно одинаково во всех разновидностях пирита и не показывает значимых разбросов. Свинец и висмут распределены равномерно в количествах около 30 и 3 ppm соответственно. Содержание никеля стабильно во всех разновидностях пирита и в среднем составляет ~ 396 ppm. Кобальт в пирите из кварцевых жил и их зальбандов, а также гнезд крупнокристаллического пирита ведет себя стабильно (среднее содержание ~ 152 ppm), но незначительно повышен в пирите из вмещающих сланцев (~ 387 ppm).

Наблюдается неоднородное распределение мышьяка, селена, сурьмы и золота в рассматриваемых разновидностях минерала (см. таблицу, рис. 4). Так, наиболее обогащен мышьяком пирит из кварцевых жил и вмещающих сланцев (~ 2114 и ~ 1611 ppm); содержания As в пиритах из зальбандов кварцевых

жил находятся на уровне (~ 902 ppm), а крупнокристаллический гнездовой пирит значительно обеднен элементом (~ 31 ppm). Содержания селена показывают стабильный тренд увеличения от пирита из кварцевых жил к пириту из вмещающих сланцев (см. рис. 4).



**Рис. 4. Распределение элементов-примесей в пирите месторождения, ppm**

Черный цвет – пирит из кварцевых жил, красный цвет – пирит из зальбандов кварцевых жил, зеленый цвет – гнездовой крупнокристаллический пирит, синий цвет – пирит из сланцев

**Fig. 4. Distribution of trace elements in pyrite of the deposit, ppm**

Black – pyrite from quartz veins, red – pyrite from selvage quartz veins, green – crystalline pyrite, blue – pyrite from shale

Сурьма содержится примерно в равных количествах в пирите из кварцевых жил, их зальбандов и крупнокристаллическом гнездовом пирите, но значительно обогащен сурьмой пирит вмещающих сланцев. Примесным («невидимым») золотом обогащен пирит кварцевых жил (~ 0,56 ppm) и крупнокристаллический гнездовой пирит (~ 0,83 ppm). Минерал из зальбандов кварцевых жил и вмещающих сланцев содержит меньшие концентрации золота (~ 0,15 и ~ 0,16 ppm).

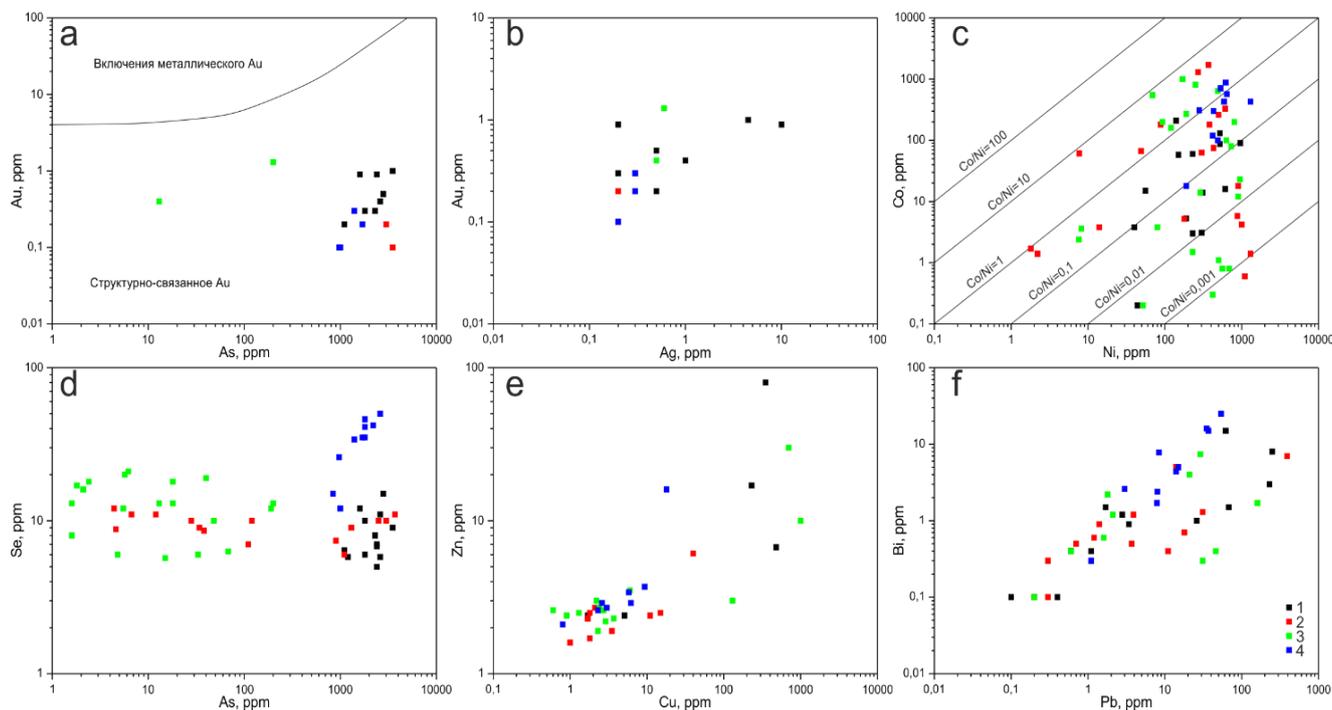
Изучение взаимного распределение пар элементов свидетельствует о том, что большая часть из них не проявляет значимых тенденций. На диаграмме

Au–As большая часть аналитических точек расположена в компактном поле со слабым положительным трендом (рис. 5, а). Анализы крупнокристаллического гнездового пирита на этой диаграмме обособлены низким содержанием мышьяка. Все анализы расположены ниже граничной линии предела растворимости золота в структуре пирита, что указывает на структурно-связанный характер примесного («невидимого») золота в минерале [Reich et al., 2005].

