

УДК 553.411.071

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-7

## МИНЕРАЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ РУД НАИЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

### А.Д. Смирницкая, Е.А. Рожкова, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, М.В. Заботина, М.А. Рассомахин

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; smirnitskaya@mineralogy.ru

Статья поступила в редакцию 25.10.2024 г., после доработки 26.11.2024 г., принята к печати 01.12.2024 г.

Аннотация. В статье рассмотрена минералогия благородных металлов и условия образования руд Наилинского месторождения золота (Южный Урал), залегающего в пиритсодержащих тальккарбонатных, хлорит-кварц-карбонатных и кварц-карбонатных метасоматитах, развитых по серпентинитам и породам габбродиорит-плагиогранитного комплекса. На основании микроскопического и электронно-микроскопического изучения полированных шлифов и протолочек установлено, что основными минералами золота в жильно-прожилковых рудах, метасоматитах по средним и кислым интрузивным породам, а также в рассланцованных серпентинитах являются самородное золото и теллуриды золота. Самородное золото представлено: 1) включениями в пирите и, редко, халькопирите, 2) свободными частицами, связанными с нерудными минералами и, вероятно, выполняющими межзерновое пространство, 3) интерстициальными формами в агрегатах пирита, часто совместно с халькопиритом, галенитом и сфалеритом, а также просечками в гессите, 4) субмикронными включениями в тетрадимите, 5) включениями в лимоните. Среди теллуридов благородных металлов установлены калаверит, петцит, гессит и не диагностированный сульфотеллурид Ад и Рb. Серебро также входит в состав акантита и сульфосолей систем Hg-Ag-Sb-As, Pb-Bi-Ag и Cu-Ag-Pb-Bi. Содержание Ag в свободном самородном золоте составляет 10-16 мас. % и повышается до 20-24 мас. % в самородном золоте в пирите и в ассоциации с гесситом. В позиции, сходной с благороднометалльной минерализацией, найдены алтаит, колорадоит, теллуриды Ni и Pd. Температура образования рудоносных метасоматитов оценивается в 339-392 °С по составу хлорита, а флюидные включения в кварце, кальците и альбите гомогенизируются в интервале температур 162-377 °С. Температура эвтектики (-23.5 °С) характерна для водно-солевой системы NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O. Температура плавления последнего кристаллика льда варьирует от -0.5 до -3.7 °C, что соответствует концентрациям флюида 0.9-6.0 мас. % NaCl-экв.

*Ключевые слова:* Наилинское месторождение, метасоматиты, самородное золото, теллуриды благородных металлов, Южный Урал.

*Финансирование*. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 075-00622-24-00.

*Благодарности.* Авторы признательны Н.К. Никандровой за микротермометрические работы и Е.Д. Зенович за рентгеноструктурный анализ пород.

*Конфликт интересов.* Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. А.Д. Смирницкая – разработка концепции, оптико-микроскопические исследования, написание черновика рукописи, визуализация; Е.А. Рожкова – оптико-микроскопические исследования, написание черновика рукописи, визуализация; Е.В. Белогуб – разработка концепции, полевые работы, редактирование финального варианта рукописи; К.А. Новоселов – полевые и оптико-микроскопические работы; М.В. Заботина – полевые, оптико-микроскопические работы, минералогическая термометрия; М.А. Рассомахин – аналитические работы. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Смирницкая А.Д., Рожкова Е.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В., Рассомахин М.А. Минералогия и условия образования руд Наилинского месторождения золота (Южный Урал). Минералогия, 2024, 10(4), 150–171. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-7.

## MINERALOGY AND ORE FORMATION CONDITIONS OF THE NAILY GOLD DEPOSIT (SOUTH URALS)

A.D. Smirnitskaya, E.A. Rozhkova, E.V. Belogub, K.A. Novoselov, M.V. Zabotina, M.A. Rassomakhin

South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; smirnitskaya@mineralogy.ru

Received 25.10.2024, revised 26.11.2024, accepted 01.12.2024

Abstract. The paper examines mineralogy of noble metals and ore formation conditions at the Naily gold deposit (South Urals), which is hosted in pyrite-bearing talc-carbonate, chlorite-quartz-carbonate and quartz-carbonate metasomatites after serpentinites and rocks of a gabbrodiorite-plagiogranite complex. Based on microscopic and electron microscopic studies of polished sections and heavy concentrates, it is established that native gold and Au tellurides are the major Au minerals of veins, metasomatites after intermediate and felsic intrusive rocks and foliated serpentinites. Native gold occurs as: 1) inclusions in pyrite and rarely in chalcopyrite, 2) free particles associated with non-metallic minerals, which probably fill interstitions, 3) interstitial forms in pyrite aggregates often together with chalcopyrite, galena and sphalerite, and veinlets in hessite, 4) fine inclusions in tetradymite and 5) inclusions in limonite. Tellurides of noble metals include calaverite, petzite, hessite and an unidentified Ag and Pb sulfotelluride. Silver is also incorporated in acanthite and Hg-Ag-Sb-As, Pb-Bi-Ag and Cu-Ag-Pb-Bi sulfosalts. The Ag content of free native gold is 10-16 wt. % increasing to 20-24 wt. % in native gold in pyrite and in assemblage with hessite. Altaite, coloradoite and Ni and Pd tellurides are found in assemblages similar to noble metal mineralization. The formation temperature of chlorite from ore-bearing metasomatites is 339-392 °C. Fluid inclusions in quartz, calcite and albite are homogenized at a temperature range of 162-377 °C. The eutectic temperature (-23.5 °C) is typical of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O system. The ice melting temperature varies from -0.5 to -3.7 °C corresponding to salinity of 0.9-6.0 wt. % NaCl-equiv.

*Keywords:* Naily deposit, metasomatites, native gold, tellurides of noble metals, South Urals.

*Funding.* This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 075-00622-24-00.

*Acknowledgments.* The authors are grateful to N.K. Nikandrova for microthermometric work and E.D. Zenovich for X-ray structural analysis of rocks.

Conflict of interest. The author declare that she has no conflicts of interest.

*Author contribution.* A.D. Smirnitskaya – conceptualization, optical microscopic studies, writing the manuscript, visualization; E.A. Rozhkova – optical microscopic studies, writing the manuscript, visualization; E.V. Belogub – conceptualization, field work, editing the final version of the manuscript; K.A. Novoselov – field and optical microscopic work; M.V. Zabotina – field, optical-microscopic work, mineralogical thermometry; M.A. Rassomakhin – analytical works. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

*For citation:* Smirnitskaya A.D., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Rassomakhin M.A. Mineralogy and ore formation conditions of the Naily gold deposit (South Urals). Mineralogy, 2024, 10(4), 150–171. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-7

### ВВЕДЕНИЕ

Южный Урал является старейшим золотодобывающим регионом России, а его месторождения уже несколько столетий вносят весомый вклад в золотой фонд страны. В связи с повышением цен на драгоценные металлы, совершенствованием технологий освоения месторождений проводятся работы, направленные на воспроизводство минеральносырьевой базы золота и вовлечение в эксплуатацию запасов бедных руд месторождений в областях с развитой инфраструктурой (Федосеев и др., 2020). К таким объектам относится Наилинское месторождение, известное с 1881 г. и расположенное в 1–1.5 км западнее п. Наилы на территории Миасского городского округа Челябинской обл. Первые сведения о разведке центрального участка месторождения относятся к 1886 г., остальные участки разведаны в 30-х годах XX в. (Сигов, 1948). Месторождение отрабатывалось до 1950 г. старательским способом на глубину зоны окисления, и в ходе этих работ извлечено около 6 т металла (Попова, 2002). Геологоразведочные работы проводились в 1953–1956 гг. и 1968–1971 гг. (Грознецкий, 1975ф). В 2014 и 2018–2020 гг. АО «Южуралзолото Группа Компаний» провело оценочные работы на месторождении, по результатам которых его запасы составили более 10 т золота при среднем содержании 2.0–2.5 г/т и бортовом содержании 0.3 г/т. Общие ресурсы оцениваются в 16 т золота при среднем содержании 1.47 г/т (Федосеев и др., 2020). В связи с выше изложенным, целью данной работы является характеристика минералогии руд с акцентом на благороднометалльную минерализацию и оценка условий их образования.

152

## КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наилинское месторождение локализуется в зоне Главного Уральского глубинного разлома (ГУГР) (рис. 1). Площадь рудного поля составляет около 14 км<sup>2</sup>, протяженность 7 км, ширина, в среднем, 2 км. Рудное поле представляет собой мощную субмеридиональную зону рассланцевания, которая приурочена к Тыелгинскому разлому и его оперяющим структурам. С запада рудное поле ограничивается контактом дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса Таловского массива, на востоке Тыелгинский разлом отделяет его от толщи вулканогенно-осадочных пород (Арифулов, 2001ф). На месторождении распространены интрузивные породы сакмарского габбро-дунит-гарцбургитового и салаватского габбродиорит-плагиогранитового комплексов. Сакмарский комплекс представлен метаморфизованными ультрамафитами (серпентинитами) и локализованными в них отдельными телами клинопироксенитов и габбро и их метасоматически измененными разностями. К салаватскому комплексу отнесены тела метасоматически измененных габбродиоритов, кварцевых диоритов и плагиогранитов. Золотое оруденение локализуется в породах обоих комплексов (Федосеев, 2011ф).

Рудные тела выделяются по данным опробования и представляют собой зоны метасоматических изменений с кварцевыми прожилками и неравномерной вкрапленностью пирита. Также на месторождении присутствует мощная слабо золотоносная кварцевая жила Толстиха, расположенная в коленообразном перегибе структуры. На юго-западном контакте жилы выделяется тело золото-сульфидных руд с наиболее высокими для ме-



*Рис.* 1. Местоположение п. Наилы на тектонической карте Южного Урала (Геологическая ..., 2001, с упрощениями).

Восточно-Европейская платформа; 2 – Предуральский прогиб; 3 – Западно-Уральская зона; 4 – Центрально-Уральская зона; 5 – Магнитогорская зона; 6 – Восточно-Уральская зона; 7 – Зауральская зона; 8 – Западно-Сибирская плита; 9 – региональные разломы; 10 – ГУГР; 11 – месторождение Наилинское.

*Fig. 1.* Location of the settlement of Naily on tectonic map of South Urals, simplified after (Geological..., 2001).

1 – East European Platform; 2 – Pre-Uralian Foredeep; 3 – West Uralian Zone; 4 – Central Uralian Zone; 5 – Magnitogorsk Zone; 6 – East Uralian Zone; 7 – Transuralian Zone; 8 – West Siberian Plate; 9 – regional faults; 10 – Main Urals Fault; 11 – Naily deposit.

сторождения средними содержаниями золота (до ~3 г/т) (Попова, 2002). Это тело к настоящему времени практически полностью отработано.

