

Основные этапы рудообразования эпitherмального месторождения золота Светлое (Хабаровский край) на базе изучения вещественного состава метасоматитов и руд

Левочская Д. В.^{1,2}, Якич Т. Ю.¹, Лесняк Д. В.^{1,2}, Рудмин М. А.¹, Рубан А. С.¹, Ерофеев А. Е.¹, Мазуров А. К.¹

¹ Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, Россия; ² Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК», г. Хабаровск, Россия

Аннотация. Исследование пространственно-временных взаимоотношений метасоматитов и руд различных зон эпitherмального Au-Ag месторождения Светлое (Хабаровский край) с помощью традиционного минералого-петрографического подхода позволило установить несколько этапов рудообразования, приуроченных к двум палеовулканическим структурам центрального типа. Ранний этап соответствует умеренно-кислотному IS-типу оруденения, второй этап рудообразования соотносится с кислотно-сульфатным HS-типом.

Золотое оруденение, связанное с ранним этапом рудообразования, представлено двумя главными типами: Au-Ag-Te и Au-Ag. Поздний этап оруденения характеризуется преобладанием переотложенного высокопробного золота, а также наличием других самородных элементов: теллура, селена, серы, висмута.

Ключевые слова: эпitherмальные месторождения золота, теллуриды, парагенетическая последовательность минералообразования, месторождение Светлое, Хабаровский край.

Для цитирования: Левочская Д. В., Якич Т. Ю., Лесняк Д. В., Рудмин М. А., Рубан А. С., Ерофеев А. Е., Мазуров А. К. Основные этапы рудообразования эпitherмального месторождения золота Светлое (Хабаровский край) на базе изучения вещественного состава метасоматитов и руд. Руды и металлы. 2023. № 3. С. 61–86. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10013.

The main stages of ore formation of the Svetloe epithermal gold deposit (Khabarovsk Region) based on the study of the mineral composition of metasomatic rocks and ores

Levochskaya D. V.^{1,2}, Yakich T. Yu.¹, Lesnyak D. V.^{1,2}, Rudmin M. A.¹, Ruban A. S.¹, Erofeev A. E.¹, Mazurov A. K.¹

¹ School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

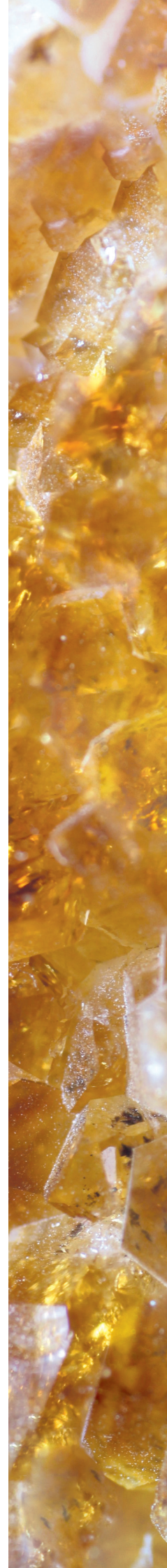
² Khabarovsk branch of Polymetal UK JSC, Khabarovsk, Russia

Annotation. The study of the spatiotemporal relationships of metasomatites and ores of various zones of the epithermal Au-Ag deposit Svetloe (Khabarovsk Region) using a traditional mineralogical and petrographic approach made it possible to establish several stages of ore formation confined to two paleovolcanic structures of the central type. The early stage corresponds to the moderately acidic (IS) type of mineralization, the second stage of ore formation corresponds to the acidic sulfate (HS) type.

Gold mineralization associated with the early stage of ore formation is represented by two main types: Au-Ag-Te and Au-Ag. The late stage of mineralization is characterized by the predominance of redeposited high-grade gold, as well as the presence of other native elements: tellurium, selenium, sulfur, and bismuth.

Keywords: epithermal gold deposits, tellurides, paragenetic sequence of mineral formation, Svetloye deposit, Khabarovsk Region.

For citation: Levochskaya D. V., Yakich T. Yu., Lesnyak D. V., Rudmin M. A., Ruban A. S., Erofeev A. E., Mazurov A. K. The main stages of ore formation of the Svetloe epithermal gold deposit (Khabarovsk Region) based on the study of the mineral composition of metasomatic rocks and ores. Ores and metals, 2023, № 3, pp. 61–86. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10013.





Актуальность настоящего исследования определяется недостаточной изученностью эпипитермальных месторождений золота России, образованных в низкотемпературных условиях ($< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) вблизи палеоповерхности [10–15] и ранее не рассматривавшихся в составе минерально-сырьевой базы золота России из-за незнания технологий извлечения микроного золота из руд подобных объектов.

Методика исследований. Петрографические и минераграфические исследования полированных шлифов и аншлифов выполнялись на микроскопе ZEISS Axio Imager.A2m (аналитик А. С. Рубан). Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) или растровая электронная микроскопия (РЭМ) проводились с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU (TESCAN, Чехия), оснащённого приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором (аналитики Т. Ю. Якич, М. А. Рудмин). Ускоряющее напряжение для СЭМ съёмки и анализа 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4–11,5 нА. Локальный рентгеноспектральный анализ выполнялся с предварительной калибровкой интенсивности зонда (11,4–11,5 нА) по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. Подсчёт формул рудных минералов осуществлялся по методике нормирования на серу и её аналоги – теллур, селен [2].

Геологическое положение месторождения Светлое. Эпипитермальное золоторудное месторождение Светлое локализовано в пределах Ульяновского прогиба, сложенного меловыми образованиями Охотско-Чукотского вулканического пояса, в двух палеовулканических структурах центрального типа (рис. 1). Указанные вулканические постройки разновозрастные: северо-западная, которая вмещает рудную зону Эми, – хетанинского времени (K_2ht); юго-восточная, включающая рудные зоны Елена, Тамара, Людмила и Лариса, – уракского (K_2ur). Хетанинская свита представлена серыми андезитами, андезибазальтами, их агломератовыми лавами, реже туфами тём-

но-серого цвета. Уракская свита несогласно залегает на размытых породах хетанинской свиты. Сложена стекловатыми и кислыми породами риолитового состава, дацитами белых, серовато-сиреневых и кремово-жёлтых игнибригов, а также их различными туфами и туфолавами (см. рис. 1).

Положение самих палеовулканов контролируется узлом сопряжения Дюльбакинско-го разлома северо-восточного простирания с разломами северо-западного простирания. Метасоматический ореол, сопровождающий рудные тела, имеет значительную площадь – более 30 км².

В пределах рассматриваемого объекта широко распространена разрывная тектоника. Выделяются продольные (относительно простирания Охотско-Чукотского вулканического пояса), региональные северо-восточные, крупные поперечные северо-восточные разрывы. Субвулканические интрузии и две палеовулканические постройки с кальдерами проседания тяготеют к их стыкам. В кальдерах палеовулканов и на их склонах встречаются различные метасоматиты. Области с промышленно значимой золотой минерализацией контролируются зонами сочленениями кольцевых разломов и кальдер проседания с разломами северо-западного простирания [1, 3, 6].

Метасоматические преобразования раннего этапа, развитые в пределах зоны Эми. По результатам минералого-петрографических исследований установлено, что в рудной зоне Эми окolorудные изменения вмещающих пород представлены главным образом вторичными кварцитами (монокварциты, пористые и брекчированные кварциты (рис. 2, *a, b*)), в значительно меньшей степени алуниновыми и диккитовыми кварцитами (см. рис. 2, *c, d*) и кварц-серицитовыми метасоматитами (см. рис. 2, *e*). Неизменённых вмещающих пород в пределах зоны Эми не обнаружено, все исходные андезитовые породы и их туфы преобразованы в той или иной степени процессами метасоматической серицитизации, карбонатизации, хлоритизации, пелитизации с сохранением реликтовых очертаний порфиро-



вых вкрапленников, замещённых серицитом или мусковитом (см. рис. 2, *f*) [5]. По данным дешифрирования космоснимков предшествующими [1], в пределах рудной зоны Эми выявлены пропилиты, но нами при исследовании минерального состава метасоматитов они не были изучены.

Детальная петрографическая характеристика метасоматитов рудной зоны Эми. Основная масса монокварцитов сложена аллотриоморфнозернистым, микрозернистым (0,01–0,02 мм) кварцем, среди которого наблюдаются локальные включения более крупных кристаллов кварца (до 1 мм). Использована классификация размерности кристаллов [7]. Порода пронизана множеством разноориентированных взаимно пересекающихся трещин (см. рис. 2, *a*). Последние полностью заполнены кварцем, образуя систему пересекающихся прожилков. Относительно крупные трещины (до 4 мм) локально зияющие, характер заполнения трещин друзовый. Отмечены три генерации кварца: аллотриоморфнозернистый микро- и, реже, мелкозернистый кварц, слагающий основную массу породы; микро- и мелкозернистый укрупнённый кварц, развивающийся по трещинам; мелкозернистый хорошо раскристаллизованный крупный (до 1 мм) мозаичный кварц, заполняющий трещины и каверны, а также образующий в основной массе породы скопления до 2 мм в поперечнике.

Породы отличаются высоким содержанием рудных минералов. В некоторых шлифах содержание пирита достигает 40–50 объёмных процентов прозрачного полированного шлифа. Рудные минералы образуют линейные (см. рис. 2, *a, d*) и гнездовидные скопления (см. рис. 2, *b*), а также могут присутствовать в виде равномерно рассредоточенных в основной массе единичных зёрен.

Пористые монокварциты – наиболее распространённый тип кварцитов по отношению к другим структурно-текстурным разновидностям. Происхождение пор связано с процессами кислотного выщелачивания, характерными для эпитермальных месторождений (*vuggy quartz*). Их минеральный состав аналогичен

массивным монокварцитам. Размер пор от 0,05 до 2 мм (в среднем 0,2 мм), объёмная пористость до 50 % площади шлифа. Пространственных закономерностей в вариациях размерности пор и объёмной пористости не выявлено. Для пор характерны текстуры обрастания, выраженные развитием друз идиоморфного кварца по стенкам порового пространства (см. рис. 2, *a*). Нередко каверны полностью заполнены более крупными (относительно основной массы) агрегатами мозаичного эвгедрального кварца, а также рудными минералами (преимущественно пиритом).

Брекчированные монокварциты представлены монокварцитами, развивающимися по обломочным вулканическим породам. Порой наблюдается друзовидный кварц, обрастающий крупные полости (см. рис. 2, *b*). Основная масса этих пород сложена аллотриоморфнозернистым микрозернистым кварцем (0,01–0,03 мм) с равномерно рассредоточенным пиритом. Кварц с пиритом нарушен наложенными трещинами, что определяется визуально в полевых наблюдениях. Вкрапленность пирита имеет шлировой пятнистый характер. Пирит брекчированный, с ним ассоциируют призматические кристаллы рутила.

Алунитовым кварцитам свойственны трещиновато-прожилковая текстура и вторичная порфириовидная структура (см. рис. 2, *c*). Порода сложена тёмно-коричневым микрокристаллическим кварц-глинистым агрегатом, нарушенным трещинами шириной до 1 мм (см. рис. 2, *c*). Трещины заполнены микрозернистым алунином, представленным длиннопризматическими кристаллами размером не более 0,01 мм.