Содержание золота и серебра показывает слабый положительный тренд, но малое количество анализов, содержащих как золото, так и серебро, не позволяет установить четкой корреляции (рис. 5, б).

Концентрации никеля и кобальта также не показывают четких трендов парного концентрирования (рис. 5, с). Общий разброс значений отношения

Co/Ni лежит в пределах 0,001–7,971. В парах Cu–Zn и Pb–Bi установлен отчетливый положительный тренд накопления этих элементов (рис. 5, e, f).



**Рис. 5. Бинарные графики зависимости распределения элементов-примесей в пирите месторождения**

a – Au-As [Reich et al., 2005]; b – Au-Ag; c – Co-Ni; d – Se-As; e – Zn-Cu, f – Bi-Pb. 1 – пирит из кварцевых жил, 2 – пирит из зальбандов кварцевых жил, 3 – гнездовый крупнокристаллический пирит, 4 – пирит из вмещающих сланцев

**Fig. 5. Binary graphs of the dependence of the distribution of trace elements in the pyrite of the deposit**

a – Au-As [Reich et al., 2005]; b – Au-Ag; c is Co-Ni; d is Se-As; e – Zn-Cu, f - Bi-Pb. 1 – pyrite from quartz veins, 2 – pyrite from selvages of quartz veins, 3 – crystalline pyrite, 4 – pyrite from shale

Наиболее контрастно аналитические точки составов изученных разновидностей пирита обособливаются на диаграмме As–Se (рис. 5, d). Так, пирит из вмещающих сланцев характеризуется максимальным содержанием как мышьяка, так и селена. Пирит из кварцевых жил расположен в поле повышенных содержаний мышьяка и пониженных (относительно пирита из сланцев) – селена. Крупнокристаллический гнездовый пирит занимает область низких значений содержания мышьяка и селена. Поле точек пирита из зальбандов кварцевых жил по концентрациям Se и As расположено в пределах поля крупнокристаллического пирита, другая – близка к области, занимаемой пиритом из кварцевых жил.

### Обсуждение результатов

Ранее Г.А. Пальяновой и соавт. выполнены единичные определения содержаний элементов-примесей в пирите месторождения [Пальянова и др., 2019].

Результаты заключались в констатации следующих концентраций примесей в минерале (ppm): Au до 7,6; Ag до 0,7; Cr до 1 140,0; Co до 150,0; Ni до 1 350,0; Cu до 38,0; Zn до 49,0; Pb до 3,0; As до 2 175,0; Bi до 0,5. Полученные нами данные в целом сопоставимы с приведенными в работе Г.А. Пальяновой цифрами, что позволяет частично верифицировать результаты работы.

Вариации содержаний селена в пирите обычно связывают с изменением температуры флюида [Belousov et al., 2016; Keith et al., 2018; Shao et al., 2018]. В статье М. Кита и соавт. приведен обзор распределения Se и Te в пирите орогенных, эпитегрмальных, порфириковых и месторождениях карлинского типа. Авторами показано, что содержание Se в минерале зависит от температуры его кристаллизации и может быть использовано в качестве геотермометра [Keith et al., 2018]. Используя данные М. Кита, нами оценены температуры образования пирита месторождения Советское. Общий интервал составил 309–507 °С,

при этом пирит из вмещающих сланцев характеризуется наименьшей температурой  $\sim 343$  °С. Содержание Se в гнездовом крупнокристаллическом пирите указывает на температуру его образования  $\sim 417$  °С. Наиболее высокими температурами кристаллизации отличаются пирит из кварцевых жил и их зальбандов: 456 и 439 °С соответственно. Ранее на основе пирротин-пиритового геотермометра нами оценены температуры образования пирротин-(пирит) содержащих минеральных ассоциаций месторождения, которые варьируют в интервале от 489 до 382 °С, и фугитивности серы ( $\lg f_{S_2}$ ) от  $-4,63$  до  $-7,95$  [Пальянова и др., 2019]. Данные пирротин-пиритового геотермометра и температуры, рассчитанные на основании содержания Se в пирите, показывают хорошую сходимость и соответствуют результатам классических определений термобарогеохимическими методами по флюидным включениям в кварце (100–630 °С [Томиленко, Гибшер, 2001; Tomilenko et al., 2010]). Полученные данные показывают общий интервал образования пирротин-пиритовых ассоциаций месторождения в 309–507 °С.