Наилинское месторождение условно разделяется на Северный и Южный участки (рис. 2). На Северном участке преобладают серпентиниты. Околорудные породы представлены карбонат-тальковыми сланцами и кварц-карбонатными метасоматитами, развитыми по серпентинитам. Подчиненное значение играют породы габбродиорит-плагиогранитной серии и образованные по ним карбонат-хлорит-кварц-серицитовые метасоматиты. Также на участке выделяются хлоритолиты и почти мономинеральные актинолитовые метасоматиты, вероятно, сформированные по дайкам пород основного состава. На востоке серпентиниты и габбродиориты граничат с жилой Толстиха. Породы на границе с жилой рассланцованы, на плоскостях сланцеватости отмечено видимое свободное золото (Грознецкий, 1975ф). В целом, по Северному участку среднее содержание золота в рудных залежах,

Минералогия и условия образования руд Наилинского месторождения золота (Южный Урал) Mineralogy and ore formation conditions of the Naily gold deposit (South Urals)



*Рис. 2.* Геологическая карта Наилинского месторождения (Грознецкий, 1975ф) (а) и современный вид карьера и устья штольни на контакте жилы Толстиха с телом диоритов (б, в).

1 – Четвертичные породы; 2 – сульфидсодержащие кварцевые жилы; 3 – кварцевая жила Толстиха; 4 – хлоритовые сланцы; 5 – тальк-карбонатные сланцы; 6 – серпентиниты; 7 – габбродиориты, диориты, плагиограниты; 8 – диабазы, долериты; 9 – кварц-серицитовые сланцы по вулканитам; 10 – кварцевые жилы. І – Северный участок; ІІ – Южный участок.

*Fig. 2.* Geological map of the Naily deposit (Groznetsky, 1975) (a) and current view of the quarry and the mouth of the adit at the contact of the Tolstikha vein with diorites ( $\delta$ , B).

1 – Quaternary rocks; 2 – sulfide-bearing quartz veins; 3 – Tolstikha quartz vein; 4 – chlorite shales; 5 – talc-carbonate shales; 6 – serpentinites; 7 – gabbodiorites, diorites, plagiogranites; 8 – diabases, dolerites; 9 – quartz-sericite shales after effusive rocks; 10 – quartz veins. I – Northern area; II – Southern area.

оконтуренных по борту 1 г/т, составляет 2.5–2.6 г/т (Арифулов, 2001ф).

На Южном участке преобладают породы габбродиорит-плагиогранитного комплекса. Рудные зоны представлены тальк-карбонатными сланцами и кварц-серицит-хлорит-карбонат-альбитовыми метасоматитами по серпентинитам и диоритам соответственно. Маломощные прожилковые кварцкарбонатные и кварцевые зоны с обильной вкрапленностью кубического пирита наблюдаются в диоритах. Содержание золота здесь варьирует от следов до 80 г/т (среднее 5–6 г/т) (Попова, 2002).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения минерального состава руд из керна скважин отбирались штуфные и точечные пробы, из которых были изготовлены шлифы и аншлифы и получен тяжелый концентрат. Околорудные породы и руды изучались с использованием поляризационного микроскопа AxioScope A.1. Химический состав минералов определен с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Vega3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act. Ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с. Количественный анализ проведен с использованием эталонов сертифицированных стандартов № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd), MINM25-53 (Astimes Scientifc Limited, серийный номер 01-044) (аналитик М.А. Рассомахин). Для уточнения минерального состава использован рентгеноструктурный метод (дифрактометр Shimadzu XRD-6000, CuK-α излучение с монохроматором, количественные соотношения рассчитаны методом Ритвельда, программный пакет Siroquant V.4, аналитик Е.Д. Зенович, интерпретация Е.В. Белогуб). Все исследования выполнены в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс).

Температура формирования рудоносных метасоматитов оценена с применением эмпирических хлоритовых термометров (Cathelineau, Nieva, 1985; Kranidiotis, MacLean 1987; Jowett, 1991). Условия образования руд оценены с помощью микротермометрии флюидных включений (ФВ), которые изучены на микрокриотермостолике THMSG-600 (Linkam) с микроскопом Olympus BX51, объектив ×50. Управляющее программное обеспечение LinkSys V-2.39 (аналитик Н.К. Никандрова). Диапазон измерения температур фазовых переходов составляет от -196 до +600 °C, точность ±0.1 °C в интервале температур -20 до +80 °C и ±1° С за пределами этого интервала. Использованы плоскопараллельные полированные пластинки толщиной до 0.5 мм. Изучены первичные и вторичные включения размером 3-20 мкм в кварце, кальците и альбите. Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька. Температура гомогенизации включения принималась за минимальную температуру кристаллизации минерала (Ермаков, 1979). Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз (Борисенко, 1977). Солевой состав гидротермальных растворов во включениях оценивался по измеренным температурам эвтектик (Борисенко, 1977, Реддер, 1987).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Типы руд и рудные тела. Руды Наилинского месторождения подразделяются на три типа: (1) золотоносные сульфидсодержащие жильно-прожилковые зоны; (2) зоны метасоматических изменений с прожилками и редкой неравномерной вкрапленностью сульфидов в породах габбродиорит-плагиогранитного комплекса; (3) зоны рассланцевания в серпентинитах с развитием тальк-карбонатных и кварц-карбонатных метасоматитов, часто с вкрапленностью сульфидов. Типы оруденения 2 и 3 наблюдаются на обоих участках, тип 1 – только на Северном участке (табл. 1).

1. Золотоносные сульфидсодержащие жильно-прожилковые руды представлены вытянутыми зонами интенсивного окварцевания и альбитизации. В метасоматитах можно встретить обломки серпентинитов. Мощность зон колеблется от 0.1 до 2.0 м, протяженность составляет около 100 м (Арифулов, 2001ф). Руды состоят, преимущественно, из кварца, альбита и доломита, менее распространены хлорит и серицит. Пирит образует редкую идиоморфную вкрапленность и гнезда. Кристаллы пирита достигают размера несколько миллиметров и содержат пойкилитовые вростки нерудных минералов. Поверхность рудных образцов окрашена гидроксидами железа. Минералы благородных металлов включают самородное золото в виде сростков с пиритом и включений в нем, вкрапленности в основной массе породы и просечек в гессите, а также теллуриды Аи-Ад. В окисленных рудах установлено гипергенное золото. Полный список минералов приведен в таблице 1.

2. Зоны интенсивных гидротермально-метасоматических изменений пород габбродиорит-плагиогранитного комплекса представлены сетью сульфидсодержащих кварцевых, кварцальбитовых, кварц-карбонатных и карбонатных прожилков (штокверком), в которых иногда присутствует хлорит. Карбонаты представлены доломитом и кальцитом. Мощность прожилков изменяется от нескольких миллиметров до первых сантиметров (Грознецкий, 1975ф). Основной рудный минерал - пирит, редкие минералы перечислены в таблице 1. Текстуры руд вкрапленные, гнездовые, прожилковые. Прожилки пирита имеют мощность 0.5-2.0 мм, редко достигают 4.0 мм. По данным рентгеноструктурного анализа, количество пирита колеблется от следовых значений, характерных для Южного участка, до 2-3 мас. % в более мощных минерализованных зонах Северного участка. Минералы благородных металлов включают самородное золото в виде вкрапленности в основной массе породы, сростков и включениий в пирите, субмикронных включений в тетрадимите, а также сульфиды Au-Ag и теллуриды Au-Ag и Au.

3. По данным предшественников, зоны рассланцевания в серпентинитах с тальк-карбонатными и кварц-карбонатными породами часто с вкрапленностью сульфидов представляют собой жило- или линзообразные тела длиной до 50–100 м и мощностью до 20–30 м с учетом минерализованных зон в оторочках. Контакты зон метасоматически измененных серпентинитов в зонах рассланцевания и Минеральный состав руд Северного и Южного участков месторождения Наилинское Ore mineral composition of the North and South areas of the Naily deposit

Габлица 1

Table 1 виттихенит, блеклая руда, сульфосоли Pb-Bi-Ag-S эмплектит, тетрадимит, клогаит?, сульфосоли Cu-Ag-Pb-Bi и Ag-Pb-Bi ряда, теллуриды (Au, Ag, Au-Ag, Pb, Hg), сульфид 30JI0T0 ковеллин, феррокёстерит, арсенопирит-кобальтин, айкинит, Au-Ag, золото самородное, гематит, магнетит, ильменит, Халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, марказит, кубанит, молибденит, арсенопирит-кобальтин, энаргит, теградимит, **ПОЛИДИМИТ**, сфалерит Халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, борнит, халькозин. Халькопирит, борнит, галенит, зигенит, ваэсит, полидимит, миллерит, айкинит, кобальтин, герсдорфит, теллуриды (Pd, и Ag-Hg ряда, золото самородное, теллуриды (Ag), гетит (Au-Ag), Рудные (в порядке убывания количества) самородное, железо самородное, магнетит, гематит борнит, зигенит, миллерит, киноварь, эмплектит, галенит, золото самородное, мелонит, магнетит теллуриды пирротин, едкие Ag), никель и железо самородное. касситерит, уранинит, гетит Ag-Pb, Халькопирит, сфалерит, галенит, станоидид, тетрадимит, акантит, сульфотеллурид Халькопирит, молибденит, Магнетит Рудные Хромит Рутил Рутил Рутил Гутил Зторостепенные Нерудные (доломит), карбонат Серицит Серицит Хлорит, Эпидот Хлорит Хлорит эпидот Барит Рудные Пирит Пирит Пирит Пирит Пирит карбонаты карбонат, Плагиоклаз (альбит), кальцит), плагиоклаз (альбит) лавные Плагиоклаз, кварц доломит, кальцит (альбит), хлориты, кварц, карбонаты Гальк, карбонат. Нерудные Плагиоклаз доломит, илориты Гальк, кварц, прожилковая зона Гип метасоматоза Карбонат-Кварц-Плагиоклазовый Карбонат-Кварц-Плагиоклазовый серпентинитами Хлорит-талькна контакте с Хлорит-тальккарбонатный карбонатный Жильно--тидоп/Х -тиорит-Северный Южный Участок

*Примечание.* Все минералы установлены в ходе данного исследования Note. All minerals are identified during this study.

фоновых серпентинитов постепенные, также постепенно затухает их золотоносность. Преобладающим рудным минералом является пирит, его количество варьирует от следовых значений до 1 мас. %. Редкие рудные минералы перечислены в таблице 1. Золото встречается в виде включений в пирите. Только в этом типе руд найдены теллуриды Pd и Ag.

Петрографическая характеристика метасоматитов. Серпентиниты характеризуются пятнистой и массивной текстурами, тонко-мелкозернистой, волокнистой структурой. В их составе преобладают минералы группы серпентина: пластинчатый и радиально-лучистый антигорит, шнуры и прожилки хризотила, петельчатый лизардит, волокнистый бастит. По серпентину иногда развиваются карбонаты (магнезит, доломит), тальк (рис. 3а), хлорит, редко – кварц. Рудный минерал (магнетит) образует рассеянную вкрапленность, иногда заполняет петли лизардита, трещины. Тальк и карбонат встречаются в виде прожилков.