Диккитовые кварциты сложены микрозернистым кварцем (0,01–0,05 мм) аллотриоморфнозернистой структуры и мелкочешуйчатым диккитом, среди которых часто отмечаются более крупные зёрна микро- и мелкозернистого кварца (до 0,5 мм). Преобладающий минерал – диккит, что установлено по данным рентгенодифракционного анализа и оптическому знаку. Содержание диккита около 15 % площади шлифа. В основной массе выделя-

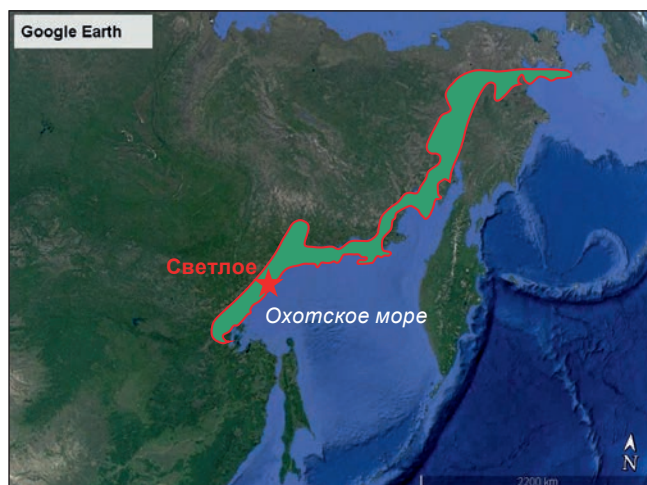
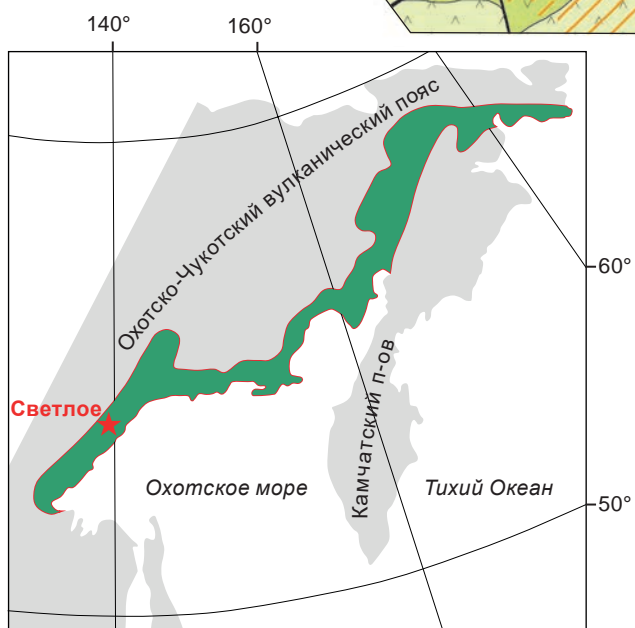
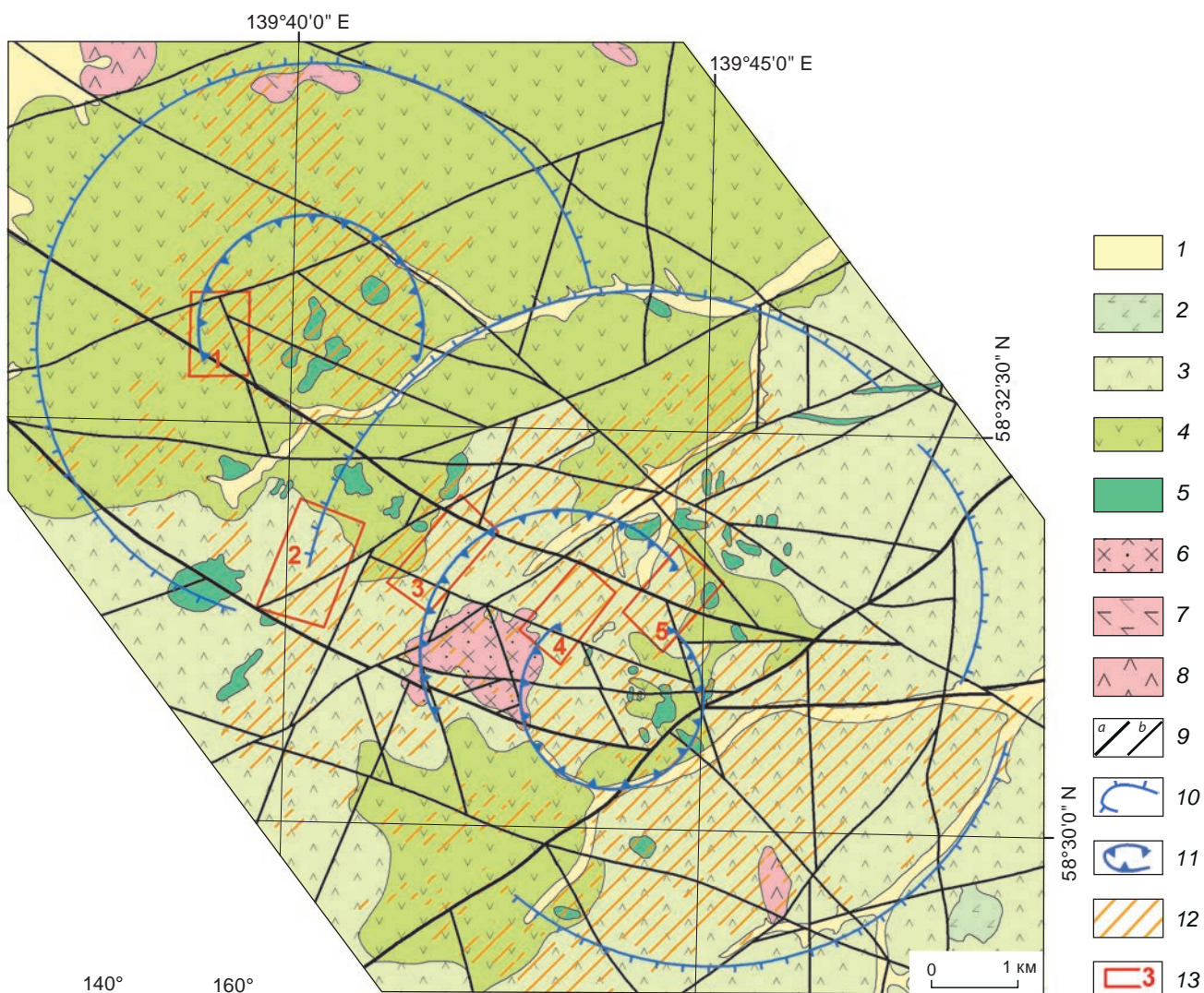




Рис. 1. Схематическая геологическая карта эпитермального Au-Ag месторождения Светлое, составленная на основе материалов Б. А. Новосёлова, ООО «ПД Рус» и [1]:

1 – аллювиальные отложения (Q_4); 2 – андезитовые базальты хакаринской свиты (K_2ht); 3 – лавы, туфы, игнимбриты урацкой свиты (K_2ur); 4 – андезитовые лавы, андезибазальты, андезитовые туфы хетанинской свиты (K_2ht); 5 – штоки и дайки базальтовых андезитов хакаринского базальтового комплекса (K_2hk); урацкий дацит-риолитовый комплекс (K_2ur): 6 – риодациты, 7 – дацитовые штоки и дайки; 8 – гранодиорит-порфировые штоки; 9 – разломы: *a* – региональные, *b* – прочие; 10 – палеовулканические структуры; 11 – структуры проседания; 12 – области распространения вторичных кварцитов и других метасоматитов; 13 – зоны месторождений: 1 – Эми, 2 – Людмила, 3 – Тамара, 4 – Елена, 5 – Лариса

Fig. 1. Schematic geological map of the epithermal Au-Ag deposit Svetloe, compiled on the basis of materials by B. A. Novoselov, PD Rus LLC and [1]:

1 – alluvial deposits (Q_4); 2 – andesitic basalts of the Khakarinsky suite (K_2hk); 3 – lavas, tuffs, ignimbrites of the Urak formation (K_2ur); 4 – andesite lavas, basaltic andesites, andesite tuffs of the Khetanin suite (K_2ht); 5 – stocks and dikes of basaltic andesites of the Khakarinsky basalt complex (K_2hk); Urats dacite-rhyolite complex (K_2ur): 6 – rhyodacites, 7 – dacite stocks and dikes; 8 – granodiorite-porphyrus stocks; 9 – faults: *a* – regional, *b* – other; 10 – paleovolcanic structures; 11 – subsidence structures; 12 – areas of distribution of secondary quartzites and other metasomatites; 13 – ore deposit zones: 1 – Amy, 2 – Lyudmila, 3 – Tamara, 4 – Elena, 5 – Larisa

ются зоны с кристаллами идиоморфного призматического гексагонального габитуса кварца, имеющего зональное строение, размерностью от 0,5–1 мм, с полостями между кристаллами до 2 мм. Кварцевые агрегаты имеют мозаично-блоковое строение. С этими зонами ассоциирует рудная минерализация, представленная преимущественно пиритом, который в отдельных шлифах и пластинах формирует протяжённые зоны (см. рис. 2, *d*).

Гидротермальные *кварц-серицитовые метасоматиты* обнаружены в виде прослоев среди вторичных кварцитов. Основная масса породы сложена аллотриоморфнозернистым, микрозернистым (0,01–0,02 мм) кварцем. В межзерновом пространстве присутствуют глинистые минералы – дикцит, каолинит. Среди кварц-глинистого агрегата выделяются включения веерообразных скоплений кристаллов серицита (см. рис. 2, *e*). В основной массе фиксируются многочисленные каверны диаметром ~ 0,5 мм. По стенкам пор развивается друзовидный идиоморфный кварц (текстуры обрастания) вплоть до полного заполнения пор. Предположительно серицитовые агрегаты заполняют поровое пространство (см. рис. 2, *e*).