Значение отношения Co/Ni часто связывают с особенностями генезиса пирита, предполагая, что величина Co/Ni  $< 1$  указывает на осадочное, Co/Ni = 1–10 – на гидротермальное, а Co/Ni  $> 10$  – на вулканогенное происхождение [Li N. et al., 2018; Shao et al., 2018; Roman et al., 2019; Xu N., et al., 2020]. Большая часть полученных нами анализов лежит в пределах Co/Ni = 10–0,1, что позволяет предположить формирование пирита месторождения в гидротермальных условиях, а существующие вариации в отношении Co/Ni связаны с кристаллохимическим контролем осаждения никеля при одновременной кристаллизации пирита и пирротина [Conn et al., 2019], а также с гидротермальным метаморфизмом руд. Однако анализы пирита, отобранного из вмещающих сланцев, характеризуются значениями Co/Ni  $< 1$ , что может указывать на влияние осадочного процесса в распределении Co и Ni, отразившемся на величине отношения Co/Ni, и в конечном счете на ретроспективную генетическую природу пирита вмещающих пород. До настоящего времени в опубликованных материалах по месторождению не упоминалось о находках в пределах месторождения пирита с типичными структурно-текстурными и химическими особенностями, указывающими на его седиментационно-диагенетический генезис. На этом основании мы предполагаем именно гидротермальный генезис для преимущественной части пирита в рудах месторождения.

В структуре пирита мышьяк может замещать как катион, так и анион [Keith et al., 2018]. В восстановительной обстановке предполагается, что мышьяк замещает серу, в то время как при окислительных

условиях может происходить замещение мышьяком железа. Co, Ni, Cu, Zn, Pb также могут изовалентно замещать Fe<sup>2+</sup> в структуре минерала. Для Cu<sup>+</sup>, Au<sup>+</sup>, Au<sup>3+</sup>, Ag<sup>+</sup>, As<sup>3+</sup>, Sb<sup>3+</sup> и, вероятно, Bi<sup>3+</sup> также возможно гетеровалентное (парное) замещение Fe<sup>2+</sup> [Dehnavi et al., 2018; Vouite et al., 2019]. Нами не было установлено отчетливой корреляции между серой и мышьяком при изучении пиритов месторождения, но данные микрорентгеноспектрального анализа, которые показывают, что высокие ( $> 1$  мас. %) содержания мышьяка сопровождаются уменьшением количества серы, говорят в пользу предпочтительного замещения по типу As  $\rightarrow$  S. Также нами не было установлено значимых корреляционных зависимостей содержания железа и перечисленных выше примесных элементов, что не позволяет в данный момент однозначно говорить о механизмах их замещения.

Между тем положительная корреляция между золотом и мышьяком в пирите была показана во многих работах [Cook, Chryssoulis, 1990; Arehart, Chryssoulis, Kesler, 1993; Reich et al., 2005; Benzaazoua et al., 2007; Pals, Spry, Chryssoulis, 2003; Deditius et al., 2008] и слабо проявлена в пиритах месторождения (см. рис. 5, а). Однако существует немало данных, указывающих на отсутствие подобной связи [Simon et al., 1999; McClenaghan, Lents, Cabri, 2004; Chouinard, Paquette, Williams-Jones, 2005; Reich et al., 2005; Paktunc et al., 2006; Benzaazoua et al., 2007]. Это предполагает, что мышьяк не является обязательным условием для изоморфного вхождения золота в структуру минерала.

Ранее показано, что наиболее приемлемым состоянием золота как в природном As-пирите, так и в синтетическом, не содержащем мышьяк минерале, является Au<sup>1+</sup> [Simon et al., 1999; Trigub et al., 2017; Pokrovski et al., 2019]. Но также не исключены и Au<sup>3+</sup> и Au<sup>1-</sup> [Arehart, Chryssoulis, Kesler, 1993; Simon et al., 1999; Chouinard, Paquette, Williams-Jones, 2005]. Предложены следующие механизмы замещения для этих состояний золота: замещение железа на Au<sup>1+</sup>; включение линейных кластеров S–Au<sup>1+</sup>–S; совместное замещение Fe<sup>2+</sup>  $\rightarrow$  Au<sup>3+</sup> и S<sup>2-</sup>  $\rightarrow$  As<sup>1-</sup>; парное замещение 2Fe<sup>2+</sup>  $\rightarrow$  Au<sup>3+</sup> + Cu<sup>+</sup>; замещение серы на Au<sup>1-</sup> [Merkulova et al., 2019]. Исходя из полученных нами данных о малых концентрациях благородного металла, а также об отсутствии значимых корреляций между золотом и приведенными выше элементами, сейчас невозможно однозначно судить о механизмах его концентрирования в минерале.

Как было показано ранее для месторождений, в которых самородное золото является главным или доминирующим минералом Au и Ag, величина Au/Ag в рудах равна или близка к Au/Ag в самородном золоте [Пальянова и др., 2019]. Пониженные Au/Ag

в рудах являются признаком присутствия других минералов серебра. Для руд Советского месторождения величина Au/Ag составляет ~ 0,36; самородное золото месторождения весьма высокопробно и Au/Ag в нем изменяется в пределах  $\leq 19-50$  [Пальянова и др., 2019]. Ранее в пирите месторождения были определены концентрации Au и Ag и рассчитаны Au/Ag, которые составили 0,004–13, при этом в минерале не было диагностировано присутствия микропримесей Te, Se, Sb, Bi [Пальянова и др., 2019]. На этом основании было предположено присутствие ультрамелких частиц Au-Ag сульфидов [Пальянова и др., 2019].