По серпентинитам образуются карбонат-тальковые сланцы с пятнисто-полосчатой текстурой и тонко-мелкозернистой, лепидогранобластовой, редко порфиробластовой структурой (рис. 3б). Карбонат в сланцах представлен магнезитом и доломитом в различных соотношениях. В сланцах присутствуют реликты серпентиновых минералов, встречаются хлорит, кварц, рутил. Рудный минерал образует рассеянную вкрапленность, линзовидные агрегаты, выполняет трещины. Для сланцев характерно постепенное изменение соотношений между породообразующими минералами от существенно карбонат-тальковых до кварц-карбонатных разностей Смирницкая А.Д., Рожкова Е.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В., Рассомахин М.А. Smirnitskaya A.D., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Rassomakhin M.A.

с незначительным присутствием хлорита и талька (рис. 3в).

156

Метасоматиты серицит-кварц-хлоритальбитового (рис. 3г) и серицит-карбонат-кварцальбитового (рис. 3д) состава образуются по диоритам и плагиогранитам соответственно. Переход между разностями постепенный. Метасоматиты характеризуются пятнистой и полосчатой текстурами, тонко-мелкозернистой и лепидогранобластовой структурами, иногда несут следы хрупких и пластических деформаций, в разной степени рассланцованы. Основные минералы – альбит, кварц и хлорит. По первичному плагиоклазу развиваются вторичный альбит, серицит, кварц, реже минералы группы эпидота. Хлорит, иногда совместно с эпидотом и карбонатами (доломитом и кальцитом в различных соотношениях) образует псевдоморфозы по темноцветным минералам. Акцессорные минералы – рутил, циркон, апатит, эпидот, титанит, монацит. Хлорит, кварц, карбонаты и, редко, эпидот



*Рис. 3.* Микрофотографии метасоматитов Наилинского месторождения: а – серпентинит; б – карбонат-тальковый сланец; в – кварц-карбонатный метасоматит; г – серицит-хлорит-кварц-альбитовый метасоматит по диориту; д – серицит-карбонат-кварц-альбитовый метасоматит по плагиограниту; е – амфибол-хлорит-эпидотовый метасоматит по габбро; ж – актинолитовый метасоматит; з – хлоритолит. Проходящий свет (с анализатором).

Srp – серпентин, Cb – карбонат, Tlc – тальк, Q – кварц, Pl – плагиоклаз, Ser – серицит, Chl – хлорит, Amp – амфибол, Act – актинолит, Ttn – титанит, Ep – эпидот, Zo – цоизит, Ore – рудный минерал.

*Fig. 3.* Photomicrographs of metasomatites of the Naily deposit: a – serpentinite;  $\delta$  – carbonate-talc shale; B – quartz-carbonate metasomatite;  $\Gamma$  – sericite-chlorite-quartz-albite metasomatite after diorite;  $\mu$  – sericite-carbonate-quartz-albite metasomatite after plagiogranite; e – amphibole-chlorite-epidote metasomatite after gabbro;  $\pi$  – actinolite metasomatite; 3 – chloritolite. Transmitted light (with analyzer).

Srp – serpentine, Cb – carbonate, Tlc – talc, Q – quartz, Pl – plagioclase, Ser – sericite, Chl – chlorite, Amp – amphibole, Act – actinolite, Ttn – titanite, Ep – epidote, Zo – zoisite, Ore – ore mineral.

образуют прожилки. Рудный минерал, в основном, пирит образует мелко- и тонкозернистые агрегаты и кубические метакристаллы, иногда окруженные параллельно-пластинчатыми каймами хлорита, мусковита или кварца («тени давления»).

В пределах рудного поля также развиты метасоматические породы, не связанные с оруденением – существенно эпидотовые апогаббровые разности, близкие к мономинеральным актинолитовые и хлоритовые породы, исходный субстрат которых не определен.

Метасоматиты плагиоклаз-амфибол-хлорит-эпидотового состава, образованные по габбро, фисташково-зеленые, имеют массивную или пятнистую текстуру, тонко-мелкозернистую, лепидогранобластовую, пойкилобластовую структуру. В их составе значительную роль играют минералы группы эпидота, хлорит, иногда – актинолит (рис. Зе), которые образуют псевдоморфозы по темноцветным минералам и плагиоклазам, часто сохраняя тени реликтовой структуры габбро. Плагиоклаз замещается минералами группы эпидота, серицитом и кварцем. В породах присутствует карбонат (по данным рентгеноструктурного анализа - доломит, в меньшей степени – кальцит). Акцессорные минералы - титанит, рутил, апатит, рассеянная вкрапленность рудных минералов.

Актинолитовые метасоматиты светлые зеленовато-серые, массивные, реже сланцеватые, мелко-среднезернистые, имеют нематобластовую и порфиробластовую структуры, состоят из актинолита (рис. 3ж) с незначительным присутствием хлорита и талька. Рудный минерал образует редкую рассеянную вкрапленность. Реликты структур исходных пород не сохраняются.

Хлоритолиты массивной текстуры с радиально-лучистой и лепидобластовой структурой, помимо породообразующего хлорита (рис. 33), содержат акцессорные циркон и рутил, пылеватый и мелкозернистый рудный минерал. Первичная порода для них не определяется.

Рудообразующие, второстепенные и редкие минералы. Основным рудообразующим минералом является *пирит*, который представлен, преимущественно, метакристаллами кубической формы и субгедральными вкрапленниками, иногда агрегатами кристаллов и просечками. Размер пирита варьирует от 10 мкм до 3–4 мм, реже до 5–7 мм. Пирит содержит включения силикатов, оксидов Ті, магнетита, гематита, реже халькопирита, пирротина, галенита, сфалерита, борнита, арсенопирита, кобальтина, энаргита, айкинита, эмплектита, тетрадимита, сульфосолей состава Pb-Bi-Te, Cu-Ag-Pb-Bi и Ag-Pb-Bi, самородного золота и теллуридов Au, Ag, Au-Ag, Pb и Hg. Пирит в хлорит-тальк-карбонатных породах содержит включения нерудных минералов, халькопирита, борнита, зигенита, ваэсита, полидимита, миллерита, галенита, сульфосоли состава Cu-Pb-Bi, самородного золота и теллуридов Pd и Ag. B центре некоторых кристаллов пирита присутствует зона с повышенными содержаниями As (1.64–5.66 мас. %) (рис. 4а, в), а также Co и Ni, содержания которых значительно варьирует (табл. 2).

Халькопирит образует ангедральные зерна в основной массе породы, сростки с оксидами Ті и пиритом, единичные включения в сфалерите и вкрапленность в пирите (рис. 4б, 6е), а также трещины в пирите наряду с галенитом, сфалеритом и самородным золотом. Во включениях халькопирит срастается с пирротином, борнитом, энаргитом, галенитом, сульфидом Au-Ag, эмплетитом, золотом и теллуридами (Au-Ag и Ag), в хлорит-тальккарбонатном метасоматите - с Ni-минералами и теллуридами (Pd и Ag). Размер халькопирита во включениях и срастаниях достигает 70 мкм, в основной массе – до 0.25 мм. В окисленных рудах по трещинам и периферии халькопирита развивается ковеллин, халькозин и тонкозернистые агрегаты гидроксидов Си и Fe.

Галенит образует редкую вкрапленность (рис. 4б), выполняет трещины в пирите вместе с самородным золотом и халькопиритом и срастается со сфалеритом. Во включениях в пирите галенит срастается с самородным золотом, тетрадимитом, айкинитом, теллуридами (Au-Ag и Ag) и оксидами Ті. Размер зерен галенита достигает 0.17 мм, включений – 10–50 мкм. Состав соответствует стехиометрической формуле.

Сфалерит отмечается в виде редкой вкрапленности в нерудных минералах, где он срастается с халькопиритом и пиритом, выполняет трещины и образует включения в пирите. Сфалерит содержит эмульсионную вкрапленность халькопирита, феррокёстерита и касситерита. Размер зерен сфалерита достигает 0.25–0.50 мм, включений – 10–100 мкм.

Пирротин образует редкие включения размером 10–50 мкм в пирите, которые иногда срастаются с халькопиритом и кобальтином.

*Борнит* встречается редко, совместно с халькопиритом и виттихенитом выполняет трещины в пирите и образует единичные включения в пирите, в которых ассоциирует с халькопиритом, виттихеСмирницкая А.Д., Рожкова Е.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В., Рассомахин М.А. Smirnitskaya A.D., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Rassomakhin M.A.



*Рис. 4.* Морфология выделений Со, Ni и As-содержащего пирита (a, б – Северный участок; в – Южный участок): а – скелетный кристалл Со-, Ni- и As-содержащего пирита (точка g) с включением кобальтина (точка f) в пирите (точка h); б – включения Со-As содержащего пирита (точка f), халькопирита (Сhp), галенита (Gn) и кобальтина (точка e) в пирите (Py); в – вросток As-содержащего пирита (точка a) в пирите (точка b). BSE фото.

*Fig. 4.* Morphology of Co-, Ni- and As-bearing pyrite grains (a, 6 – Northern area; B – Southern area): a – skeletal crystal of Co-, Ni- and As-bearing pyrite (point g) with cobaltite inclusion (point f) in pyrite (point h); 6 – inclusions of Co- and Asbearing pyrite (point f), chalcopyrite (Chp), galena (Gn) and cobaltite (point e) in pyrite (Py); B – ingrowth of Asbearing pyrite (point a) in pyrite (point b). BSE images.

Химический состав пирита месторождения Наилинское (мас. %) Chemical composition of pyrite of the Naily deposit (wt. %)

Таблица 2 Table 2

№ п/п	№ ан.	S	Fe	As	Ni	Со	Сумма	Формула
1	21360g	51.04	29.56	1.64	0.80	16.96	100.00	$(Fe_{0.66}Co_{0.35}Ni_{0.02})_{1.02}(S_{1.97}As_{0.03})_{2.00}$
2	21360h	53.35	46.65	-	_	_	100.00	$Fe_{1.0}S_{2.00}$
3	21361f	49.16	40.60	4.27	_	5.88	99.92	$(Fe_{0.91}Co_{0.12})_{1.03}(S_{1.93}As_{0.07})_{2.00}$
4	21084c	52.88	46.52	_	_	0.60	100.00	$(Fe_{1.01}Co_{0.01})_{1.02}S_{2.00}$
5	21084d	53.20	46.80	_	_	_	100.00	$Fe_{1.01}S_{2.00}$
6	21095a	48.64	45.50	5.66	-	-	99.80	$Fe_{1.02}(S_{0.91}As_{0.09})S_{2.00}$
7	21095b	52.09	47.67	_	_	_	99.76	$Fe_{1.05}S_{2.00}$

*Примечание.* Формулы минерала рассчитаны на S = 2 для ан. 2, 4, 5 и 7 и на As + S = 2 для ан. 1, 3 и 6. Здесь и в табл. 2–5, прочерк – ниже предела обнаружения.