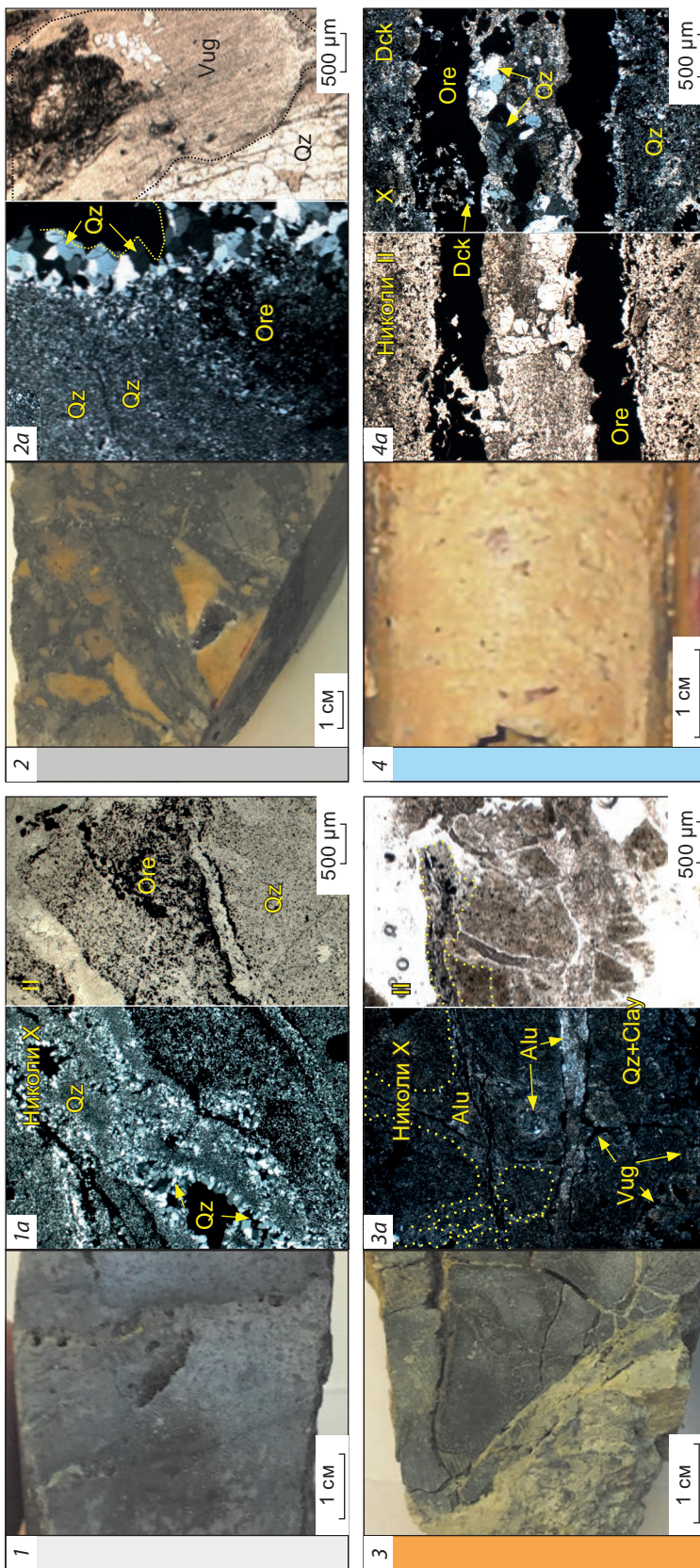
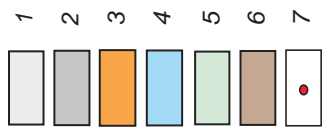
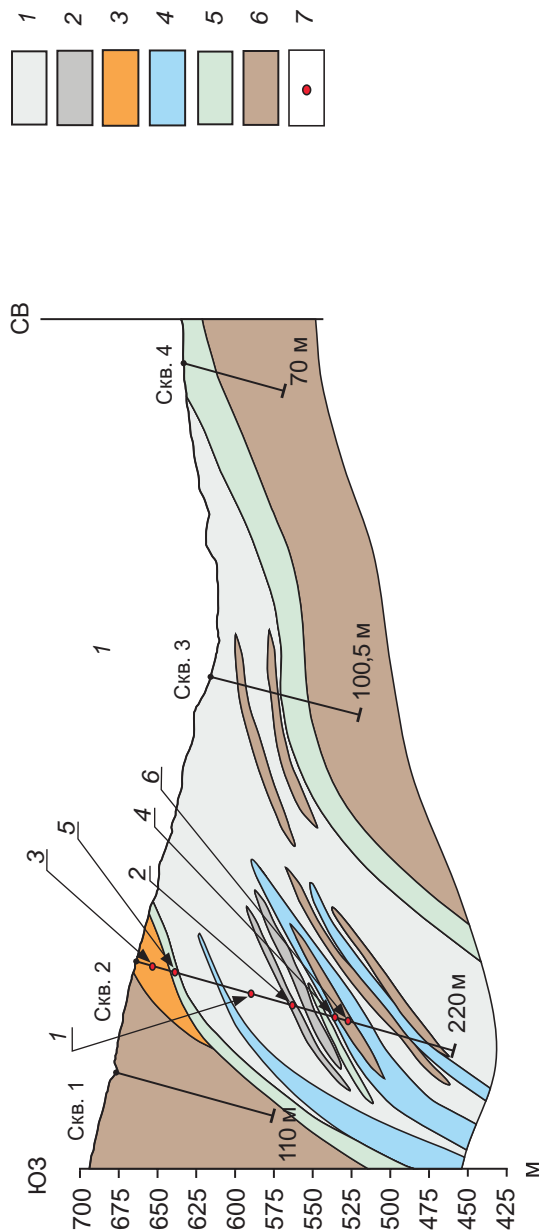
Рудная минерализация отмечается как в прожилках, так и в виде мелкой вкрапленности, равномерно рассредоточенной в основной

массе (см. рис. 2, *e*). Размеры зёрен рудных минералов не превышают 0,02 мм.

Метасоматически изменённые туфы характеризуются литокластической, кристаллокластической, литокристаллокластической текстурами при массивной, пористой, флюидальной и прожилковой текстурах. Среднее содержание минералов изменяется в следующем диапазоне (%): плагиоклаз 15–40, вулканическое стекло 20–70, кальцит 10–40, кварц 5–15, иллит + хлорит + серицит 15–50, рудные минералы < 1–20.

Метасоматически изменённые андезиты обладают преимущественно реликтовой порфировой структурой, прожилковой и трещиноватой текстурой. Нередко их основная масса сложена микрозернистым кварцем, среди которого встречаются обломки полевых шпатов, замещённые серицитом и мусковитом (см. рис. 2, *f*). Обломки угловатые, размером до 1 мм. Отмечается пелитизация полевых шпатов. Трещины открытые, зияющие, шириной 0,5 мм. Рудные минералы образуют линейно вытянутые скопления, тяготеющие к трещинам.

Метасоматические преобразования позднего рудного этапа, развитые в пределах зон Елена, Тамара, Лариса и Людмила. В качестве эталонной зоны, в которой наиболее полно проявились метасоматические преобразо-



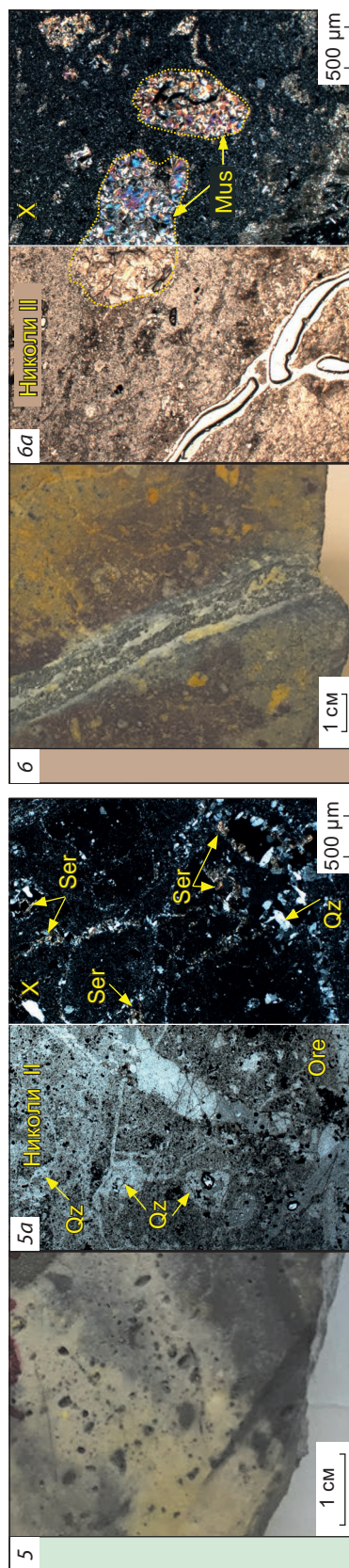


Рис. 2. Схематический геологический разрез и фото шгфных образцов и шлифов основных разновидностей метасоматитов, проявленных в пределах рудной зоны Эми (ранний рудный этап):

1 – монокварциты; 2 – брекчиевые кварциты; 3 – алунитовые кварциты; 4 – диккитовые кварциты; 5 – кварц-серцитовые метасоматиты; 6 – метаандезиты и метатуфы; 7 – точки отбора образцов; 1а – трещинно-пористый монокварцит с текстурами обрастаний друзидным кварцем (Qz) и вкрапленностью рудных минералов (Ore); 2а – брекчированный монокварцит с аллотриоморфнозернистой основной массой микрозернистого кварца с зональными кристаллами эвгдрального кварца (Qz), образующего полости (Vug) и обломки пород, и неравномерно-распределённой рудной вкрапленностью (Ore); 3а – алунитовый кварцит с трещиновато-прожилковым заполнением алунитом (Alu) основной кварц-глинистой (Qz+Clay) массы пористого (Vug) метасоматита; 4а – диккитовый кварцит, сложенный микрозернистым кварцем (Qz) и мелкошешуйчатым диккитом (Dck) с рудными протяжёнными зонами (Ore), ассоциирующими с друзовидным кварцем поздней генерации; 5а – кварц (Qz)-серцитовые (Ser) метасоматиты с отдельными вкрапленными рудными минералами (Ore) и серцит-кварцевыми прожилками; 6а – метаандезиты с реликтовыми вкрапленниками плагиоклазов, полностью замещённых мусковитом (Mus) на фоне изменённой основной массы стекла

Fig. 2. Schematic geological section and photos of ore samples and thin sections of the main varieties of metasomatites manifested within the Emi ore zone (early ore stage):

1 – monoquartzites; 2 – breccia quartzites; 3 – alunite quartzites; 4 – dickite quartzites; 5 – quartz-sericite metasomatites; 6 – metaandesites and metatuffs; 7 – sampling points; 1a – fissure-porous monoquartzite with overgrown textures of drusy quartz (Qz) and dissemination of ore minerals (Ore); 2a – brecciated monoquartzite with an allotriomorphic grained groundmass of microgranular quartz with zoned crystals of euhedral quartz (Qz), overgrowing cavities (Vug) and rock fragments, and unevenly distributed ore dissemination (Ore); 3a – alunite quartzite with fractured-veined filling with alunite (Alu) of the main quartz-clayey (Qz+Clay) mass of porous (Vug) metasomatite; 4a – dickite quartzite composed of microgranular quartz (Qz) and fine-flaky dickite (Dck) with extended ore zones (Ore) associated with late-generation drusy quartz; 5a – quartz (Qz)-sericite (Ser) metasomatites with individual phenocrysts of ore minerals (Ore) and sericite-quartz veinlets; 6a – metaandesites with relict phenocrysts of plagioclase, completely replaced by muscovite (Mus) on the background of an altered groundmass of glass



вания позднего этапа, выбрана зона Елена, расположенная в центральной части палеовулканической постройки уракского времени (см. рис. 1).

Проведённый нами анализ каменного материала показал, что околорудные изменения вмещающих пород представлены главным образом вторичными кварцитами (монокварциты и брекчированные кварциты (рис. 3, *a–c*)), алуниновыми (см. рис. 3, *d*) и диккитовыми (см. рис. 3, *g*) кварцитами, а также их окисленными (см. рис. 3, *a*) и переходными (см. рис. 3, *e, f*) разновидностями. Монокварцитовые тела обрамляются алуниновыми кварцитами, при этом на локальных участках прослеживается переход от монокварцитов к диккитовым, алунит-диккитовым и алуниновым кварцитам (в вертикальном разрезе).

Внутри алуниновой залежи наблюдается зональное распределение алунита в микрозернистом кварцевом базисе. Это выражается в постепенном увеличении содержания алунита от периферии (20–25 %) к осевой части залежи (до 50 %). Увеличение содержания алунита сопровождается уменьшением размеров кристаллов и их более равномерным распределением в основной массе породы – в периферийных частях алунит представлен порфиробластовыми включениями длиннопризматических кристаллов размером до 1 мм (см. рис. 3, *d*), в осевой – тонкозернистым агрегатом. В алуниновых кварцитах также отмечаются прослои монокварцитов и алунит-диккитовых кварцитов.

Детальная петрографическая характеристика метасоматитов позднего этапа. Монокварциты сложены аллотриоморфнозернистым микрозернистым кварцем (0,01–0,05 мм), среди которого выделяются более крупные зёрна, как единичные, так и в виде изометрических и линейных скоплений микро- и мелкозернистого мозаичного кварца (до 1 мм). При окислении в межзерновом пространстве основной массы обильно развиваются гидроксиды железа (см. рис. 3, *a*). В пределах рудной зоны Елена по наличию минералов гипергенной стадии – лимонита, ярозита, микасаита, дидохита, церуссита, бурнонита – диагности-

руется зона окисления общей мощностью до 80 м (см. рис. 3).

В породах развита рудная минерализация, в некоторых образцах содержание рудных минералов, главным образом пирита, достигает 10–15 %. Породы часто трещиноватые. Ширина трещин – 10 мм. Их стенки обрастают идиоморфным кварцем, образуя крустификационную текстуру. Часто встречаются относительно мощные зияющие трещины (> 0,5 мм).

Брекчированные разновидности сложены аллотриоморфнозернистым кварцем, который развивается по первичным обломкам размером в поперечнике до 3 мм (см. рис. 3, *c*). Межобломочное пространство заполняется сцементированным кремнисто-глинистым агрегатом, образующим полосы и вытянутые зоны. Среди основной массы фиксируются многочисленные каверны и пустоты размером от 0,05 до 1,5 мм.