По нашим аналитическим данным Au/Ag в пирите месторождения изменяется в пределах 0,09–3,75, что значительно ниже этого отношения в самородном золоте месторождения, но близко к таковому в рудах. При этом нами также установлены концентрации Te (до 7 ppm), Se (до 50 ppm), Sb (до 13 ppm), Bi (до 25 ppm). Эти элементы способны образовывать устойчивые соединения с серебром [Пальянова и др., 2019; Пальянова, 2020]. Не исключено, что избыток серебра в пирите месторождения связывается этими элементами в ультрамелкие минеральные фазы, однако нами не установлены отчетливые корреляции между содержаниями серебра и перечисленных элементов.

### Выводы

Таким образом, на основании полученных данных можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Примесным («невидимым») золотом обогащен пирит из кварцевых жил (~ 0,56 ppm) и крупнокристаллический гнездовый пирит (~ 0,83 ppm). Минерал из зальбандов кварцевых жил и вмещающих сланцев содержит меньше Au (~ 0,15 и ~ 0,16 ppm). Положение точек состава на диаграмме Au–As ниже линии структурно-связанного золота свидетельствует о его изоморфной природе. Однако установленные концентрации металла не несут промышленного значения, а основная часть золота на месторождении присутствует в самородной форме.

2. Изученные разновидности пирита обогащены серебром относительно золота (Au/Ag от 0,09 до 3,75), избыток серебра может быть связан в виде ультрамелких частиц Au-Ag сульфидов либо в виде соединений с Te, Se, Sb, Bi.

3. Наиболее контрастно изученные разновидности пирита отличаются по содержанию Se и As. Пирит из вмещающих сланцев характеризуется максимальными содержаниями As и Se. Пирит из кварцевых жил содержит минимальные концентрации As. Крупнокристаллический гнездовый пирит занимает область низких содержаний Se и As. Пирит из зальбандов кварцевых жил имеет переменный состав.

4. На основании содержания Se в пирите руд установлены температуры образования минерала: пирит из вмещающих сланцев ~ 343 °С; крупнокристаллический гнездовый пирит ~ 417 °С; пирит из кварцевых жил ~ 456 °С; пирит из зальбандов кварцевых жил ~ 439 °С. Эти параметры образования минерала показывают существенную неоднородность температурного поля в области рудообразования.

### Список источников

- Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Сазонов А.М., Шапаренко Е.О., Рябуха М.А., Хоменко М.О., Сильянов С.А., Некрасова Н.А. Углеводороды во флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский край, Россия) по данным беспирилизной газовой хромато-масс-спектрометрии // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 11. С. 1535–1560.
- Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. М. : Наука, 1982. 256 с.
- Горностаев Н.Н. Золоторудное месторождение Советского рудника в Северо-Енисейской тайге // Труды треста «Золоторазведка» и НИГРИЗолото. 1936. № 3. С. 10–22.
- Ли Л.В. Золоторудные месторождения Енисейского края // Геология и полезные ископаемые Центральной Сибири. Красноярск : КНИИГиМС, 2001. С. 184–222.
- Пальянова Г.А. Минералы золота и серебра в сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62, № 5. С. 426–449.
- Пальянова Г.А., Сазонов А.М., Журавкова Т.В., Сильянов С.А. Состав пирротина как индикатор условий минералообразования на золоторудном месторождении Советское (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. 2019. № 7. С. 934–354.
- Петров В.Г. Условия золотоносности северной части Енисейского края. Новосибирск : Наука, 1974. 138 с.
- Петровская Н.В. Золотое оруденение Енисейского края и особенности процессов формирования золотых руд : автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 1954. 86 с.
- Сазонов А.М. Геохимия золота в метаморфических толщах. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 1998. 168 с.
- Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.С., Звягина Е.А., Федорова А.В., Тишин П.А., Леонтьев С.И. Золоторудная металлогения Енисейского края: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2010. № 4. С. 371–395.
- Сазонов А.М., Сарав В.А., Ананьев А.А. Сульфидно-кварцевые месторождения золота в метаморфических толщах Енисейского края // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 28–37.
- Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Особенности состава флюида в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения, Енисейский край (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия. 2001. № 2. С. 167–177.