*Note.* The formulas of pyrite are recalculated to S = 2 for an. 2, 4, 5 and 7 and to As + S = 2 for an. 1, 3 and 6. Here and in Tables 2–5, dash – below detection limit.

нитом, полидимитом, ваэситом и теллуридами (Au-Ag, Pd и Ag). Размер зерен борнита не превышает 30 мкм. В составе борнита иногда присутствует Ві до 8 мас.%.

Молибденит отмечается в виде агрегатов тонких изогнутых пластинок в жильно-прожилковой зоне и карбонат-кварц-плагиоклазовом метасоматите с прожилками пирита, срастается с оксидами Ті и образует включения в пирите. Размер пластинок не превышает 40 мкм, агрегатов – до 150 мкм.

Киноварь встречается в рудах жильно-прожилковой зоны в срастании с сульфосолью Ag-Hg-As-Sb и гесситом. Размер зерен киновари составляет 60 мкм. Арсенопирит присутствует в виде редкой вкрапленности в основной массе, а также включений в пирите и халькопирите. В пирите арсенопирит срастается с халькопиритом, энаргитом и самородным золотом. Размер зерен арсенопирита варьирует от 1.0–2.0 мкм до 0.1 мм.

Сульфиды и сульфоарсениды Ni и Co (зигенит, полидимит, миллерит, кобальтин, герсдорфит) встречены только в хлорит-тальк-карбонатных метасоматитах, а кобальтин присутствует во всех типах руд. Эти минералы, преимущественно, образуют включения размером до 70 мкм в пирите, в которых они срастаются между собой и халькопиритом, редко борнитом, сульфосолью состава Cu-PbВі и теллуридами Pd и Ag. Встречаются взаимные сростки минералов Ni в нерудной массе. Кобальтин в хлорит-карбонат-кварц-плагиоклазовых метасоматитах отмечен в виде вкрапленности в основной массе породы, где срастается с пиритом и образует включения в халькопирите и Со-содержащем пирите (рис. 4a, б).

*Теннантит* встречается только в рудах жильно-прожилковой зоны в виде единичных включений в пирите.

Сульфосоли системы Pb-Cu-Bi (эмплектит, виттихенит, айкинит) встречены только на Северном участке в жильно-прожилковой зоне и карбонат-кварц-плагиоклазовых метасоматитах. Айкинит также встречается в хлорит-тальккарбонатных метасоматитах. Эти минералы, преимущественно, образуют включения в пирите, часто совместные с тетрадимитом, теллуридами (Au-Ag, Ag), самородным золотом и халькопиритом, реже виттихенит срастается с борнитом и пиритом. Размер зерен сульфосолей составляет 5–20 мкм. В составе эмплектита и виттихенита отмечается Pb 6.89–7.91 мас. %.

Тетрадимит встречается в жильно-прожилковой зоне и карбонат-кварц-плагиоклазовых метасоматитах в виде редких срастаний с пиритом, золотом, галенитом, халькопиритом, айкинитом, эмплектитом, теллуридами (Au-Ag и Ag) и сульфотеллуридом Pb-Ag, образует включения и выполняет трещины в пирите. Размер зерен тетрадимита составляет 10–150 мкм. В тетрадимите установлены примеси Fe, Se и Cu (табл. 3).

*Клогаит* (?) отмечается в виде включений в пирите размером 30 мкм. Формула не стехиометрична, отмечается завышенное содержание Ві и незначительная примесь Fe (табл. 3).

Алтаит и колорадоит обнаружены в карбонат-кварц-плагиоклазовых метасоматитах в виде включений в пирите, где они могут срастаться с самородным золотом. Размер зерен теллуридов составляет 5–40 мкм.

*Мелонит* присутствует в хлорит-тальккарбонатных метасоматитах в виде единичных зерен в породе и включения в пирите, размер которых 30–100 мкм.

Самородный никель встречается редко и образует каймы и вытянутую вкрапленность в серпентинитах и в магнетите. Размер зерен не превышает 20 мкм.

Самородное железо встречается крайне редко в серпентинитах в виде вытянутой (пленочной)

вкрапленности размером до 20 мкм по трещинам в породе. В составе отмечены Cr, Ni и Co.

*Хромит* отмечается только в виде вытянутых ангедральных реликтов в магнетите, размер зерен не превышает 20 мкм.

Магнетит представлен редкими включениями в пирите и тонкой рассеянной вкрапленностью, гнездами и прожилками мощностью до 1.5 мм, протяженностью до 5 мм в основной массе метасоматитов. Магнетит содержит включения пирита, халькопирита, самородного никеля, хромита, нерудных минералов. Размер включений составляет 5–10 мкм для рудных минералов и до 0.25 мм – для нерудных.

*Гематит* образует единичные каймы и ламелли в магнетите, а также включения в пирите. Размер выделений составляет 10–80 мкм.

*Минералы благородных металлов.* Минералы благородных металлов Наилинского месторождения представлены самородным золотом, сульфидами Ag и Au-Ag, сульфосолями систем Ag-Hg-As-Sb, Pb-Bi-Ag и Cu-Ag-Pb-Bi, сульфотеллуридом Ag-Pb, теллуридами Au и Ag, Au, Pd.

Самородное золото образует: 1) свободные частицы, связанные с нерудными минералами и вероятно, выполняющие межзерновое пространство (рис. 5, 6а, б); 2) интерстициальные зерна, заполняющие трещины в пирите (рис. 6в) часто совместно с халькопиритом, галенитом и сфалеритом, и просечки в гессите; 3) включения в пирите (рис. 6г) и редко халькопирите; 4) субмикронные включения в тетрадимите (рис. 6д); 5) включения в лимоните (рис. 6ж).

Самородное золото в пирите срастается с халькопиритом, галенитом, энаргитом, эмплектитом, айкинитом, тетрадимитом и теллуридами (петцитом, калаверитом, алтаитом, гесситом, колорадоитом), оксидами Ті и нерудными минералами. В одной из золотин встречено включение тетрадимита. Размер свободного золота, извлеченного в тяжелый концентрат, варьирует от субмикроскопического до ~500 мкм, преобладающий размер сечений в аншлифах 5-30 мкм, реже 50-120 мкм. Форма золотин чаще всего интерстициальная, реже комковатая, удлиненная (рис. 5). Состав самородного золота варьирует (рис. 7, электронное приложение, табл. ЭП1). В целом, для месторождения, содержание Ад в золоте составляет 10-16 мас. %, повышенные содержания Ад до 20-24 мас. % отмечаются редко во включениях золота в пирите и золоте, образующем просечки в гессите и включения в лимоните в рудах Северного участка. Единичное

Химический состав тетрадимита, клогаита и сульфотеллурида Ag-Pb месторождения Наилинское (мас. %) Table 3

Chemical composition of tetradymite, clogauite and Ag-Pb sulfotelluride of the Naily deposit (wt. %)

			1		•		0	0			
№ п/п	№ ан.	S	Fe	Cu	Se	Te	Ag	Pb	Bi	Сумма	Формула
1	21351b	5.06	-	_	_	34.33	_	-	59.42	98.82	$Bi_{2.00}Te_{1.89}S_{1.11}$
2	21352b	4.09	0.69	_	-	35.44	-	-	59.27	99.49	$(Bi_{2.10}Fe_{0.09})_{2.19}Te_{2.06}S_{0.94}$
3	21352f	4.05	2.65	_	1.78	33.77	_	-	56.93	99.19	$(Bi_{1.98}Fe_{0.34})_{2.32}(Te_{1.92}S_{0.92}Se_{0.16})_{3.00}$
4	21359a	4.00	-	_	1.49	35.01	_	-	59.26	99.75	$Bi_{2.03}(Te_{1.97}S_{0.90}Se_{0.13})_{3.00}$
5	21359d	4.14	1.42	_	1.06	36.34	-	-	56.96	99.91	$(Bi_{1.90}Fe_{0.18})_{2.08}Te_2(S_{0.91}Se_{0.09})_{1.00}$
6	21360d	4.30	1.52	1.08	0.30	33.83	_	-	58.72	99.74	$(Bi_{2.09}Fe_{0.20}Cu_{0.12})_{2.42}(Te_{1.97}Se_{0.03})_{2.00}S_{1.00}$
7	21363f	3.74	1.30	_	1.65	34.40	-	-	58.59	99.68	$(Bi_{2.07}Fe_{0.17})_{2.14}Te_{1.99}(S_{0.86}Se_{0.15})_{1.01}$
8	21352a	5.39	0.95	_	-	30.25	-	11.93	51.02	99.54	$Pb_{0.99}(Bi_{4.22}Fe_{0.29})_{4.51}Te_{4.10}S_{2.90}$
9	21784b	4.15	-	_	_	24.85	41.50	29.49	-	100.00	$(Ag_{3.60}Pb_{1.30})_{4.90}Te_{1.80}S_{1.20}$

*Примечание*. Анализы 1–7 – тетрадимит, 8 – клогаит (?), 9 – сульфотеллурид Ag-Pb. Формулы минералов рассчитаны на сумму Te + S = 3 для ан. 1, 2 и 9, Te + S + Se = 3 для ан. 3-7 и Te + S = 7 для ан. 8.

*Note.* Analyses 1-7 – tetradymite, 8 – clogauite, 9 – Ag-Pb sulfotelluride. The mineral formulas are recalculated to Te + S = 3 for an. 1, 2 and 9, Te + S + Se = 3 for an. 3–7 and Te + S = 7 for an. 8.



*Рис. 5.* Форма свободного золота в тяжелых концентратах месторождения Наилинское (а–г – Северный участок; д, е – Южный участок): а – комковатое золото (точка d) с включением тетрадимита (точка c) и халькопирита (Chp); б – интерстициальное золото (точка a) со следами карбонатов (Ca); в – золото (точка b) в срастании с пиритом (Py); г – золото (точка g) в срастании с карбонатом (Dol) и халькопиритом; д – удлиненное интерстициальное золото (точка j); е – интерстициальное золото (точка m) со следами хлорита (Chl) и альбита (Ab). BSE фото.

*Fig.* 5. Morphology of free gold in heavy concentrates of the Naily deposit (a-r – Northern area;  $\pi$ –e – Southern area): a – lumpy gold (point d) with inclusions of tetradymite (point c) and chalcopyrite (Chp);  $\delta$  – interstitial gold (point a) with traces of carbonates (Ca); B – gold (point b) intergrown with pyrite (Py); r – gold (point g) intergrown with carbonate (Dol) and chalcopyrite;  $\pi$  – elongated interstitial gold (point j); e – interstitial gold (point m) with traces of chlorite (Chl) and albite (Ab). BSE images.