В зависимости от форм нахождения алунита в пределах участка Елена выделяются два типа *алуниновых кварцитов*. Для первого характерно присутствие алунита в виде скоплений крупных (до 1 мм по удлинению) кристаллов, часто порфириовидных, находящихся среди основной микрозернистой кварцевой массы, а также заполняющих каверны и трещины (см. рис. 3, *d*). Второй тип алунита представлен микрозернистыми (до 0,05 мм) удлинёнными кристаллами, равномерно распределёнными среди кварца и образующими скопления. Для этого типа характерно максимальное содержание алунита (до 50 %).

Равномернозернистый кварц в основной массе встречается редко. Алунит присутствует в трёх генерациях: микро- и мелкозернистые (0,01–0,05 мм) кристаллы вытянутой призматической формы, равномерно рассредоточенные среди кварца в основной массе и (или) образующие мономинеральные скопления; микро- и мелкозернистые кристаллы вытянутой призматической и таблитчатой форм, заполняющие каверны и трещины (вплоть до мономинеральных прожилков мощностью до 0,5 мм); порфиробластовые включения длиннопризматических кристаллов алунита (см. рис. 3, *d*). Породы содержат реликты кристалло-



кластов (полевые шпаты, роговая обманка) таблитчатой и вытянутой призматической форм. При окислении в реликтах отмечаются гидроксиды железа.

К прожилковому кварцу приурочена густая вкрапленность зёрен рудных минералов, а также их гнёзда, прожилки, просечки; в основной массе рудные минералы образуют единичные зёрна, а также гнездовидные скопления.

Иллит-хлоритовые метасоматиты характеризуются значительным замещением кристаллокластической структуры исходных пород, что устанавливается по наличию единичных реликтовых зёрен плагиоклаза. Основная масса представлена аллотриоморфнозернистым, микрокристаллическим кварцем. Местами в основной массе прослеживаются микрокристаллы (лейсты) плагиоклазов. Изменения исходных минералов связаны с появлением иллита и хлорита (см. рис. 3, е). Основная масса имеет многочисленные поры и трещины.

Алунит-диккитовые кварциты являются переходными породами между алунитовыми и диккитовыми разностями.

Диккитовые кварциты обрамляют залежи монакварцитов, а также образуют в них линзы. Диккит присутствует в двух разновидностях: микрозернистые чешуйчатые кристаллы (0,02–0,04 мм), равномерно распределённые среди кварца в основной массе и (или) образующие мономинеральные скопления (предположительно более ранняя генерация); микро- и мелкозернистые чешуйчатые и таблитчатые кристаллы (до 0,2 мм), заполняющие поровое пространство и значительно реже трещины (см. рис. 3, г). Диккит этой разновидности наиболее отчётливо проявляется в приконтактных зонах с алунитовыми кварцитами и монакварцитами (см. рис. 3, разрез).

Парагенетическая последовательность минералообразования раннего этапа, проявленного в пределах зоны Эми. Гидротермально-рудный процесс раннего рудного этапа характеризуется пятью стадиями (дорудная, ранняя сульфатно-сульфидная, рудная 1, рудная 2, гипергенная), формирующими различные минеральные комплексы: рутил-серицит-кварцевый, пирит-диккит-алунит-кварцевый, полиметаллическо-пирит-кварцевый,

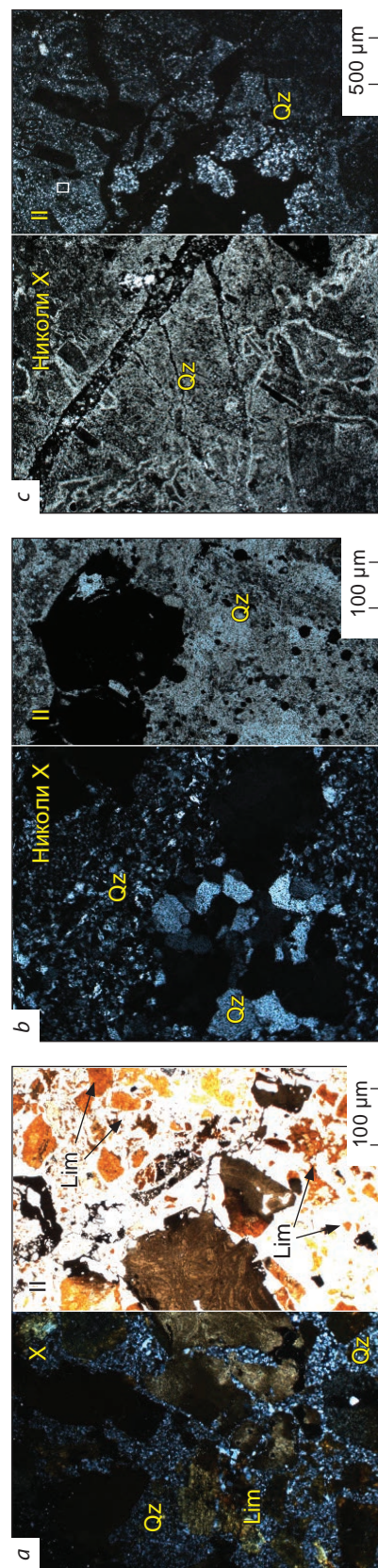
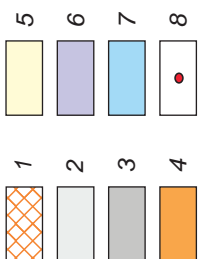
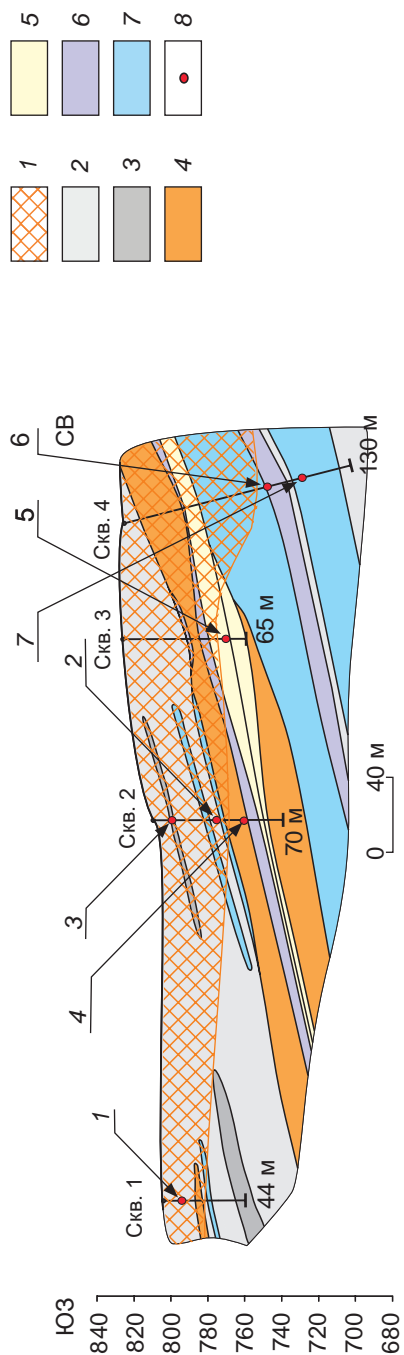
теллуридный с золотом и серебром, гипергенный с переотложенным золотом (табл. 1).

Рутил-серицит-кварцевый комплекс – наиболее ранний (*дорудная стадия*). Кварц (I) разнозернистый с преимущественно мозаичной текстурой, среди которого формируются мелкокристаллические (не более 10 мкм) скопления игольчатого рутила. Рутил (I) местами замещает исходные силикаты, кристаллизуясь по их межплоскостным дефектам или спайности. Серицит как результат замещения исходных слюд (мусковит, биотит) образует отдельные мелкочешуйчатые скопления. Также в эту стадию формируется пиррофиллит, в менее глубинных условиях переходящий в иллит или иллит-сметтит.

В раннюю *сульфатно-сульфидную стадию* образовался пирит-диккит-алунит-кварцевый комплекс со следующими проявлениями минералов: кварц (II), алунит, диккит, пирит (I), иллит, каолинит, кальцит, рутил (II). Кварц (II) характеризуется преимущественно микро- и мелкозернистой структурой с крустификационно-прожилковой текстурой. При активности кислых флюидов формируется алунит-диккитовая ассоциация. Пирит (I) преимущественно мелкозернистый. Рутил (II) отличается от предыдущей стадии соизмеримым с пиритом (I) размером зёрен (рис. 4, а).

Стадия *рудная 1* (см. табл. 1) завершилась формированием полиметаллическо-пирит-кварцевого комплекса. Основным жильным минералом стадии является кварц, рудным – пирит. Пирит (II) характеризуется неправильным, изометрическим, кубическим габитусом кристаллов размерностью ~ 0,05–0,5 мм, местами он катаклазирован, разбит трещинами и выщелочен, в порах выщелачивания заполнен доломитом и кварцем (см. рис. 4, а, б), а также содержит сингенетичные мелкие (до 10 мкм) включения галенита и сфалерита с примесью меди (см. рис. 4, а), по трещинам катаклаза замещается блёклыми рудами (II) следующего теллуридного этапа (см. рис. 4, б). По сравнению с пиритом более ранней генерации пирит (II) имеет более крупный размер кристаллов (см. рис. 4, а, б).

Стадия *рудная 2* способствовала образованию теллуридного комплекса с золотом и се-



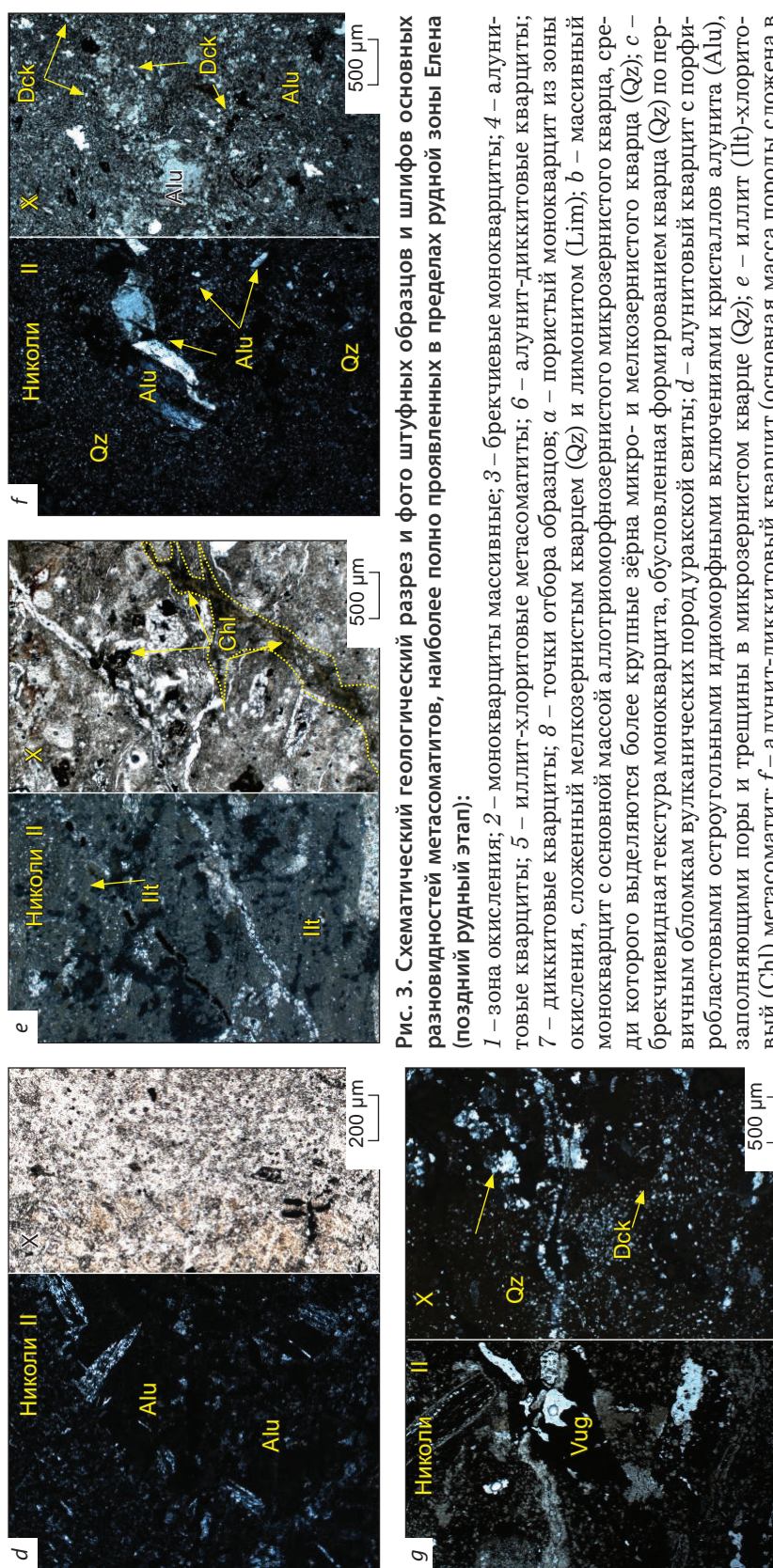


Рис. 3. Схематический геологический разрез и фото штучных образцов и шлифов основных разновидностей метасоматитов, наиболее полно проявленных в пределах рудной зоны Елена (поздний рудный этап):