- 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 край, Россия // *Геохимия*. 2008. № 4. P. 438–444.
- Arehart G.B., Chrissyoulis S.L., Kesler S.E. Gold and arsenic in iron sulfides from sediment hosted disseminated gold deposits: Implication for depositional processes // *Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geology*. 1993. V. 88. P. 171–185.
- Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 104. P. 495–521.
- Belousov I., Large R.R., Meffre S., Danyushevsky L.V., Steadman J., Beardsmore T. Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration // *Ore Geology Rev.* 2016. V. 79. P. 474–499.
- Benzaazoua M., Marion P., Robaut F., Pinto A. Gold-bearing arsenopyrite and pyrite in refractory ores: analytical refinements and new understanding of gold mineralogy // *Mineral. Mag.* 2007. V. 71. P. 123–142.
- Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E. Crystallographic controls on trace-element incorporation in Auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina // *Canadian Mineralogist*. 2005. V. 43. P. 951–963.
- Conn C.D., Spry P.G., Layton-Matthews D., Voinot A., Koenig A. The effects of amphibolite facies metamorphism on the trace element composition of pyrite and pyrrhotite in the Cambrian Nairne Pyrite Member, Kanmantoo Group, South Australia // *Ore Geology Rev.* 2019. V. 114. P. 103–128.
- Cook N.J., Chrissyoulis S.L. Concentrations of «Invisible Gold» in the common sulfides // *Canadian Mineralogist*. 1990. V. 28. P. 1–16.
- Dmitrijeva M., Cook N.J., Ehrig K., Ciobanu C.L., Metcalfe A.V., Kamenetsky M., Kamenetsky V.S., Gilbert S. Multivariate Statistical Analysis of Trace Elements in Pyrite: Prediction, Bias and Artefacts in Defining Mineral Signatures // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 61.
- Deditius A.P., Utsunomiya S., Renock D., Ewing R.C., Ramana C.V., Becker U., Kesler S.E. A proposed new type of arsenian pyrite: Composition, nanostructure and geological significance // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. V. 72. P. 2919–2933.
- Dehnavi A.S., McFarlane C.R.M., Lentz D.R., Walker J.A. Assessment of pyrite composition by LA-ICP-MS techniques from massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, Canada: From textural and chemical evolution to its application as a vectoring tool for the exploration of VMS deposits // *Ore Geology Rev.* 2018. V. 92. P. 656–671.
- Gourcerol B., Kontak D.J., Petrus J.A. Thurstion Application of LA ICP-MS analysis of arsenopyrite to gold metallogeny of the Meguma Terrane, Nova Scotia, Canada // *Gondwana Res.* 2020. V. 81. P. 265–290.
- Gregory D.D., Large R.R., Halpin J.A., Baturina E.L., Lyons T.W., Wu S., Danyushevsky L., Sack P.J., Chappaz A., Maslennikov V.V., Bull S.W. Trace Element Content of Sedimentary Pyrite in Black Shales // *Econ. Geol.* 2015. V. 110. P. 1389–1410.
- Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.T., Holwell D.A., Dye M.D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes // *Ore Geol. Rev.* 2018. V. 96. P. 269–282.
- Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisei Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? // *J. Asian Earth Sci.* 2016. V. 115. P. 419–441.
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A Carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits // *Econ. Geol.* 2011. V. 106. P. 331–358.
- Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible Gold Paragenesis and Geochemistry in Pyrite from Orogenic and Sediment-Hosted Gold Deposits // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 339.
- Li N., Deng J., Yang L.-Q., Groves D.I., Liu X.-W., Dai W.-G. Constraints on depositional conditions and ore-fluid source for orogenic gold districts in the West Qinling Orogen, China: Implications from sulfide assemblages and their trace-element geochemistry // *Ore Geology Rev.* 2018. V. 102. P. 204–219.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 85. P. 64–106.
- McClenaghan S.H., Lentz D.R., Cabri L.J. Abundance and speciation of gold in massive sulfides of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada // *Canadian Mineralogist*. 2004. V. 42. P. 851–871.
- Meffre S., Large R.R., Steadman J.A., Gregory D.D., Stepanov A.S., Kamenetsky V.S., Ehrig K., Scott R.J. Multi-stage enrichment processes for large gold-bearing ore deposits // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 76. P. 268–279.
- Merkulova M., Mathon O., Glatzel P., Rovezzi M., Batanova V., Marion P., Boiron M.-C., Manceau A. Revealing the Chemical Form of “Invisible” Gold in Natural Arsenian Pyrite and Arsenopyrite with High Energy-Resolution X-ray Absorption Spectroscopy // *ACS Earth Space Chem.* 2019. V. 3 (9). P. 1905–1914.
- Paktunc D., Kingston D., Pratt A., McMullen J. Distribution of gold in pyrite and in products of its transformation resulting from roasting of refractory gold ore // *Can. Mineral.* 2006. V. 44. P. 213–227.
- Pals D.W., Spry P.G., Chrissyoulis S. Invisible gold and tellurium in arsenic-rich pyrite from the Emperor gold deposit, Fiji: Implications for gold distribution and deposition // *Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geol.* 2003. V. 98. P. 479–493.
- Pokrovski G.S., Kokh M.A., Proux O., Hazemann J.-L., Bazarkina E.F., Testemale D., Escoda C., Boiron M.-C., Blanchard M., Aigouy T., Gouy S., de Parseval P., Thibaut M. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 109. P. 545–563.
- Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chrissyoulis S.L., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005. V. 69. P. 2781–2796.
- Román N., Reich M., Leisen M., Morata D., Barra F., Deditius A.P. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. V. 246. P. 60–85.
- Shao Y.-J., Wang W.-S., Liu Q.-Q., Zhang Y. Trace Element Analysis of Pyrite from the Zhengchong Gold Deposit, Northeast Hunan Province, China: Implications for the Ore-Forming Process // *Minerals*. 2018. V. 8. P. 262.