160

Минералогия и условия образования руд Наилинского месторождения золота (Южный Урал) Mineralogy and ore formation conditions of the Naily gold deposit (South Urals)



*Рис. 6.* Морфология выделений самородного золота (Au) месторождения Наилинское: а – свободное золото; б – интерстициальное золото; в – трещинное золото; г – включения золота в пирите; д – субмикронное включение золота в тетрадимите (Tet), который срастается с галенитом (точка а) и сульфосолями Cu-Ag-Pb-Bi и Pb-Bi-Ag (точки b и c) в пирите; е – включения халькопирита (Chp), кобальтина (точка g) и субмикронного сульфида Au-Ag (точка h) в пирите; ж – гипергенное золото в лимоните (Lim). Ру – пирит; Rt – рутил.

Фото а – г – отраженный свет, д-ж – BSE фото.

*Fig. 6.* Morphology of gold (Au) of the Naily deposit:  $a - free gold; 6 - interstitial gold; <math>B - fracture gold; r - native gold inclusions in pyrite; <math>\pi - fine$  native gold inclusion in tetradymite (Tet) intergrown with galena (point a) and sulfosalts Cu-Ag-Pb-Bi and Pb-Bi-Ag (points b and c) in pyrite; e - inclusions of chalcopyrite (Chp), cobaltite (point g) and fine Au-Ag sulfide (point h) in pyrite;  $\pi - supergene native gold in limonite (Lim)$ . Py - pyrite; Rt - rutile.

Photos a-r – reflected light,  $\pi$ – $\pi$  – BSE images.



*Puc.* 7. Состав самородного золота Наилинского месторождения: a - Ceeephi a участок; 6 - Южный участок. *Fig.* 7. Composition of native gold of the Naily deposit: a - N orthern area; 6 - S outhern area.

зерно высокосеребристого золота (58.43 мас. % Au) (Петровская, 1973) встречено в сростке с высокопробным золотом (99.68 мас. % Au) на Северном участке. Золото в пирите содержит незначительную примесь Cu (0.35–0.72 мас. %).

*Гипергенное золото* встречается в лимонитовых массах, где оно ассоциирует с акантитом и иногда с лимонитом с повышенными концентрациями Te.

Сульфид Au-Ag и акантит Ag<sub>2</sub>S найдены в жильно-прожилковой зоне и карбонат-кварцплагиоклазовых метасоматитах, где они образуют единичные включения в пирите (рис. 6е). Акантит ассоциирует с гипергенным золотом и лимонитом.

*Теллуриды* представлены калаверитом AuTe<sub>2</sub> (рис. 8а), петцитом Ag<sub>3</sub>AuTe<sub>2</sub> (рис. 8а, б), гесситом Ag<sub>2</sub>Te (рис. 8в, г) и теллуридом Pd (рис. 8д, е) (для тальк-карбонатных метасоматитов). Теллуриды благородных металлов образуют тонкие ангедральные изометричные включения в пирите, которые срастаются между собой, а также с самородным золотом, халькопиритом, борнитом, галенитом, киноварью и сульфосолями (эмплектитом, айкинитом и минералом состава Ag-Hg-As-Sb). Теллурид Pd срастается с ваэситом, борнитом, халькопиритом и полидимитом (рис. 8д, е, спектр 210701 и 21353с). Размер сечений зерен теллуридов составляет 1–40 мкм, редко достигая 60–120 мкм. Состав теллуридов участка Северный показан в таблице 4.

Недиагностированный сульфотеллурид Ag-Pb определен в сростке с галенитом и тетрадимитом в тяжелом концентрате. Размер его зерна не превышает 40 мкм. Состав приведен в таблице 3.

Сульфосоль системы Ag-Hg-As-Sb встречена на контакте киновари и гессита (рис. 8в). Состав рассчитывается на формулу, соответствующую промежуточному члену ряда прустит–пираргирит. В минерале зафиксирована примесь Hg (8.42– 9.09 мас. %), а также Fe, Co и Zn, суммарно составляющие 2.67–2.96 мас. % (табл. 5).

Сульфосоли систем Cu-Ag-Pb-Bi (химический состав близок к беррииту) и Ag-Pb-Bi (шапбахит?) отмечаются в виде единичных включений размером 10–20 мкм в пирите. Сульфосоли тесно срастаются с галенитом и тетрадимитом с субмикронным включением золота (рис. 6д). Состав сульфосолей приведен в таблице 5, минеральные виды обозначены условно.

Температура минералообразования по данным хлоритового термометра. Для оценки температуры формирования рудоносных метасоматитов использован хлорит из кварц-карбонат-хлоритовых прожилков в аподиоритовых метасоматитах Северного участка. Состав хлорита по современной классификации соответствует клинохлору, а по классификации (Неу, 1954) – рипидолиту (табл. 6, электронное приложение, табл. ЭП2). Температуры образования хлорита были рассчитаны по разным формулам (Cathelineau, Nieva, 1985; Kranidiotis, MacLean, 1987; Jowett, 1991), которые дали близкие результаты: 339–392 °C (табл. 7).

Условия образования продуктивных жил по данным изучения ФВ. Результаты микротермометрии ФВ в минералах рудных жил показаны в таблице 8. Включения в кварце подразделяются на первичные и вторичные. Первичные включения занимают обособленное положение, имеют овальную форму, иногда с элементами отрицательного кристалла, иногда – неправильные очертания. Размеры включений варьируют от 5 до 15, редко 20 мкм, объем газового пузырька составляет 10– 25 %, максимально 25 % (рис. 9а). Вторичные ФВ в кварце образуют полосы, приуроченные к залеМинералогия и условия образования руд Наилинского месторождения золота (Южный Урал) Mineralogy and ore formation conditions of the Naily gold deposit (South Urals)



*Рис. 8.* Морфология теллуридов Северного участка: а – срастание калаверита (точка b), петцита (точка c) и тетрадимита (точка d) в пирите; б – включения айкинита (точка e), тетрадимита (точка f), петцита (точка g), эмплектита (точка h), золота (точка i) и халькопирита в пирите; в – сросток гессита (точка e), киновари (точка g) и Ag-Hg сульфосоли (точка i, f) и тонкая просечка самородного золото в гессите (точка h); г – включения самородного золота (точка b), айкинита (точка c), тетрадимита (точка d), гессита (точка e) и галенита в пирите; д – включения PdTe (точка l), AgTe (точка m), борнита (Bn) и ваэсита (точка q) в пирите; е – включения PdTe (точка c), халькопирита, борнита (точка a) и полидимита (точка b) в пирите; ж – включения самородного золота (точка b) и колорадоита (точка c) в пирите; з – спектр (210701) PdTe к рис. 7д; и – спектр (21353c) PdTe к рис. 7e. BSE фото.

*Fig.8.* Morphology of tellurides of the Northern area: a – intergrowth of calaverite (point b), petzite (point c) and tetradymite (point d) in pyrite;  $\delta$  – inclusions of aikinite (point e), tetradymite (point f), petzite (point g), emplectite (point h), gold (point i) and chalcopyrite in pyrite; B – intergrowth of hessite (point e), cinnabar (point g) and Ag-Hg sulfosalt (point i, f) and fine native gold veinlet in hessite (point h);  $\Gamma$  – inclusion of native gold (point b), aikinite (point c), tetradymite (point d), hessite (point e) and galena in pyrite;  $\pi$  – inclusions of PdTe (point 1), AgTe (point m), bornite (Bn) and vaesite (point q) in pyrite; e – inclusions of PdTe (point c), chalcopyrite, bornite (point a) and polydymite (point b) in pyrite;  $\pi$  – inclusions of gnative old (point b) and coloradoite (point c) in pyrite; 3 – spectrum (210701) PdTe to Fig. 7 $\pi$ ;  $\pi$  – spectrum (21353c) PdTe to Fig. 7e. BSE images.

Table 4

Chemical composition of tenurities of the Northern area of the Nany deposit (wt. 70)										
№ п/п	№ ан.	Ag	Te	Au	Pb	Fe	Ni	Hg	Сумма	Формула
1	21359b	_	56.77	42.30	_	_	_	_	99.07	Au <sub>0.97</sub> Te <sub>2.00</sub>
2	21785e	0.94	57.92	41.15	_	-	_	_	100.00	$Au_{0.92}Ag_{0.04}Te_{2.00}$
3	21069c	38.43	30.74	30.83	_	-	_	_	100.00	Au <sub>1.30</sub> Ag <sub>2.96</sub> Te <sub>2.00</sub>
4	21085b	40.04	35.00	24.97	_	-	_	-	100.00	Au <sub>0.92</sub> Ag <sub>2.71</sub> Te <sub>2.00</sub>
5	21085d	42.29	34.09	23.63	_	-	_	_	100.00	$Au_{0.9}Ag_{2.93}Te_{2.00}$
6	21358c	40.42	33.43	26.15	_	-	_	-	100.00	Au <sub>1.01</sub> Ag <sub>2.86</sub> Te <sub>2.00</sub>
7	21358a	41.75	32.81	25.11	_	-	_	-	99.66	$Au_{0.99}Ag_{3.01}Te_{2.00}$
8	21352g	41.96	33.62	24.42	_	_	_	_	100.00	Au <sub>0.94</sub> Ag <sub>2.95</sub> Te <sub>2.00</sub>
9	21361a	40.74	33.55	24.96	_	-	_	-	99.24	Au <sub>0.96</sub> Ag <sub>2.87</sub> Te <sub>2.00</sub>
10	21359c	40.82	33.37	25.03	_	-	_	-	99.21	Au <sub>0.97</sub> Ag <sub>2.89</sub> Te <sub>2.00</sub>
11	21362d	40.30	32.48	26.89	_	_	_	_	99.68	Au <sub>1.07</sub> Ag <sub>2.94</sub> Te <sub>2.00</sub>
12	21363c	41.12	33.00	25.56	_	-	_	-	99.68	Au <sub>1.00</sub> Ag <sub>2.95</sub> Te <sub>2.00</sub>
13	21785c	42.17	33.79	24.04	_	-	_	_	100.00	Au <sub>1.00</sub> Ag <sub>2.95</sub> Te <sub>2.00</sub>
14	21820c	41.52	33.78	24.70	_	-	_	_	100.00	$Au_{0.95}Ag_{2.91}Te_{2.00}$
15	21820a	41.66	34.22	24.12	_	-	_	-	100.00	Au <sub>0.91</sub> Ag <sub>2.88</sub> Te <sub>2.00</sub>
16	21357b	62.41	37.12	_	_	-	_	_	99.53	$Ag_{1.99}Te_{1.00}$
17	21360e	61.68	37.59	-	_	-	-	-	99.26	$Ag_{1.94}Te_{1.00}$
18	21782b	49.87	37.41	12.72	_	-	-	-	100.00	$Ag_{1.58}Au_{0.22}Te_{1.00}$
19	21787c	_	38.97	-	—	_	-	61.03	100.00	$Hg_{1.00}Te_{1.00}$
20	21357a	2.79	36.22	-	59.38	0.79	-	-	99.17	$Pb_{1.01}Ag_{0.09}Fe_{0.05}Te_{1.00}$
21	21784c	_	80.97	_	_	0.56	18.47	_	100.00	$Ni_{0.99}Fe_{0.03}S_{2.00}$

Химический состав теллуридов участка Северный месторождения Наилинское (мас. %) Chemical composition of tellurides of the Northern area of the Naily deposit (wt. %)

Примечание. Анализы 1, 2 – калаверит, 3–15 – петцит, 16–18 – гессит, 19 – колорадоит, 20 – алтаит, 21 – мелонит. Формулы минералов рассчитаны на Te = 1 (гессит, колорадоит, алтаит) и Te = 2 (петцит, калаверит, мелонит). Note. Analyses 1, 2 – calaverite, 3–15 – petzite, 16–18 – hessite, 19 – coloradoite, 20 – altaite, 21 – melonite. The mineral formulas are recalculated to Te = 1 (hessite, coloradoite, altaite) and Te = 2 (petzite, calaverite, melonite).