1 – зона окисления; 2 – монокварциты массивные; 3 – брекчиевые монокварциты; 4 – алунитовые кварциты; 5 – иллит-хлоритовые метасоматиты; 6 – алунит-диккитовые кварциты; 7 – диккитовые кварциты; 8 – точки отбора образцов; а – пористый монокварцит из зоны окисления, сложенный мелкозернистым кварцем (Qz) и лимонитом (Lim); б – массивный монокварцит с основной массой аллотриоморфнозернистого микрозернистого кварца, среди которого выделяются более крупные зёрна микро- и мелкозернистого кварца (Qz); в – брекчиевидная текстура монокварцита, обусловленная формированием кварца (Qz) по порфировым обломкам вулканических пород уражской свиты; д – алунитовый кварцит с порфири-образными остроугольными идиоморфными включениями кристаллов алунита (Alu), заполняющими поры и трещины в микрозернистом кварце (Qz); е – иллит (Illt)-хлоритовый (Chl) метасоматит; ф – алунит-диккитовый кварцит (основная масса породы сложена в равных долях аллотриоморфнозернистым микрозернистым кварцем (Qz), пластинчатými кристаллами диккита (Dck) и идиоморфными кристаллами алунита (Alu) длиннопризматической формы); г – диккитовые кварциты, представленные несколькими генерациями аллотриоморфнозернистого и микрокристаллического кварца (Qz), а также чешуйчатыми агрегатами диккита (Dck) поздней генерации, заполняющего трещины и поры породы

Fig. 3. Schematic geological section and photos of massive samples and thin sections of metasomatic rocks, most fully manifested within the Elena ore zone (late ore stage):

1 – oxidation zone; 2 – massive monoquartzites; 3 – breccia monoquartzites; 4 – alunite-quartzites; 5 – illite-chlorite metasomatites; 6 – alunite-dickite quartzites; 7 – dickite quartzites; 8 – sampling points; а – porous monoquartzite from the oxidation zone, composed of fine-grained quartz (Qz) and limonite (Lim); б – massive monoquartzite with the bulk of allotriomorphic-grained microgranular quartz, among which larger grains of micro- and fine-grained quartz (Qz) stand out; в – breccia-like texture of monoquartzite, caused by the formation of quartz (Qz) on primary fragments of volcanic rocks of the Uraj formation; д – alunite-quartzite with porphyroblastic acute-angled euhedral inclusions of alunite crystals (Alu) filling pores and cracks in microgranular quartz (Qz); е – illite (Illt)-chlorite (Chl) metasomatite; ф – alunite-dickite quartzite. The bulk of the rock is composed in equal parts of allotriomorphic microgranular quartz (Qz), plate-like dickite crystals (Dck) and euhedral alunite crystals (Alu) of long-prismatic shape; г – dickite quartzites, represented by several generations of quartz (Qz) allotriomorphic granular and microcrystalline, as well as scaly aggregates of dickite (Dck) of the late generation, filling cracks and pores of the rock



Табл. 1. Парагенетическая схема минералообразования в рудах и метасоматитах рудной зоны Эми

Table 1. Paragenetic scheme of mineral formation in ores and metasomatites of the Amy ore zone

Стадии	Дорудная	Ранняя сульфатно- сульфидная	Рудная 1	Рудная 2	Пострудная гипергенная
Минеральные комплексы	Рутил- серицит- кварцевый	Пирит-диккит- алунит- кварцевый	Полиметаллическо- пирит-кварцевый	Теллуридный с золотом и серебром	Гипергенный с переотложен- ным золотом
1	2	3	4	5	6
Пирит		(I)	(II)	(III)	
Галенит			_____		
Сфалерит			_____		
Ковеллин					_____
Арсенопирит				_____	
Халькопирит			(I)	(II)	
Ютенбога- ардтит				_____	
Теннантит- тетраэдрит			(I)	(II)	
Голдфилдит				_____	
Эмплектит				_____	
Хемусит				_____	
Калаверит				_____	
Сильванит				_____	
Мутманнит				_____	
Петцит				_____	
Гессит				_____	
Штютцит				_____	
Колорадоит				_____	
Мелонит				_____	
Алтаит				_____	
Теллуран- тимон				_____	
Теллуру- висмутит				_____	
Кавацулит				_____	
Самородное Au			(I a)	(I b)	(II)
Самородный Te				_____	
Кварц	(I)	(II)	(III)	(IV)	
Алунит		_____			
Рутил	(I)	(II)			
Барит		_____	_____		
Доломит				_____	



Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Англезит					=====
Целестин					=====
Микасаит					=====
Смешанные фосфаты и сульфаты Sb и Te				=====	=====
Диксит			=====		
Каолинит			=====		
Серицит	=====				
Пирофиллит					
Иллит		=====			
Сепиолит					=====

Примечание.

=====	> 50 %
=====	50–25 %
=====	25–5 %
=====	5–1 %
=====	< 1 %
-----	растворение

Пирит ($\text{Fe}_{0,87-1,13}\text{Cu}_{0,0-0,12}\text{As}_{0,0-0,02}\text{Sb}_{0,0-0,06}\text{Te}_{0,006-0,03}\text{S}$)($\text{S}, \text{Se}_{0,0-0,01}$)₂

Галенит ($\text{Pb}_{0,89-1,12}\text{Fe}_{0,0-0,14}$)S

Сфалерит ($\text{Zn}_{0,74-1,0}\text{Fe}_{0,01-0,11}\text{Cu}_{0,01}\text{Na}_{0,19}$)S

Ковеллин ($\text{Cu}_{0,81-0,88}\text{Fe}_{0,03-0,13}$)S

Арсенопирит $\text{Fe}_{1,09-1,26}\text{As}_{0,77-0,78}\text{S}$

Халькопирит ($\text{Cu}_{0,68-1,09}\text{Fe}_{0,66-1,19}$)S₂

Ютенбогаардтит ($\text{Ag}_{3,42-3,61}\text{Au}_{0,67-0,74}\text{Fe}_{0,16-0,29}$)S₂Te_{0,07-0,12}

Теннантит-тетраэдрит ($\text{Cu}_{2,93-11,99}\text{Fe}_{0,0-6,44}\text{Zn}_{0-1,74}\text{Ag}_{0,0-0,36}$)($\text{Sb}_{0,0-3,88}\text{As}_{0,0-4,0}\text{Bi}_{0,0-0,51}\text{Te}_{0,0-2,68}$)S₁₃

Голдфилдит ($\text{Cu}_{9,93-12,0}\text{Fe}_{0,0-1,74}\text{Ag}_{0-0,36}$)($\text{Te}_{1,41-2,68}\text{Sb}_{0,0-2,54}\text{Bi}_{0,0-0,28}\text{As}_{0,0-1,28}$)S₁₃

Эмплектит ($\text{Cu}_{0,42-0,45}\text{Fe}_{0,40-0,46}$)($\text{Bi}_{0,69-0,65}\text{Ag}_{0,07-0,09}$)($\text{S}_{1,96}\text{Se}_{0,04}$)

Хемусит ($\text{Cu}_{5,46-6,27}\text{Fe}_{0,0-0,33}$)Sn_{0,75-1,07}($\text{Mo}_{0,93-1,32}\text{Sb}_{0,0-0,27}$)S₈

Калаверит $\text{Au}_{0,71-0,91}\text{Ag}_{0,0-0,19}\text{Fe}_{0,0-0,19}\text{Cu}_{0,0-0,15}\text{Te}_2$

Сильванит ($\text{Au}_{0,86-1,67}\text{Ag}_{0,4-2,31}\text{Fe}_{0,06-0,39}\text{Mo}_{0,2-0,77}\text{Ta}_{0,04-0,08}\text{Te}_4$)

Мутманнит $\text{Au}_{0,55}\text{Ag}_{1,26}\text{Fe}_{0,18}\text{Mo}_{0,05}\text{Te}_2$

Петцит $\text{Ag}_{2,93-3,4}\text{Au}_{0,93-0,97}\text{Fe}_{0,17-0,44}\text{Te}_2$

Гессит $\text{Ag}_{1,71}\text{Au}_{0,1}\text{Te}$

Штютцит $\text{Ag}_{4,43-5,14}\text{Au}_{0,06-0,07}\text{Fe}_{0,6}\text{Bi}_{0,15}\text{Te}_3$