**Simon G., Huang H., Penner-Hahn J.E., Kesler S.E., Kao L.-I.** Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite // *Am. Mineral.* 1999. V. 84. P. 1071–1079.

**Simon G., Kesler S.E., Chryssoulis S.** Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits // *Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geol.* 1999. V. 94. P. 405–421.

**Sung Y.H., Brugger J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Nugus M.** Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archaean gold deposit: Sunrise Dam, Eastern Goldfields Province, Western Australia // *Miner. Deposita.* 2009. V. 44. P. 765–791.

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

**Trigub A.L., Tagirov B.R., Kvashnina K.O., Chareev D., Nickolsky M., Shiryaev A.A., Baranova N., Kovalchuk E., Mokhov A.** X-ray spectroscopy study of the chemical state of “invisible” Au in synthetic minerals in the Fe-As-S system // *Am. Mineral.* 2017. V. 102. P. 1057–1065.

**Voute F., Hagemann S.G., Evans N.J., Villanes C.** Sulfur isotopes, trace element, and textural analyses of pyrite, arsenopyrite and base metal sulfides associated with gold mineralization in the Patay-Parcoy district, Peru: implication for paragenesis, fluid source and gold deposition mechanisms // *Mineralium Deposita.* 2019. V. 54. P. 1077–1100.

**Wu Y.-F., Evans K., Li J.-Y., Fougereuse D., Large R.R., Guagliardo P.** Metal remobilization and ore-fluid perturbation during episodic replacement of auriferous pyrite from an epizonal orogenic gold deposit // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2019. V. 245. P. 98–147.

**Xu N., Wu C.-l., Li S.-R., Xue B.-Q., He X., Yu Y.-L., Liu J.-Z.** LA-ICP-MS in situ analyses of the pyrites in Dongyang gold deposit, Southeast China: Implications to the gold mineralization // *China Geol.* 2020. V. 1. P. 1–17.

### References

Bul'bak T.A., Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Sazonov A.M., Shaparenko E.O., Ryabukha M.A., Khomenko M.O., Sil'yanov S.A., Nekrasova N.A. 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 // *Russian Geology and Geophysics.* 2020. V. 61. No. 11. pp. 1260–1282.

Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow: Izdatel'stvo «Nauka», 1982. 256 p. In Russian

Gornostaev N.N. *Zolotorudnoe mestorozhdenie Sovetskogo rudnika v Severo-Eniseyskoy tayge* [Gold deposit of the Soviet mine in the North Yenisei taiga] // *Trudy tresta «Zolotorazvedka» i NIGRIZOLOTO.* 1936. No. 3. pp. 10–22. In Russian

Li L.V. *Zolotorudnye mestorozhdeniya dokembriya Eniseyskogo kryazha* [Precambrian gold deposits of the Yenisei ridge]. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001. 222 p. In Russian

Palyanova G.A. Gold and silver minerals in sulfide ore // *Geology of Ore Deposits.* 2020. V. 62. No. 5. pp. 383–406.

Palyanova G.A., Sazonov A.M., Zhuravkova T.V., Silyanov S.A. Composition of Pyrrhotite as an Indicator of Gold Ore Formation Conditions at the Sovetskoe Deposit (Yenisei Ridge, Russia) // *Russian Geology and Geophysics.* 2019. V. 60. No. 7. pp. 735–751.

Petrov V.G. *Usloviya zolotonosnosti severnoy chasti Eniseyskogo kryazha* [Gold content conditions in the northern part of the Yenisei ridge]. Novosibirsk: NAUKA. 1974. 138 p. In Russian

Petrovskaya N.V. *Zolotoe orudnenie Eniseyskogo kryazha i osobennosti protsessov formirovaniya zolotykh rud* [Gold mineralization of the Yenisei ridge and features of the processes of formation of gold ores]. Avtoref. dis....d.g.-m.n. Moscow: NIGRIZOLOTO, 1954. 86 p. In Russian

Sazonov A.M. *Geokhimiya zolota v metamorficheskikh tolshchakh* [Geochemistry of gold in metamorphic strata]. Tomsk: Izd-vo TPU. 1998. 168 p. In Russian

Sazonov A.M., Anan'ev A.A., Poleva T.V., Khokhlov A.N., Vlasov V.S., Zvyagina E.A., Fedorova A.V., Tishin P.A., Leont'ev S.I. *Zolotorudnaya metallogeniya Eniseyskogo kryazha: geologo-strukturnaya pozitsiya, strukturnye tipy rudnykh poley* [Gold ore metallogeny of the Yenisei Ridge: geological and structural position, structural types of ore fields] // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii.* 2010. No. 4. pp. 371–395. In Russian

Sazonov A.M., Saraev V.A., Anan'ev A.A. *Sul'fidno-kvartsevye mestorozhdeniya zolota v metamorficheskikh tolshchakh Eniseyskogo kryazha* [Sulfide-quartz gold deposits in metamorphic strata of the Yenisei Ridge] // *Geologiya i geofizika.* 1991. No. 5. pp. 28–37. In Russian

Tomilenko A.A., Gibsher N.A. Peculiarities of fluid composition in the mineralized and barren zones of the Sovetskoe quartz-gold deposit, Yenisei mountain range based on fluid inclusion study // *Geochemistry International.* 2001. No. 2. pp. 167–177.

Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Koz'menko O.A., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V. Lanthanides in fluid inclusions, quartz, and greenschists from auriferous and barren quartz-vein zones of the Sovetskoe quartz-gold deposit, Yenisei range, Russia // *Geochemistry International.* 2008. 4. pp. 402–408.

Arehart G.B., Chryssoulis S.L., Kesler S.E. Gold and arsenic in iron sulfides from sediment hosted disseminated gold deposits: Implication for depositional processes // *Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geology.* 1993. V. 88. pp. 171–185

Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites // *Ore Geol. Rev.* 2019. 104. pp. 495–521.

Belousov I., Large R.R., Meffre S., Danyushevsky L.V., Steadman J., Beardsmore T. Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration // *Ore Geology Rev.* 2016. V. 79. pp. 474–499.

Benzaazoua M., Marion P., Robaut F., Pinto A. Gold-bearing arsenopyrite and pyrite in refractory ores: analytical refinements and new understanding of gold mineralogy // *Mineral. Mag.* 2007. V. 71. pp. 123–142.

Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E. Crystallographic controls on trace-element incorporation in Auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina // *Canadian Mineralogist.* 2005. V. 43. pp. 951–963.

- Conn C.D., Spry P.G., Layton-Matthews D., Voinot A., Koenig A. The effects of amphibolite facies metamorphism on the trace element composition of pyrite and pyrrhotite in the Cambrian Nairne Pyrite Member, Kanmantoo Group, South Australia // *Ore Geology Rev.* 2019. V. 114. pp. 103–128.
- Cook N.J., Chryssoulis S.L. Concentrations of «Invisible Gold» in the common sulfides // *Canadian Mineralogist.* 1990. V. 28. pp. 1–16.
- Dmitrijeva M., Cook N.J., Ehrig K., Ciobanu C.L., Metcalfe A.V., Kamenetsky M., Kamenetsky V.S., Gilbert S. Multivariate Statistical Analysis of Trace Elements in Pyrite: Prediction, Bias and Artefacts in Defining Mineral Signatures // *Minerals.* 2020. 10. 61.
- Deditius A.P., Utsunomiya S., Renock D., Ewing R.C., Ramana C.V., Becker U., Kesler S.E. A proposed new type of arsenian pyrite: Composition, nanostructure and geological significance // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2008. V. 72. pp. 2919–2933.
- Dehnavi A.S., McFarlane C.R.M., Lentz D.R., Walker J.A. Assessment of pyrite composition by LA-ICP-MS techniques from massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, Canada: From textural and chemical evolution to its application as a vectoring tool for the exploration of VMS deposits // *Ore Geology Rev.* 2018. V. 92. pp. 656–671.
- Gourcerol B., Kontak D.J., Petrus J.A. Thurstun Application of LA ICP-MS analysis of arsenopyrite to gold metallogeny of the Meguma Terrane, Nova Scotia, Canada // *Gondwana Res.* 2020. 81. pp. 265–290.
- Gregory D.D., Large R.R., Halpin J.A., Baturina E.L., Lyons T.W., Wu S., Danyushevsky L., Sack P.J., Chappaz A., Maslennikov V.V., Bull S.W. Trace Element Content of Sedimentary Pyrite in Black Shales // *Econ. Geol.* 2015. 110. pp. 1389–1410.
- Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.T., Holwell D.A., Dye M.D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes // *Ore Geol. Rev.* 2018. 96. pp. 269–282.
- Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisei Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? // *J. Asian Earth Sci.* 2016. 115. pp. 419–441.
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A Carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits // *Econ. Geol.* 2011. 106. pp. 331–358.
- Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible Gold Paragenesis and Geochemistry in Pyrite from Orogenic and Sediment-Hosted Gold Deposits // *Minerals.* 2020. 10. 339.
- Li N., Deng J., Yang L.-Q., Groves D.I., Liu X.-W., Dai W.-G. Constraints on depositional conditions and ore-fluid source for orogenic gold districts in the West Qinling Orogen, China: Implications from sulfide assemblages and their trace-element geochemistry // *Ore Geology Rev.* 2018. V. 102. pp. 204–219.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geol. Rev.* 2017. 85. pp. 64–106.
- McClenaghan S.H., Lentz D.R., Cabri L.J. Abundance and speciation of gold in massive sulfides of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada // *Canadian Mineralogist.* 2004. V. 42. pp. 851–871.
- Meffre S., Large R.R., Steadman J.A., Gregory D.D., Stepanov A.S., Kamenetsky V.S., Ehrig K., Scott R.J. Multi-stage enrichment processes for large gold-bearing ore deposits // *Ore Geol. Rev.* 2016. 76. pp. 268–279.
- Merkulova M., Mathon O., Glatzel P., Rovezzi M., Batanova V., Marion P., Boiron M.-C., Manceau A. Revealing the Chemical Form of “Invisible” Gold in Natural Arsenian Pyrite and Arsenopyrite with High Energy-Resolution X-ray Absorption Spectroscopy // *ACS Earth Space Chem.* 2019. 3(9). pp. 1905–1914.
- Paktunc D., Kingston D., Pratt A., McMullen J. Distribution of gold in pyrite and in products of its transformation resulting from roasting of refractory gold ore // *Can. Mineral.* 2006. 44. pp. 213–227.
- Pals D.W., Spry P.G., Chryssoulis S. Invisible gold and tellurium in arsenic-rich pyrite from the Emperor gold deposit, Fiji: Implications for gold distribution and deposition // *Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geol.* 2003. 98. pp. 479–493
- Pokrovski G.S., Kokh M.A., Proux O., Hazemann J.-L., Bazarkina E.F., Testemale D., Escoda C., Boiron M.-C., Blanchard M., Aigouy T., Gouy S., de Parseval P., Thibaut M. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system. *Ore Geol. Rev.* 2019. 109. pp. 545–563.
- Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chryssoulis S.L., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. 69. pp. 2781–2796.
- Román N., Reich M., Leisen M., Morata D., Barra F., Deditius A.P. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2019. V. 246. pp. 60–85.
- Shao Y.-J., Wang W.-S., Liu Q.-Q., Zhang Y. Trace Element Analysis of Pyrite from the Zhengchong Gold Deposit, Northeast Hunan Province, China: Implications for the Ore-Forming Process // *Minerals.* 2018. V. 8. pp. 262.
- Simon G., Huang H., Penner-Hahn J.E., Kesler S.E., Kao L.-I. Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite. *Am. Mineral.* 1999. 84. pp.1071–1079.
- Simon G., Kesler S.E., Chryssoulis S. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits // *Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geol.* 1999. V. 94. pp. 405–421.
- Sung Y.H., Brugger J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Nugus M. Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archaean gold deposit: Sunrise Dam, Eastern Goldfields Province, Western Australia. *Miner. Deposita.* 2009. 44. pp. 765–791.
- Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia) // *Econ. Geology.* 2010. V. 105. pp. 375–394.
- Trigub A.L., Tagirov B.R., Kvashnina K.O., Chareev D., Nickolsky M., Shiryaev A.A., Baranova N., Kovalchuk E., Mokhov A. X-ray spectroscopy study of the chemical state of “invisible” Au in synthetic minerals in the Fe-As-S system // *Am. Mineral.* 2017. 102. pp. 1057–1065.
- Voite F., Hagemann S.G., Evans N.J., Villanes C. Sulfur isotopes, trace element, and textural analyses of pyrite, arsenopyrite and base metal sulfides associated with gold mineralization in the Pataz-Parcoy district, Peru: implication for paragenesis, fluid source and gold deposition mechanisms // *Mineralium Deposita.* 2019. V. 54. pp. 1077–1100.
- Wu Y.-F., Evans K., Li J.-Y., Fougereuse D., Large R.R., Guagliardo P. Metal remobilization and ore-fluid perturbation during episodic replacement of auriferous pyrite from an epizonal orogenic gold deposit // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2019. 245. pp. 98–147.