## Химический состав сульфосолей месторождения Наилинское (мас. %) Chemical composition of sulfosalts of the Naily deposit (wt. %)

(o) Table 5

Таблииа 5

№ п/п	№ ан.	S	Fe	Со	Cu	Zn	As	Те	Ag	Pb	Bi	Sb	Hg	Сумма
1	19526i	19.15	1.50	0.85	_	0.61	10.55	_	52.37	_	—	5.22	8.42	98.67
$(Ag_{2,49}Hg_{0,21}Fe_{0,14}Co_{0,07}Zn_{0,05})_{2,96}(As_{0,72}Sb_{0,22})_{0,94}S_{3,06}$														
2	19526f	19.33	1.95	0.72	_	_	9.72	—	53.16	—	_	5.70	9.09	99.67
	$(Ag_{2.53}Hg_{0.23}Fe_{0.18}Co_{0.06})_{3.00}(As_{0.67}Sb_{0.24})_{0.91}S_{3.09}$													
3	22142b	15.56	1.95	_	5.16	_	_	_	9.13	20.41	47.80	_	_	100.00
4	22142c	14.91	3.14	_	_	_	_	2.02	10.15	24.16	45.61	_	_	100.00
	$(Ag_{0.2}Pb_{0.24}Bi_{0.45}Fe_{0.12})_{1.01}(S_{0.97}Te_{0.03})_{1.00}$													

*Примечание.* 1, 2 – Аg-Hg-As сульфосоль ряда прустит-пираргирит; 3, 4 – *сульфосоли* Cu-Ag-Pb-Bi (берриит?) и Ag-Pb-Bi (шапбахит?). Формулы минералов рассчитаны на As + Sb + S = 4 для (1, 2) и Te + S = 1 для (4).

*Note.* 1, 2 – Ag-Hg-As sulfosalt of the proustite-pyrargyrite series; 3, 4 – Cu-Ag-Pb-Bi (berryite?) and Ag-Pb-Bi (shapbachite?) sulfosalts. The mineral formulas are recalculated to As + Sb + S = 4 for an. 1 and 2 and Te + S = 1 for an. 4.

ченным трещинам (рис. 96), встречаются облачные скопления мелких ФВ. Вторичные ФВ округлые, сложной формы, имеют размер 2–15 мкм, газовый пузырек занимает 5–10 об. %. Как первичные, так и вторичные ФВ двухфазные (газ + жидкость). Включения в кальците имеют вытянутую форму, размер от 3 до 10 мкм, газовый пузырек занимает до 20 об.

%, иногда он разделяется на два пузырька (рис. 9в). Включения в альбите округло-вытянутые, их размер (2–5 мкм) позволил определить только температуру гомогенизации.

Включения в кварце гомогенизировались в жидкую фазу в диапазоне 162–377 °С (рис. 10) с пиком 160–170 °С. Температура эвтектики –23.5 °С

# Состав хлорита из измененных диоритов месторождения Наилинское

Table 6 Composition of chlorite from altered diorites of the Naily denosit

Компо-	Mac %	Компо-	Коэф-ты в								
ненты	ivide. 70	ненты	формуле								
SiO <sub>2</sub>	<u>24.85–26.91</u> 25.83	Si	<u>2.61–2.76</u> 2.68								
41.0	20.23-21.97	Al <sup>IV</sup>	<u>1.21–1.35</u> 1.25								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.08	Al <sup>VI</sup>	<u>1.34–1.50</u> 1.41								
FeO	<u>24.19–29.52</u> 27.55	Fe	<u>2.07–2.61</u> 2.40								
MgO	<u>13.32–17.57</u> 15.14	Mg	<u>2.10–2.68</u> 2.34								
MnO	<u>0-0.29</u> 0.17	Mn	<u>0–0.03</u> 0.01								
CaO	<u>0-0.28</u> 0.04	Ca	<u>0-0.03</u> 0.005								
Н <sub>2</sub> О <sub>расч</sub> .	<u>11.35–11.73</u> 11.53	R <sup>n+</sup> в октаэдрической позиции	<u>6.01–6.06</u> 6.02								
Сумма	<u>89.17–90.79</u> 89.81	Fe / Fe + Mg	<u>0.44–0.55</u> 0.51								
Сумма <sub>расч.</sub>	<u>100.62–102.36</u> 101.34	Si / Si + Al	<u>0.65–0.69</u> 0.67								

Примечание. Здесь и в табл. 7: в числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее (количество анализов 12).

*Note.* Here and in Table 7: numerator – minimum and maximum values, denominator – average (number of analyses 12).

### Таблица 7

Table 7

### Температуры формирования хлорита из измененных диоритов месторождения Наилинское

Formation temperatures of chlorite from altered diorites of the Naily deposit

Формула расчета	Авторы	$T, ^{\circ}C$ $(n = 12)$
$T(^{\circ}C) = -61.92 + 321.98 \text{Al}^{\text{IV}}$	Cathelineau M. (1988)	<u>339–386</u> 362 (17)
$T(^{\circ}C) = 106Al_{c}^{IV} + 18$	Kranidiotis,	<u>347–392</u>
$Al_c^{IV} = Al^{IV} + 0.7(Fe / [Fe + Mg])$	MacLean, 1987	372 (16)
$T(^{\circ}C) = 319Al_{c}^{IV} - 69$	Iowatt 1001	<u>342–392</u>
$Al_c^{IV} = Al^{IV} + 0.1(Fe/[Fe + Mg])$	Jowett, 1991	367 (18)

Примечание. В скобках – стандартное отклонение; n – количество анализов, использованных в расчете.

*Note.* The standard deviation is given in parentheses; n - number of analyses used in calculation.

характерна для хлоридной водно-солевой системы NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O. Температура плавления последнего кристаллика льда варьирует от -0.5 до -3.7 °C, что соответствует концентрациям флюида 0.9–6.0 мас. % NaCl-экв. Температуры эвтектики и концентрации флюида для первичных и вторичных включений в кварце близки между собой и сходны с полученными единичными замерами для кальцита.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Минералого-петрографические особенности метасоматитов. Северный и Южный участки Наилинского месторождения сложены сходным набором пород, среди которых преобладают серпентиниты и породы габбродиорит-плагиогранитного комплекса. Оруденение связано с метасоматитами. По серпентинитам развиваются карбонат-тальковые сланцы, переходящие в кварц-карбонатные породы в случае максимального развития метасоматических процессов. Карбонатсодержащие кварцсерицит-альбитовые метасоматиты замещают породы габбродиорит-плагиогранитного комплекса. Наиболее продуктивными являются пиритсодержащие кварц-карбонатные метасоматиты, приуроченные к экзоконтакту кварцевой жилы Толстихи в коленообразном перегибе структуры. Характерная особенность рудоносных метасоматитов - широкое распространение, преимущественно, магнезиальных карбонатов (магнезита, доломита) и увеличение содержания кремнезема в виде кварца, что указывает на их принадлежность к березит-лиственитовой формации (Сазонов, 1998). В зоне ГУГР и других крупных глубинных разломов на Южном Урале известен ряд месторождений, которые относятся к этой формации: Миндяк, Алтын-Таш, Мечниковское, Мурашкина Гора, Борисовские сопки в зоне ГУГР, Ганеевское – в зоне Карагайлинского разлома (Лобанов, Усенко, 1974ф; Сазонов и др., 2001, Знаменский, 2009, Артемьев и др., 2014). Отличие метасоматитов Наилинского месторождения от типичных березитов и лиственитов состоит в незначительном присутствии слюд (серицита и фуксита) и высокой концентрации кислого плагиоклаза в аподиоритовых разностях. Эти особенности свидетельствуют о пониженной активности К и высокой – Na в рудообразующих флюидах. Альбит не является запрещенным минералом для березитов, но его количество чаще невысокое (Сазонов, 1998). Среди южноуральских месторождений, принадлежащих этой формации, альбитсодержащие раз-

Результаты микротермометрии ФВ в минералах рудных жил месторождения Наилинское Table 8

Образец	Мицерал	Тип	N	T °C	T °C	T °C	С,
Образец	минерал	ΦВ	(Т <sub>гом</sub> (Т <sub>пл.льда</sub> ))		1 <sub>эвт,</sub> С	1 <sub>пл. льда</sub> , С	мас. % NaCl-экв.
1864/65.2	/65.2 Кварц		11(2)	231-377	-23.7 до -25.0	-3.7	6.0
		В	44	162–268	-23.3до -28.0	-0.5 до -3.7	0.9–6.0
	Кальцит	П	6	170-377			
	Альбит	В	4	161–185			
1854/153	Кварц	В	41	151-178			
	Альбит	В	4	141–156			
	Кальцит	В	5	173-221			
1851/224.2	1/ popu	П	15 (7)	190–290	-23.4 до -27.6	-0.8 до -3.7	1.4–6.0
	кварц	В	46(9)	140-180	-21.6 до -26.7	-0.8 до -3.2	1.4–5.3
	Альбит	В	8	131-192			
	Кальцит	В	5(1)	154–196	-23.2	-3.4	5.6
1851/224.2	1/ popu	П	10	193-305			
	кварц	В	31	143-181			
	Альбит	В	6	141–163			
	Кальцит	В	5	149–161			

Results of microthermometry of fluid inclusions in minerals of ore veins of the Naily deposit

*Примечание.* Флюидные включения (ФВ): первичные (П), вторичные (В); Т<sub>гом</sub> – температура гомогенизации в жидкую фазу; Т<sub>эвт</sub> – температура эвтектики; Т<sub>пл. льда</sub> – температура плавления последнего кристаллика льда.

*Note.* Fluid inclusions ( $\Phi$ B): primary ( $\Pi$ ), secondary (B);  $T_{rom}$  – homogenization temperature to liquid;  $T_{_{3BT}}$  – eutectic temperature;  $T_{_{\Pi\Pi,\Pi,BZB}}$  – ice melting temperature.



*Puc. 9.* Флюидные включения в кварце (a, б) и кальците (в): a, в – первичные двухфазные; б – вторичные двухфазные. *Fig. 9.* Fluid inclusions in quartz (a, b) and calcite (c): a, в – primary two-phase; б – secondary two-phase.