Колорадоит $\text{Hg}_{0,77-0,94}\text{Te}$

Мелонит $\text{Ni}_{0,92-1,00}\text{Te}_2$

Алтаит $\text{Pb}_{0,90}\text{Te}$

Теллурантимон $\text{Sb}_{1,65-2,2}\text{Bi}_{0,15-0,7}\text{Te}_3$

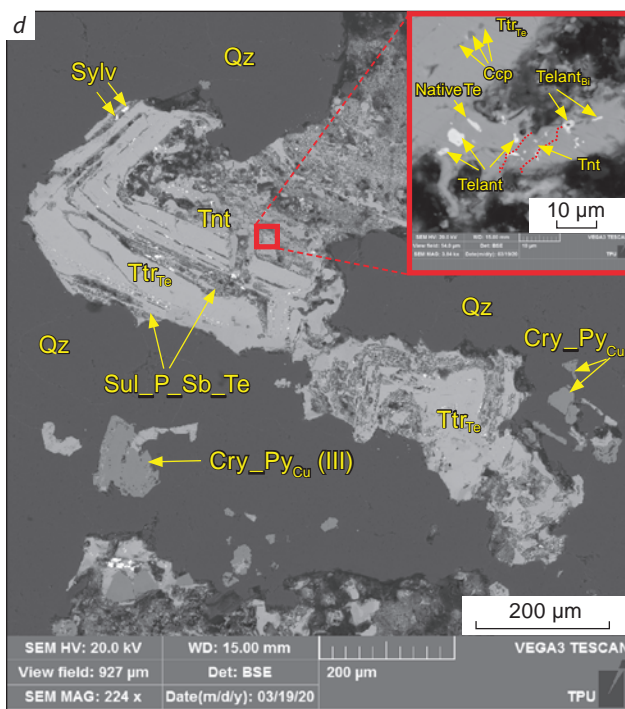
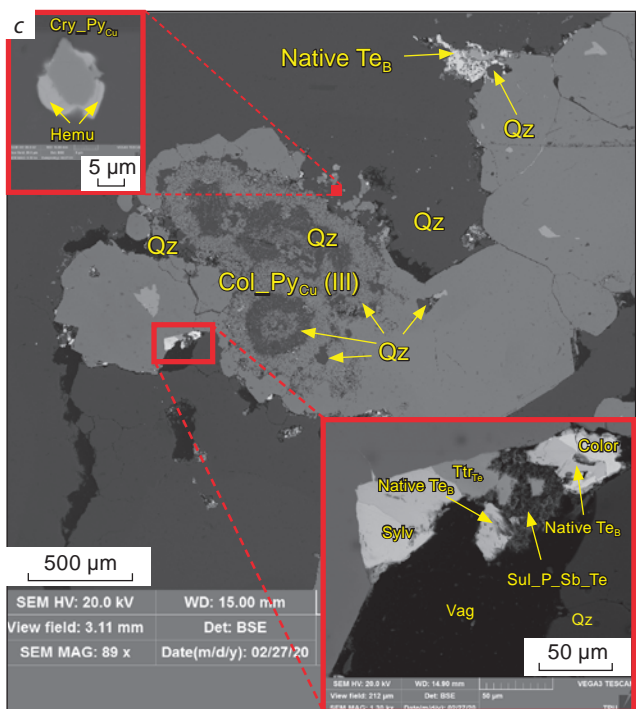
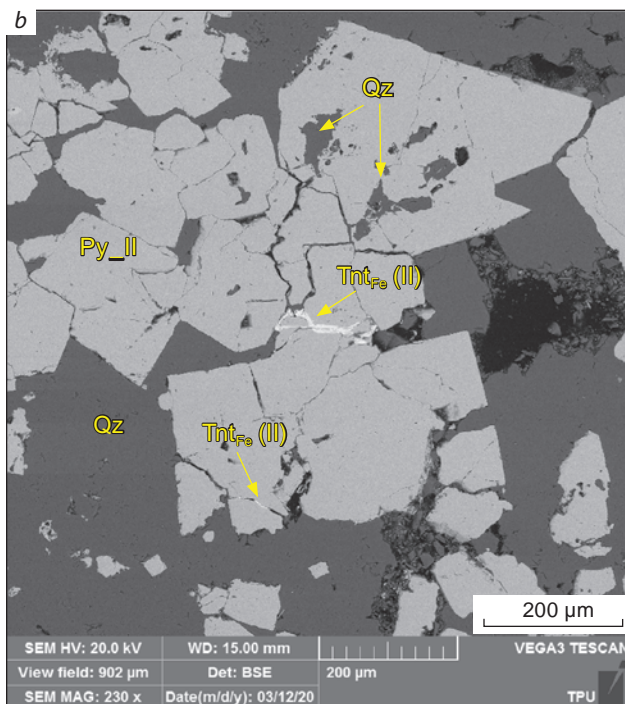
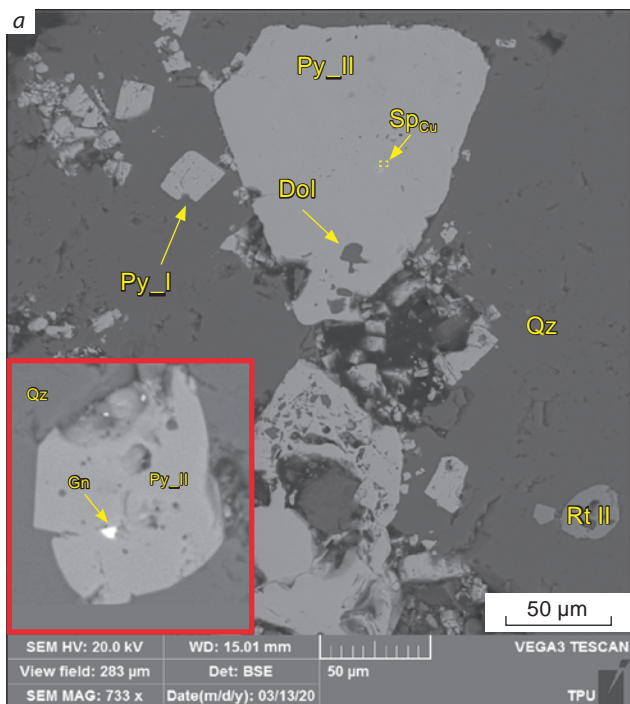
Теллурувисмутит $\text{Bi}_{1,82-1,93}\text{Te}_3$

Кавацулит $\text{Bi}_{2,65-3,08}\text{Te}_{2,88-3,3}\text{Se}$

ребром. Основной жильный минерал – кварц, рудные – пирит, блёклые руды, халькопирит. Пирит представлен двумя морфологическими разновидностями: колломорфной и кристаллической. Колломорфный пирит слагает центральные части совместных выделений с кристаллическим пиритом (см. рис. 4, с), поэтому,

несмотря на различные проявления структурного строения, они отнесены к одной стадии, соответствующей III генерации пирита.

Химизм – ещё один признак объединяющий различные морфологические разновидности пирита теллуридной ассоциации. Обе разновидности содержат примесь Cu и в мень-



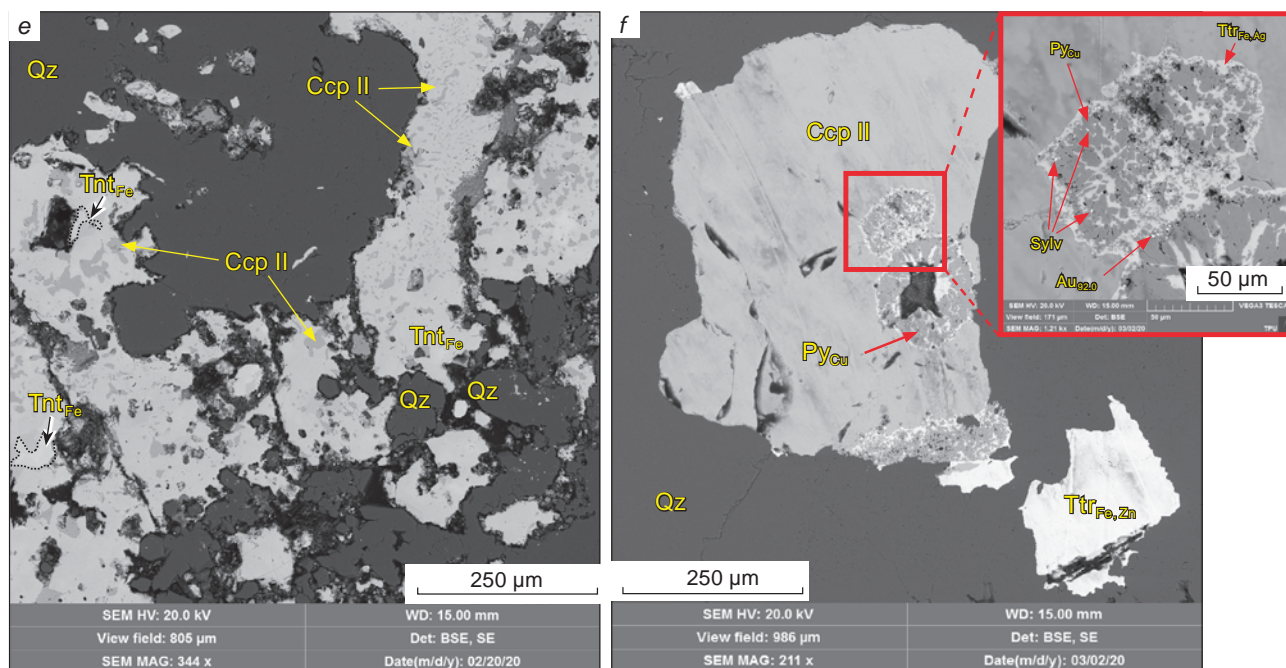


Рис. 4. Основные минеральные комплексы, проявленные в пределах раннего рудного этапа (зона Эми):

a – кристаллы пирита (II) (Py_{II}), содержащие сингенетические включения сфалерита с примесью Cu (Sp_{Cu}) и эпигенетические включения доломита (Dol), заполняющие пустоты выщелачивания. Сингенетичный кристалл галенита в пирите (II); *b* – катакластический пирит (II), заполняющийся по трещинам железосодержащим теннантитом (Tnt_{Fe}) и кварцем (Qz); *c* – коломорфный агрегат пирита (III) ($Col_{Py_{Cu}}$ (III)), обрастающий кристаллическим ($Cry_{Py_{Cu}}$ (III)) в ассоциации с хемуситом (Hemu), сильванитом (Sylv), самородным теллуридом с примесью В ($Native\ Te_B$), тетраэдритом с примесью Fe (Ttr_{Fe}) и колорадоитом (Color); *d* – зерно блёклой руды (тетраэдрит с примесью Te (Tnt_{Te})-теннантит (Tnt)), содержит включения халькопирита (Ccp) и теллурантимонита (Telant), в ассоциации с пиритом (III). Смешанные сульфосфосфаты Sb и Te (?) ($Sul_P_Sb_Te$) с сильванитом (Sylv), приуроченным к трещинам блёклой руды; *e* – эмульсионные включения халькопирита (Ccp) и тетраэдрита (Ttr_{Fe}) в матрице теннантита (Tnt_{Fe}); *f* – включения коломорфного медьсодержащего пирита (Py_{Cu} (III)) с тетраэдритом ($Ttr_{Fe,Ag}$), межзерновое пространство которого заполнено сильванитом (Sylv) и самородным золотом ($Au_{92,0}$) в зерне халькопирита

Fig. 4. The main mineral complexes manifested within the early ore stage (Emi zone):

a – crystals of pyrite (II) (Py_{II}) containing syngenetic inclusions of sphalerite with an admixture of Cu (Sp_{Cu}) and epigenetic inclusions of dolomite (Dol) filling the voids of leaching. Syngenetic galena crystal in pyrite II; *b* – cataclastic pyrite (II), filled by cracks with iron-containing tennantite (Tnt_{Fe}) and quartz (Qz); *c* – colomorphous pyrite III aggregate ($Col_{Py_{Cu}}$ (III)), overgrown with crystalline one ($Cry_{Py_{Cu}}$ (III)) in association with hemusite (Hemu), sylvanite (Sylv), native tellurium with an admixture of B ($Native\ Te_B$), tetrahedrite with an admixture of Fe (Ttr_{Fe}) and coloradoite (Color); *d* – a grain of fahlore (tetrahedrite with an admixture of Te (Tnt_{Te})-tennantite (Tnt)), contains inclusions of chalcopyrite (Ccp) and tellurantimonite (Telant), in association with pyrite III. Mixed sulphosphates Sb and Te (?) ($Sul_P_Sb_Te$) with sylvanite (Sylv) confined to the cracks of fahlore; *e* – emulsion inclusions of chalcopyrite (Ccp) and tetrahedrite (Ttr_{Fe}) in the matrix of tennantite (Tnt_{Fe}); *f* – inclusions of colomorphous copper-containing pyrite (Py_{Cu} (III)) with tetrahedrite ($Ttr_{Fe,Ag}$), the intergranular space of which is filled with sylvanite (Sylv) and native gold ($Au_{92,0}$) in a chalcopyrite grain



шей степени Sb, Te, Se. Кристаллический пирит (III) характеризуется разнообразным габитусом кристаллов (призматическим, тетраэдрическим, пентагондодекаэдрическим и др.), отличным от кубической формы более ранней генерации. Пирит (III) находится в тесной парагенетической связи с блёклыми рудами (II), хемуситом ($\text{Cu}_{5,46-6,27}\text{Fe}_{0,0-0,33}\text{Sn}_{0,75-1,07}(\text{Mo}_{0,93-1,32}\text{Sb}_{0,0-0,27})\text{S}_8$, кавацилитом $\text{Bi}_{2,65-3,08}\text{Te}_{2,88-3,3}\text{Se}$, с которым он обнаруживает индукционные поверхности роста (см. рис. 4, с). Блёклые руды (II) имеют разнообразный химический состав, отражающий вертикальную зональность оруденения участка Эми [17]. Халькопирит (II) в отличие от ранней генерации полиметаллического минерального комплекса, где он ассоциирует с кубическим пиритом и повсеместно замещается ковеллином, находится в тесной парагенетической связи с блёклыми рудами (II), в которых образует эмульсионные включения (см. рис. 4, е), и пиритом (III), содержащим примесь меди (см. рис. 4, ф). Помимо этого, халькопирит (II) образует совместные ассоциации с наиболее ранними теллуридами никеля – мелонитом $\text{Ni}_{0,92-1,00}\text{Te}_2$, свинца – алтаитом $\text{Pb}_{0,90}\text{Te}$, висмута – теллуrowисмутитом $\text{Bi}_{1,82-1,93}\text{Te}_3$, сурьмы и висмута – теллурантимоном $\text{Sb}_{1,65-2,2}\text{Bi}_{0,15-0,7}\text{Te}_3$, золота и серебра – сильванитом ($\text{Au}_{0,86-1,67}\text{Ag}_{0,4-2,31}\text{Fe}_{0,06-0,39}\text{Mo}_{0,2-0,77}\text{Ta}_{0,04-0,08}\text{Te}_4$) (см. рис. 4, г, табл. 2).