Xu N., Wu C.-I., Li S.-R., Xue B.-Q., He X., Yu Y.-L., Liu J.-Z. LA-ICP-MS in situ analyses of the pyrites in Dongyang gold deposit, Southeast China: Implications to the gold mineralization // China Geol. 2020. 1. pp. 1–17.

**Информация об авторах:**

**Сильянов С.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер кафедры геологии, минералогии и петрографии, Институт горного дела геологии и геотехнологии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: silyanov-s@mail.ru

**Сазонов А.М.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии, минералогии и петрографии, Институт горного дела геологии и геотехнологии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: sazonov\_am@mail.ru

**Лобастов Б.М.**, старший преподаватель кафедры геологии, минералогии и петрографии; инженер R&D центра НорНикель, Институт горного дела геологии и геотехнологии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: lbm02@ya.ru

**Шадрина Д.А.**, студент кафедры геологии, минералогии и петрографии, Институт горного дела геологии и геотехнологии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: dshadrina-gg18@mail.ru

**Тихонова К.А.**, аспирант кафедры геологии, минералогии и петрографии, Институт горного дела геологии и геотехнологии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: tihonovakseniya94@mail.ru

**Медведев Н.С.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: medvedev@niic.nsc.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Silyanov S.A.**, PhD (Geol.-Miner.), Lead Engineer, Department of Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: silyanov-s@mail.ru

**Sazonov A.M.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), professor, Department of Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: sazonov\_am@mail.ru

**Lobastov B.M.**, Senior Lecturer, Department of Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Mining, Geology and Geotechnology; Engineer, Norilsk Nickel R&D center, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: lbm02@ya.ru

**Shadrina D.A.**, Student, Department of Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: dshadrina-gg18@mail.ru

**Tikhonova K.A.**, PhD student, Department of Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: tihonovakseniya94@mail.ru

**Medvedev N.S.**, PhD (Chemistry), Senior Researcher, Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.

E-mail: medvedev@niic.nsc.ru

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

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 09.07.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 14.06.2022*

*The article was submitted 09.07.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 14.06.2022*