ности метасоматитов характерны для Ганеевского месторождения, где они образовались по основным вулканитам (Заботина и др., 2014).

Стоит отметить, что тальк-карбонатные изменения серпентинитов проявлены более интенсивно, чем метасоматические изменения в породах диорит-плагиогранитного комплекса. Присутствие магнетита и гематита в околорудных метасоматитах указывает на образование пород в относительно окислительных условиях, незначительное содержание пирита – на незначительное присутствие серы во флюиде (Гаррелс, Крайст, 1968). Рассланцевание и следы хрупких и пластических деформаций метасоматитов свидетельствуют о нестабильной тектонической обстановке во время их образования, что согласуется с их локализацией в зоне ГУГРа.

На Северном участке также встречаются безрудные апогаббровые эпидотовые метасоматиты, а также актинолитовые породы и хлоритолиты, образованные, вероятно, по дайкам основного состава, но без реликтов первичных пород. Сакмарский комплекс древнее салаватского габбродиоритплагиогранитного комплекса (Федосеев, 2011ф), и, вероятно, эпидотизация габбро и развитие акти-

166



*Puc. 10.* Температуры гомогенизации и соленость  $\Phi B$  в минералах Наилинского месторождения. *Fig. 10.* Homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions in minerals of the Naily deposit.

нолита в результате кальциевого метасоматоза без существенного привноса кремнезема и карбоната могут быть связаны с более ранними геологическими событиями и, предположительно, синхронны с серпентинизацией ультрамафитов.

Особенности минералогии руд. Минеральный состав руд Северного и Южного участка отличается незначительно. Главным рудным минералом является пирит, который часто срастается с золотом и содержит его включения. Наиболее мощные зоны с пиритовой вкрапленностью отмечаются на Северном участке, где его количество достигает 2-3 мас. %. По-видимому, это обусловлено большей проницаемостью пород для флюидов в коленообразном перегибе структуры. Сквозными редкими рудными минералами являются халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, самородное золото, гессит, петцит. Минералы Со и Ni, сульфосоли Ag и Bi встречаются на обоих участках, однако конкретная минеральная форма этих элементов может отличаться, только кобальтин является сквозным.

Для руд в апосерпентинитовых метасоматитах характерны собственные минеральные формы Ni и Co (зигенит, полидимит, миллерит, герсдорфит, кобальтин). Единственная находка теллурида Pd также связана с этим типом метасоматитов. В аподиоритовых метасоматитах Co и Ni установлены в виде примеси в пирите. Учитывая значительную степень флюидной проработки серпентинитов и магнезиальный характер карбонатов в метасоматитах, развитых по всем типам первичных пород, распространенность собственных минералов Со и Ni, а также примеси этих элементов в пирите, обусловлены извлечением перечисленных элементов из серпентинитов в ходе метасоматоза.

На основании взаимоотношений между рудными минералами можно выделить следующие стадии их образования. Хромит является реликтовым минералом из ультрамафитов, по которому на стадии серпентинизации развивается магнетит. Реликты хромита сохраняются и в процессе кварцкарбонатного метасоматоза. Магнетит также появляется на стадии кварц-серицит-плагиоклазового метасоматоза по породам габбродиорит-плагиогранитного комплекса. Гематит развивается по магнетиту.

Кварц-карбонатный и кварц-серицитплагиоклазовый метасоматоз сопровождается образованием ассоциации сульфидов: пирита, халькопирита, пирротина, сфалерита, галенита, арсенопирита, кобальтина. Редкие рудные минералы (теллуриды, сульфотеллуриды, золото) образуют включения в пирите и заполняют трещины в нем. Эта ассоциация образуется одновременно с пиритом и отлагается и после основной сульфидной стадии в трещинах в сульфидах. Вероятно, формирование гетита и ассоциирующих с ним киновари, акантита и части золота связано с процессами гипергенеза.

Перечень основных рудных минералов, в целом, типичен для южноуральских золоторудных

Смирницкая А.Д., Рожкова Е.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В., Рассомахин М.А. Smirnitskaya A.D., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Rassomakhin M.A.

месторождений из зоны ГУГР. Главным рудным минералом этих месторождений является пирит, к редким относятся халькопирит, пирротин, сульфиды Ni, галенит, арсенопирит, теллуриды Au-Ag (Belogub et al., 2017). Особенностью Наилинского месторождения является распространение сульфосолей Bi и Ag (айкинит, эмплектит, тетрадимит, сульфосоли систем Pb-Bi-Te (клогаит?), Cu-Ag-Pb-Bi (берриит?) и Ag-Pb-Bi (шапбахит?)). Подобные фазы чаще описываются в связи с рудами скарновой или грейзеновой формаций (Касаткин и др., 2023). Присутствие киновари может быть связано с участием флюидов мантийного (?) происхождения, мигрирующих в зоне глубинного разлома (Методические ..., 2007; Гусев, 2013).

Пробность золота на Наилинском месторождении, как правило, составляет 900–950 ‰ за исключением редких ассоциаций с теллуридами, где пробность снижается до 700 ‰. В целом, для месторождений березит-лиственитовой формации характерно высокопробное золото, однако практически на всех хорошо изученных объектах встречается и более низкопробное, обычно в ассоциации с сульфидами полиметаллов и гесситом (Belogub et al., 2017). Аналогичное распределение пробности золота описано на Ганеевском месторождении (Заботина, 2016).

Золото Наилинского месторождения представлено самородной формой и теллуридами. Самородное золото развито в нерудной массе и на контакте нерудных минералов и пирита, размер золотин достигает 0.5 мм. Также оно образует включения в пирите. Часть золота находится в теллуридной и сульфидной формах, образующих субмикронные полиминеральные включения в пирите и сульфосолях. Размер свободного золота и пирита с включениями теллуридов позволяет извлекать их в гравитационный концентрат, однако дальнейшая переработка концентрата должна учитывать присутствие теллуридов, т. к. для извлечения золота из теллуридов применяют плавку на свинцовом или медном коллекторе. При невозможности плавки теллуровых руд в специальных условиях используют цианирование.

Минералогические особенности руд Наилинского месторождения и в частности вариации пробности золота и присутствие киновари в рудах, указывают на него, как на вероятный источник для россыпей северного отрезка Миасского золото-россыпного района, для которых характерны находки киновари и широкий диапазон пробности золота (Козин и др., 2022, 2023).

Условия образования рудоносных метасома*титов.* Согласно результатам изучения первичных и вторичных ФВ, кварц из рудоносных метасоматитов образовался в широком диапазоне температур от 377 до 190 °С, единичные замеры Т<sub>гом</sub> в кальците попадают примерно в тот же диапазон. Состав растворов соответствовал системе NaCl + KCl с низкой соленостью. В жиле Толстиха ранее описаны двухфазные ФВ сходного солевого состава в кварце, Т<sub>гом</sub> включений которых составляет 159-369 °C, концентрация солей во флюиде в первично-вторичных ФВ лежит в интервале 1.2-13.7 мас. % NaCl-экв (Корекина, Савичев, 2023). Состав флюида и температура образования кварца в рудоносных жилах Наилинского месторождения, в целом, совпадают с таковыми, измеренными для руд южноуральских месторождений березит-лиственитовой формации (Мурзин и др., 2001; Заботина, 2016; Belogub et al., 2017), за исключением месторождения Миндяк, образованного при более высоких температурах ( $T = 340 - 450^{\circ}$ ) (Мурзин и др., 2001). В отличие от описанных в литературе, в кварце Наилинского месторождения отсутствуют трехфазные ФВ с жидкой углекислотой. Температура образования хлорита в околорудных метасоматитах Наилинского месторождения (339-392°С) и максимальная температура гомогенизации ФВ в кварце и кальците (377°С) указывают на то, что формирование жил начиналось синхронно и происходило при сходных температурных условиях с таковыми для околорудных метасоматитов.

### ЛИТЕРАТУРА

Арифулов Ч.Х. (2001ф) Изучение закономерностей размещения и вещественного состава золото-платинометальной рудоносности в Миасском и Непряхинском рудных районах с целью выявления объектов комплексных руд для постановки поисковых и оценочных работ. Москва, ЦНИГРИ, Челябинский филиал «ТФГИ по УФО», № 10375.

Артемьев Д.А., Крайнев Ю.Д., Зайков В.В. (2014) Минералого-геохимические особенности золоторудного месторождения Борисовские жилы (Миасский район, Южный Урал). Металлогения древних и современных океанов-2014. Двадцать лет на передовых рубежах геологии месторождений полезных ископаемых. Миасс, ИМин УрО РАН, 137–142.

Бетехтин А.Г. (1950) Минералогия. М., Госгеолиздат, 957 с.

Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*, 8, 16–28. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л (1968) Растворы, минералы, равновесия. М., Мир, 368 с.

Геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист N-40 (41) (2001). Уфа.

Грознецкий Д.П. (1975ф) Отчет о поисково-разведочных работах на Наилинском и Тыелгинском золоторудных месторождениях, проведенных Миасским прииском в 1971–1974 гг. Миасс, Главзолото.

Гусев А.И. (2013) Типизация ртутного оруденения Алтайского края. У*спехи современного естествознания*, 6, 110–114.

Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. (1979) Термобарогеохимия. М., Недра, 272 с.

Заботина М.В., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Паленова Е.Е., Мартешева А.В., Блинов И.А. (2014) Минералогия руд и особенности вмещающих пород Ганеевского месторождения золоторудной лиственитовой формации (Учалинский район, Республика Башкортостан). Известия Сибирского отделения РАЕН. *Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 3 (46), 16–28.

Заботина М.В. (2016) Минералогия и условия образования Ганеевского месторождения золота (Учалинский рудный район). Дисс. на соиск. степ. канд. геол.мин. наук. Санкт-Петербург, СПбГУ, 135 с.

Знаменский С.Е. (2009) Структурные условия формирования коллизионных месторождений золота восточного склона Южного Урала. Уфа, Гилем, 348 с.

Касаткин А.В., Белогуб Е.В., Кузнецов А.М., Новоселов К.А., Шкода Р., Нестола Ф., Рогов Д.А. (2023) Висмутовые минералы Юго-Коневского и Пороховского месторождений вольфрама (Южный Урал). Минералогия, 9(3), 26–49. https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-3-3

Козин А.К., Степанов С.Ю., Шиловских В.В. (2022) Типоморфные характеристики киновари из россыпей золота Среднего и Северного Урала. Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 113–117.

Козин А.К., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Шиловских В.В., Жданова В.С. (2023) Шлиховые ассоциации минералов золотоносных россыпей Миасской россыпной зоны (Южный Урал) и возможные коренные источники золота. *Геология и геофизика*, 64(9), 1219– 1237. https://doi.org/10.15372/GIG2023114

Корекина М.А., Савичев А.Н. (2023) Условия образования и источники флюидов месторождений безрудного жильного кварца гидротермально-метаморфогенно-метасоматического и гидротермально-метаморфогенного генезиса (Средний и Южный Урал). Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 68(2), 200–217. https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.201

Краснова Н.И., Петров Т.Г. (1997) Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Санкт-Петербург, Невский курьер, 228 с. Лобанов Д. А., Усенко С.П. (1974ф) Отчет о поисковых работах на рудное золото, проведенных золотогорским отрядом в 1972-1973 гг. в пределах Алтынташского рудного поля. Верхняя Пышма.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (2007) Москва, ФГУ ГКЗ, утв. 05.06.2007 г. № 37-р.

Мурзин В.В., Кринов Д.И., Бортников Н.С., Сазонов В.Н. (2001) Стадийность, РТХ-условия образования руд и формы вхождения золота в рудах Миндякского месторождения (Южный Урал) / Ежегодник–2001. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, (148), 166–171.

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

Попова В.И. (2002) Месторождения золота Миасской долины. Металлогения древних и современных океанов-2002. Формирование и освоение месторождений в офиолитовых зонах. Миасс, ИМин УрО РАН, 98–106.

Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М., Мир, т. 1. 560 с.

Сазонов В.Н. (1998) Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов (геодинамические обстановки и РТХ-параметры формирования, прогностическое значение). Екатеринбург, УГГГА, 181 с.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГГА, 622 с.

Сигов А.П. (1948) Золотые месторождения Северо-Миасской группы / 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск, УФАН СССР, 296–304.

Федосеев В.В. (2011ф) Проект на выполнение «Поисковых и оценочных работ на Наилинском участке на рудное золотое». Пласт, ОАО «ЮГК», 128 с.

Федосеев В.В., Рябов Ю.И., Гаджиева Л.А. (2020) Переоценка золоторудных месторождений Челябинской области – основа развития минерально-сырьевой базы АО «ЮГК». Известия ТулГУ. *Науки о Земле*, 4, 547–560.

Belogub E.V., Melekestseva I.Yu., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Yuminov A.M. (2017) Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): A review. *Ore Geology Reviews*, 85, 147–270. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.008

Cathelineau M. (1988) Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*. V. 23. P. 471–485.

Hey M.H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, 30, 277–292. https://doi.org/ 10.1180/minmag.1954.030.224.01

Jowett E.C. (1991) Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. *Geological Association of Canada / TAC / SEG Annual Meeting*. Toronto, Abstract 16, A62.

Kranidiotis P., MacLean W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82, 1898–1911. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898

Смирницкая А.Д., Рожкова Е.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В., Рассомахин М.А. Smirnitskaya A.D., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Rassomakhin M.A.

### REFERENCES

Arifulov Ch.Kh. (2001) Unpublished report on study of patterns of distribution and composition of gold-platinum potential in Miass and Nepryakhino ore regions to identify the complex ore objects for prospecting and evaluation works. Moscow, TsNIGRI, Chelyabinsk branch "TFGI for the Ural Federal District", no. 10375. (in Russian)

Artemyev, D. A. Kraynev Yu. D., Zaikov V. V. (2014) Mineralogical and geochemical features of the Borisovslie zhily gold deposit (Miass region, South Urals). Metallogeniya drevnih i sovremennyh okeanov-2014. Dvadtzat let na peredovyh rubezhah geologii mestorozhdeniy poleznyh iskopaemyh (*Metallogeny of Ancient and Modern Oceans. Twenty Years at the Frontiers of Geology of Mineral Deposits*). Miass, IMin UrO RAN, 137–142. (in Russian)

Belogub E.V., Melekestseva I.Yu., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Yuminov A.M. (2017) Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): A review. *Ore Geology Reviews*, 85, 147– 270. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.008

Betekhtin A.G. (1950) *Mineralogy*. Moscow, Gosgeolizdat, 957 p. (in Russian)

Borisenko A.S. (1977) Study of salinity of fluid inclusions in minerals using cryometry. *Geolofiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 8, 16–28. (in Russian)

Cathelineau M. (1988) Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. Clay Minerals. V. 23. P. 471–485.

Ermakov N.P., Dolgov Yu.A. (1979) *Thermobarogeochemistry*. Moscow, Nedra, 272 p. (in Russian)

Fedoseev V.V. (2011) Project for the implementation of «Prospecting and appraisal work in the Naily area for ore gold». JSC "UGC". Plast, 128 p. (in Russian)

Fedoseev V.V., Ryabov Yu.I., Gadzhieva L.A. (2020) Revaluation of gold deposits of the Chelyabinsk region: the basis for the development of mineral base of AO YuGK. *Izvestiya TulGu. Nauki o Zemle (Proceedings of the Tula State University. Sciences of Earth)*, 4, 547–560. (in Russian)

Garrels R.M., Christ Ch.L (1968) *Solutions, minerals*, equilibria. Moscow, Mir, 368 p. (in Russian)

Geological map of the Russian Federation on a scale of 1:1 000 000, sheet N-40(4) (2001). Ufa.

Groznetsky D.P. (1975) Unpublished report on prospecting and exploration works at the Naily and Tyelga gold ore deposits carried out by Miass group in 1971–1974. Miass, Glavzoloto, (in Russian)

Gusev A.I. (2013) Classification of mercury mineralization of the Altai krai. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya (Advances in current natural sciences), **6**, 110–114. (in Russian)

Hey M.H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, 30, 277–292. https://doi. org/10.1180/minmag.1954.030.224.01 Jowett E.C. (1991) Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. *Geological Association of Canada / TAC / SEG Annual Meeting*. Toronto, Abstract 16, A62.

Kasatkin A.V., Belogub E.V., Kuznetsov A.M., Novoselov K.A., Skoda R., Nestola F., Rogov D.A. (2023) Bismuth minerals from Yugo-Konevo and Porokhovskoe tungsten deposits (South Urals). *Mineralogiya* (*Mineralogy*), **9**(3), 26–49. (in Russian). https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-3-3

Kozin A.K., Stepanov S.Yu., Shilovskikh V.V. (2022) Morphological and chemical features of cinnabar from gold placers of Central and North Urals. Metallogeniya drevnih i sovremennyh okeanov-2022. Ot vestshestvennogo sostava k modelyam i prognosirovaniyu mestorozhdeniy (*Metallogeny* of Ancient and Modern Oceans. From Composition to Models and Forecasting the Deposits). Miass, YuU FNTs MiG UrO RAN, 113–117. (in Russian)

Kozin A.K., Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Shilovskikh V.V., Zhdanova V.S. (2023) Mineral associations of concentrates from gold-bearing placers of the Miass placer zone (South Urals) and possible primary sources of gold. *Russian Geology and Geophysics*, 64(9), 1015–1030. https://doi.org/10.2113/RGG20234543

Korekina M.A., Savichev A.N. (2023) Formation conditions and sources of fluids of deposits of hydrothermalmetamorphic-metasomatic and hydrothermal-metamorphic barren vein quartz (Central and South Urals). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle (Vestnik of St. Petersburg University. Earth Sciences)*, 68(2), 200–217. (in Russian) https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.201

Kranidiotis P., MacLean W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82, 1898– 1911. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898

Krasnova N.I., Petrov T.G. (1997) *Genesis of mineral individuals and aggregates*. St. Petersburg, Nevsky Kur'er, 228 p. (in Russian)

Lobanov D.A., Usenko S.P. (1974) Unpublished report on prospecting works for ore gold conducted by the Zolotogorsk group in 1972–1973 within the Altyn-Tash ore field. Verkhnyaya Pyshma. (in Russian)

Methodic recommendations for the application of the Classification of reserves of the deposits and forecast resources of solid mineral deposits (2007) Moscow, FGU GKZ, approved on 06/05/2007, no. 37-r. (in Russian)

Murzin V.V., Krinov D.I., Bortnikov N.S., Sazo-nov V.N. (2001) Staging, PTX conditions of ore formation and mode of occurrence of gold in ores of the Mindyak deposit (South Urals). In: *Ezhegodnik–2001 (Yearbook–2001)*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 166–171. (in Russian)

Petrovskaya V.N. (1973) *Native gold*. Moscow, Nauka, 348 p. (in Russian)

Popova V.I. (2002) Gold deposits of the Miass valley. Metallogeniya drevnih i sovremennyh okeanov-2002. Formirovanie i osvoenie mestorozhdeniy v ofiolitovyh zonah (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2002. Formation and Exploration of Deposits in Ophiolite Zones). Miass, IMin UrO RAN, 98–106. (in Russian)

Redder E. (1987) *Fluid inclusions in minerals.* Moscow, Mir, vol. 1, 560 p. (in Russian)

Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. (2001) *Gold deposits of the Urals.* Yekaterinburg, UGGGA, 622 p. (in Russian)

Sazonov V.N. (1998) Gold-producing metasomatic formations of mobile belts (geodynamic settings and RTX parameters of formation, prognostic value). Yekaterinburg, UGGGA, 181 p. (in Russian)

Sigov A.P. (1948) *Gold deposits of the North Miass* group In: 200 let zolotoy promyshlennosty Urala (200 years of the gold industry of the Urals). Sverdlovsk. UFAN SSSR, 296–304. (in Russian)

Zabotina M.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Palenova E.E., Martesheva A.V., Blinov I.A. (2014) Ore mineralogy and features of host rocks of Ganeevskoe listvenite gold deposit (Uchaly region, Republic of Bashkortostan). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy (News of the Siberian Branch of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*), **3**(46), 16–28. (in Russian)

Zabotina M.V. (2016) *Mineralogy and conditions of formation of the Ganeevskoye gold deposit (Uchalinsky ore region)* (Candidate dissertation). St. Petersburg, SPbGU, 135 p. (in Russian)

Znamensky S.E., Michurin S.V. (2013) Formation conditions of the Mindyak gold-sulfide deposit (South Urals): structural and isotopic-geochemical issues. *Litosfera (Lithosphere)*, 4, 121–135. (in Russian)

Znamensky S.E. (2009) Structural formation conditions of collision gold deposits of the eastern slope of the South Urals. Ufa, Gilem, 348 p. (in Russian)

### Информация об авторах

Смирницкая Анна Дмитриевна – инженер, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; smirnitskaya@mineralogy.ru

Рожкова Елена Александровна – инженер, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; rozhkova95.lena@yandex.ru

Белогуб Елена Витальевна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; belogub@mineralogy.ru

Новоселов Константин Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; const31@yandex.ru

Заботина Мария Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; mary\_7-88@mail.ru

Рассомахин Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; miha rassomahin@mail.ru

### Information about the authors

Anna D. Smirnitskaya – Engineer, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; smirnitskaya@mineralogy.ru

Elena A. Rozhkova – Engineer, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; rozhkova95.lena@yandex.ru

Elena V. Belogub – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Key Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; belogub@mineralogy.ru

Konstantin A. Novoselov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; const31@yandex.ru

Maria V. Zabotina – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; mary\_7-88@mail.ru

Mikhail A. Rassomakhin – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; miha rassomahin@mail.ru