Сульфид серебра и золота ютенбогаардтит ($\text{Ag}_{3,42-3,61}\text{Au}_{0,67-0,74}\text{Fe}_{0,16-0,29}\text{S}_2\text{Te}_{0,07-0,12}$) образуется по аргентотетраэдриту ($\text{Ag}_{8,65}\text{Fe}_{1,83}\text{Cu}_{1,28}\text{Zn}_{0,62}$) ($\text{Sb}_{2,35}\text{As}_{1,59}\text{S}_{13}$) и находится в совместной минеральной ассоциации теллуридов серебра и золота с петцитом ($\text{Ag}_{2,93-3,4}\text{Au}_{0,93-0,97}\text{Fe}_{0,17-0,44}\text{Te}_2$), гесситом ($\text{Ag}_{1,71}\text{Au}_{0,1}\text{Te}$), штютцитом ($\text{Ag}_{4,43-5,14}\text{Au}_{0,06-0,07}\text{Fe}_{0,6}\text{Bi}_{0,15}\text{Te}_3$). Теллурид золота и серебра сильванит – наиболее распространённый золотосодержащий теллурид этого участка, он приурочен главным образом к наиболее ослабленным зонам, обогащённым теллуrom исходных теллуросодержащих блёклых руд и голдфилдита ($\text{Cu}_{9,93-12,0}\text{Fe}_{0,0-1,74}\text{Ag}_{0,0-0,36}(\text{Te}_{1,41-2,68}\text{Sb}_{0,0-2,54}\text{Bi}_{0,0-0,28}\text{As}_{0,0-1,28})\text{S}_{13}$, где он находится в совместной ассоциации с самородным теллуrom, колорадоитом $\text{Hg}_{0,77-0,94}\text{Te}$ и сульфософатами сурьмы и теллура.

Теллуриды золота и серебра калаверит и креннерит ($\text{Au}_{0,71-0,91}\text{Ag}_{0,0-0,19}\text{Fe}_{0,0-0,19}\text{Cu}_{0,0-0,15}\text{Te}_2$), а также мутманнит ($\text{Au}_{0,55}\text{Ag}_{1,26}\text{Fe}_{0,18}\text{Mo}_{0,05}\text{Te}_2$) распространены на большей глубине, нежели штютцит, петцит и ютенбогаардтит, отражая вертикальную зональность оруденения [4], и цементируют кристаллический медьсодержащий пирит (III) пентагондодекаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов.

Самородное золото встречается в виде мелких кристаллов размером в первые микрометры в ассоциации с медьсодержащим пиритом (III) и блёклыми рудами (II) (см. рис. 4, ф). Мелкие (до 10 мкм) кристаллы арсенипирита ($\text{Fe}_{1,09-1,26}\text{As}_{0,77-0,78}\text{S}$) ромбовидного сечения обнаружены на глубине 8,8 м в ассоциации с кристаллическим пиритом (III), содержащим примесь меди. На этой же глубине установлен эмплектит ($\text{Cu}_{0,42-0,45}\text{Fe}_{0,40-0,46}(\text{Bi}_{0,69-0,65}\text{Ag}_{0,07-0,09})\text{S}_{1,96}\text{Se}_{0,04}$). Он представлен мелкими кристаллами и встречается в виде захваченного включения в пирите, содержащем примесь Cu, размерностью не более 5 мкм. Диагностирован по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

К гипергенной стадии (см. табл. 1) относится формирование комплекса низкотемпературных гипергенных минералов. В результате процессов гипергенеза происходит перетолжение теллуридов золота в самородную форму, а также образование таких минералов, как ковеллин, микасаит, сепиолит за счёт замещения более ранних минералов.

Парагенетическая последовательность минералообразования позднего этапа ураковского времени, проявленного в пределах зон Елена, Людмила, Тамара и Лариса. Гидротермально-рудный процесс в зонах Елена, Лариса, Людмила и Тамара протекал в четыре стадии (табл. 3), формируя следующие минеральные комплексы (зоны): пирит-рутил-кварцевый, пирит-диккит-алунит-кварцевый (пирит-кальцит-хлорит-иллит-кварцевый), пирит-кварцевый с единичными полиметаллическими сульфидами и золотом, гипергенный.

Пирит-рутил-кварцевый комплекс – наиболее ранний при гидротермальном процессе (*дорудная стадия*), проявлен во всех зонах.



Кварц (I) разнозернистый с преимущественно мозаичной текстурой, среди него формируются мелкокристаллические (не более 10 мкм) скопления игольчатого рутила. Рутил образует решётчатую структуру замещения в кварце на месте исходных силикатов. Нередко в этой ассоциации встречается пирит (I) (рис. 5, *a, b*), по зернистости соответствующий рутилу. В пирите (I) макропримесей не отмечается.

В раннюю сульфатно-сульфидную стадию сформировался пирит-диккит-алунит-кварцевый комплекс со следующими проявлениями минералов: кварц (II), алунит, диккит, пирит (II), иллит, хлорит, барит, каолинит, кальцит, сванбергит, вудхаузеит. Кварц (II) характеризуется преимущественно микро- и мелкозернистой структурой с крустификационно-прожилковой текстурой (см. рис. 5, *b*). При активности кислых флюидов формируется диккит-алунитовая ассоциация (см. рис. 5, *b*). На определённом расстоянии от зоны кислотного выщелачивания, по периферии при повышении pH флюидов в условиях рудной зоны Лариса развивается пирит-кальцит-хлорит-иллит-кварцевая ассоциация (см. рис. 5, *c*).

В рудную стадию сформировался пирит-кварцевый минеральный комплекс с единичными полиметаллическими сульфидами, золотом и другими редкими самородными элементами. В качестве редких вкраплений образуются: золото, галенит, сфалерит, пирротин, халькопирит, киноварь, антимонит, блёклые руды (теннантит-тетраэдрит). Кварц (III) в рудную стадию имеет подчинённое значение и отличается преимущественно колломорфными текстурами. Несмотря на редкую сульфидную минерализацию, в данном комплексе основную роль играет золото, большой объём которого осаждался именно в эту стадию. Минерализация крайне убогая и имеет микроскопическую размерность. Чаше остальных встречаются самородное золото, галенит, сфалерит, халькопирит, киноварь (см. рис. 5, *d*). Пирит (III) характеризуется убогой вкрапленностью и микрозернистостью (см. рис. 5, *d*). В ходе дальнейшей активности растворов происходит растворение и замещение первичных сульфидов (галенита бурнонитом), формиру-

ются иодаргирит, акантит, самородные сера, селен, теллур, висмут. Золото рудной стадии отличается отдельной вкрапленностью с размерностью не более 2,9 мкм. Данная генерация самородного золота характеризуется следующим составом (%): Au (66,1–97,8), Ag (2,2–10,1), Cu в единичных случаях до 24,6, Hg до 15,5. В завершении рудной стадии сформировались низкотемпературные формы серебра (акантит) в ассоциации с редкими формами теллуридов, которые впоследствии окислились с образованием гидроксидов железа и ярозита. Самородные формы серы, селена, теллура (и их вариации), висмута осаждались как конечные фазы гидротермального флюида.

Заключительной стадией минералообразования является *гипергенная*, в результате которой формируются минеральный комплекс низкотемпературных сульфатных фаз (ярозит, микасаит, гидроксиды с переотложенным высокопробным золотом (см. рис. 5, *e, f*), продукты изменения первичных сульфидов (англезит, церуссит, микасаит, диадахит)). Золото (II) агрегируется в неправильные формы среди пористого пространства кварцитов. Размер таких агрегатов изменяется от долей микрометра до 34,6 мкм. Доля Ag варьирует в пределах 3,2–8,4 %, иногда отмечаются примеси Se 2,4–2,6 %, Te 1,1 %.

Заключение. Главной отличительной особенностью раннего рудного этапа является активное участие в процессах рудообразования теллура и в меньшей степени селена, что отразилось в проявлении обильной теллуридной минерализации, представленной собственными минералами теллура – мелонитом, алтаитом, теллуантимоном, теллурвисмутином, кавацулитом и др., обогащении блёклых руд теллуrom вплоть до образования собственной разновидности – голдфилдита, обогащении теллуrom пирита, халькопирита, сфалерита и наличии Au-Ag-Te типа оруденения [4, 8].

Месторождения, обогащённые теллуrom, могут рассматриваться как продукты гидротермальных растворов, связанных с магматической активностью в условиях субдукции, т. е. в качестве источника теллура рассматривается океаническая кора [7]. На территории

Табл. 2. Состав отдельных рудных минералов по данным энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа

Table 2. Composition of individual ore minerals according to energy dispersive X-ray spectral analysis

Номера проб	S	Fe	Cu	Sn	Sb	Mo	Bi	Te	Se	Au	Ag	Ta	As	Sb	Сумма, вес. %	Минерал
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
95_1	29,91	0,82	42,59	11,51	2,24	12,94	-	-	-	-	-	-	-	-	100,01	Хемусит
95_1	29,96	0,75	43,45	10,82	2,22	12,77	-	-	-	-	-	-	-	-	99,97	Хемусит
96_2	29,87	-	40,5	14,83	-	12,97	-	-	-	-	-	-	-	-	99,74	Хемусит
98	30,19	0,49	40,85	11,56	2,26	12,81	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00	Хемусит
98	29,01	-	43,88	10,29	2,47	14,35	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00	Хемусит
106	30,05	1,1	42,55	14,23	-	12,07	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00	Хемусит
96_2	-	-	-	-	-	-	54,49	36,06	7,76	-	-	-	-	-	98,31	Кавацулит
96_2	-	-	-	-	-	3,88	53,67	34,26	6,58	-	-	-	-	-	98,39	Кавацулит
95_1	-	-	-	-	-	-	-	59,2	-	26,75	12,83	-	-	-	98,78	Сильванит
95_1	-	-	-	-	-	-	-	61,54	-	23,77	13,19	-	-	-	98,5	Сильванит
95_1	-	-	-	-	-	-	-	61,59	-	22,57	13,41	-	-	-	97,57	Сильванит
95_1	-	-	-	-	-	-	-	62,37	-	23,62	13,42	-	-	-	99,41	Сильванит
95_2	-	0,67	-	-	-	-	-	61,61	-	24,41	13,32	-	-	-	99,34	Сильванит
96_2	-	-	-	-	-	-	-	61,81	-	24,47	12,51	-	-	-	98,79	Сильванит
96	-	-	-	-	-	-	-	62,63	-	24,23	13,14	-	-	-	100,00	Сильванит
96	-	-	-	-	-	-	-	62,4	-	23,99	13,62	-	-	-	100,01	Сильванит
98	-	-	-	-	-	-	-	63,49	-	21,86	12,67	-	-	-	98,02	Сильванит
106	-	-	-	-	-	-	-	60,66	-	24,48	13,02	-	-	-	98,16	Сильванит



Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
93_1	10,15	1,08	-	-	-	-	-	1,33	-	23,19	61,72	-	-	-	97,47	Югенбогаардит
93_1	10,81	1,06	-	-	-	-	-	2,48	-	22,91	62,32	1,1	-	-	99,58	Югенбогаардит
93_1	26,81	6,07	36,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,24	21,34	96,51	Аргентогетраэдрит
95	26,22	6,54	39,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,4	16,62	97,15	Аргентогетраэдрит
100p	25,95	6,73	37,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,29	19,87	96,17	Аргентогетраэдрит
93_1	-	1,98	-	-	-	-	-	32,8	-	24,15	41,92	-	-	-	100,85	Петцит
93_1	-	3,01	-	-	-	-	-	31,03	-	23,24	40,08	-	-	-	97,36	Петцит
93_1	-	0,89	-	-	-	0,92	-	34,00	-	9,48	51,94	-	-	-	97,23	Гессит
93_1	-	-	-	-	-	-	-	32,58	-	2,39	47,19	-	-	-	97,59	Гессит
126	-	-	-	-	-	-	1,61	34,67	-	11,54	51,83	-	-	-	99,65	Гессит
93_1	-	0,89	-	-	-	0,92	-	34	-	9,48	51,94	-	-	-	97,23	Штюцит
93_1	2,16	3,63	-	-	-	-	-	40,2	-	1,32	52,33	-	-	-	99,64	Штюцит
126	-	-	-	-	-	-	1,61	34,67	-	11,54	51,83	-	-	-	99,65	Штюцит
93_1	-	-	-	-	-	-	-	32,58	-	2,39	47,19	-	-	-	97,59	Штюцит
95_1	26,88	-	45,62	-	5,16	-	-	19,3	-	-	-	-	3,03	-	99,99	Голдфиллит
98	25,81	1,84	43,21	-	4,92	-	-	19,03	-	-	0,45	-	2,01	-	100,00	Голдфиллит
98p	27,29	1,19	43,98	-	7,47	-	-	18,5	-	-	-	-	3,51	-	98,28	Голдфиллит
208	29,39	-	47,74	-	7,57	-	-	15,3	-	-	-	-	-	-	100,00	Голдфиллит
126	-	-	-	-	-	-	-	57,49	-	39,13	3,38	-	-	-	100,00	Калаверит
126	-	-	-	-	-	-	-	57,46	-	37,99	3,26	1,28	-	-	99,99	Калаверит
126	-	-	-	-	-	-	-	56,71	-	38,5	3,34	-	-	-	98,55	Калаверит



Табл. 3. Парагенетическая последовательность минералообразования в рудах и метасоматитах зон Елена, Людмила, Тамара и Лариса

Table 3. Paragenetic sequence of mineral formation in ores and metasomatites of the Elena, Lyudmila, Tamara and Larisa zones

Стадии	Дорудная	Ранняя сульфатно-сульфидная	Рудная	Гипергенная
Минеральные комплексы	Пирит-рутил-кварцевый	Пирит-диккит-алунит-кварцевый / пирит-кальцит-хлорит-иллит-кварцевый	Пирит-кварцевый с единичными полиметаллическими сульфидами и золотом	Гипергенный с переотложенным золотом
1	2	3	4	5
Пирит	(I)	(II а) (II б)	(III а) (III в)	
Галенит			—	
Сфалерит			—	
Ковеллин				—
Пирротин			—	
Киноварь			—	
Антимонит			—	
Акантит				—
Халькопирит			—	
Теннантит-тетраэдрит			—	
Бурнонит				—
Иодаргирит				—
Самородное Au			—	—
Самородная S				—
Самородный Se				—
Самородный Te				—
Селен-теллур				—
Теллур-селен				—
Самородный Bi				—
Кварц	(I)	(II)	(III)	
Рутил	(I)			
Алунит		—		
Натроалунит или минамиит		—		



Окончание табл. 3

Ярозит				██████████
Барит		██████████		
Англезит				—
Микасаит				—
Сванбергит		—————		
Вудхаузеит		—————		
Диадохит				—
Кальцит, доломит		—————		
Церуссит				—
Диккит		██████████		
Каолинит		██████████		
Хлорит		██████████		
Иллит		██████████		

Примечание.

- ██████████ > 50 %
- ██████████ 50–25 %
- ██████████ 25–5 %
- ██████████ 5–1 %
- < 1 %
- растворение

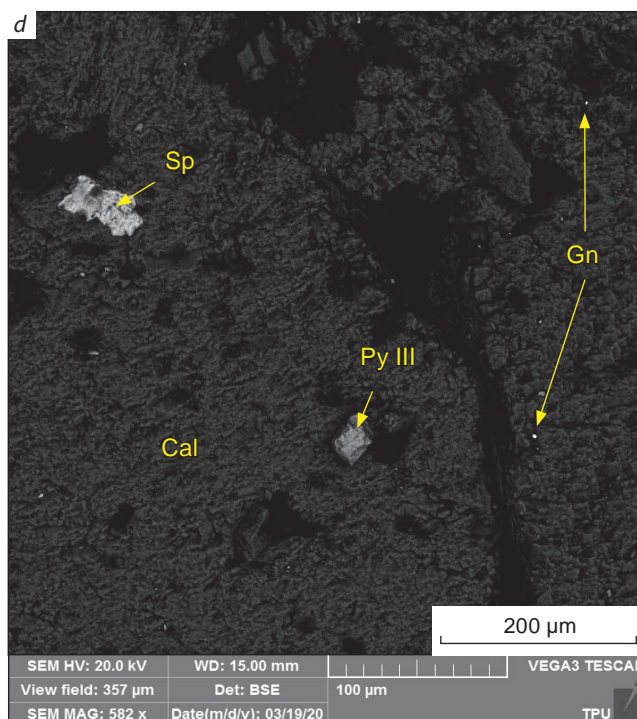
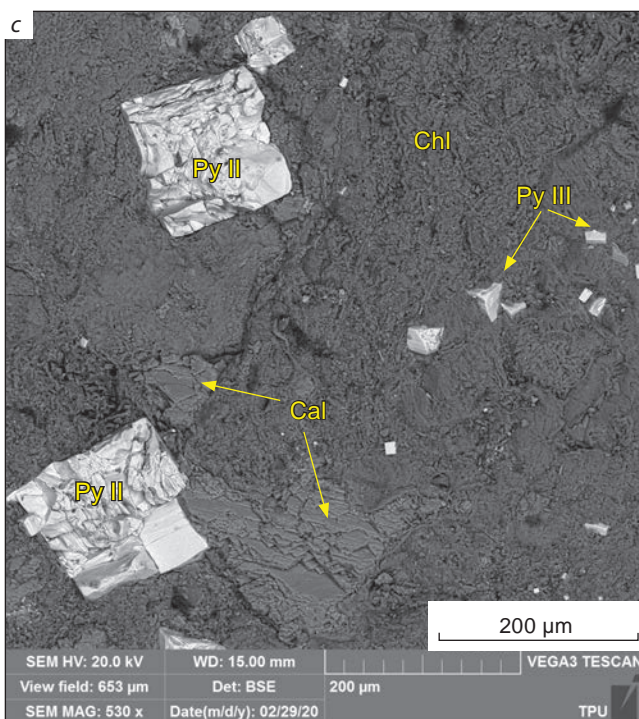
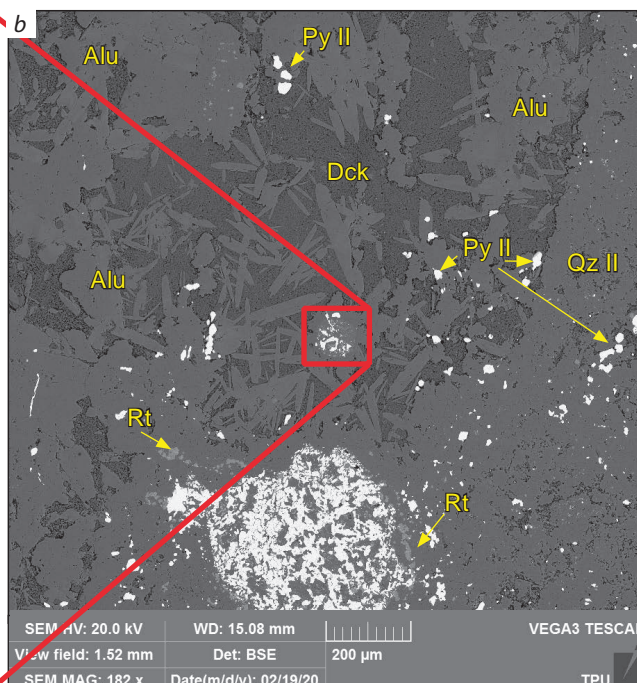
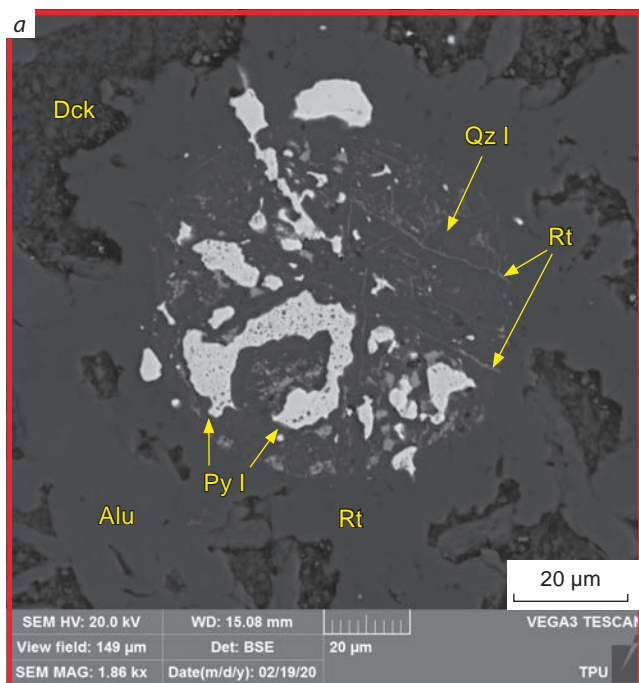
Бурнонит $Pb_{0,83-0,96}(Cu_{0,90-1,09}, Fe_{0,0-0,91})(Sb_{0,64-0,98}, As_{0,0-0,41})S_3$
 Иодаргирит $Ag_{1,03}(I, B_{0,83})$
 Селен-теллур $Se_{0,84-0,85}Te_{0,15-0,16}$
 Теллур-селен $Te_{0,80}Se_{0,21}$

России в пределах Тихоокеанского кольца и за его пределами достаточно объектов, обогащённых в той или иной степени как теллуром, так и селеном. Они могут быть продуктом кислых (HS-тип), нейтральных (IS-тип) и щелочных растворов LS-типа (месторождение Бараньевское) [9]. Типичные примеры эпитермальной золото-теллуридной минерализации за пределами России – месторождения Император, Поргера (Папуа – Новая Гвинея) и Au-Ag теллуридный пояс Монтаны [10], месторождение Крипл-Крик (Колорадо) [13].

В поздний этап, проявленный в пределах уракской свиты в рудовмещающих зонах Елена, Людмила, Тамара и Лариса, в большей степени сформировалась минерализация полиметаллического комплекса; широко развита зона окисления гипергенной стадии с переротложенным высокопробным золотом. Различия минерализации раннего и позднего этапов необходимо учитывать при разработке

технологических схем извлечения золота: для руд позднего этапа успешно применяется классическая схема цианидного выщелачивания, тогда как для переработки руд раннего этапа стандартную технологическую схему необходимо пересмотреть.

На основе полученных данных по вещественному составу жильных минералов (кварц, серицит, иллит) и гипогенных сульфидов (сфалерит, галенит, блёклые руды, халькопирит), а также присутствию самородного теллура и обилию теллуридов при отсутствии энаргита, фаматинита, люционита, борнита, гипогенного ковеллина, типичных для HS-типа, можно сделать вывод о том, что ранний рудный этап, проявившийся в пределах зоны Эми, по составу отвечает эпитермальным месторождениям, образованным при участии нейтральных растворов IS-типа [16]. Возможно, HS-тип мог быть эродирован, как это наблюдается в отдельных месторождениях HS-IS промежу-



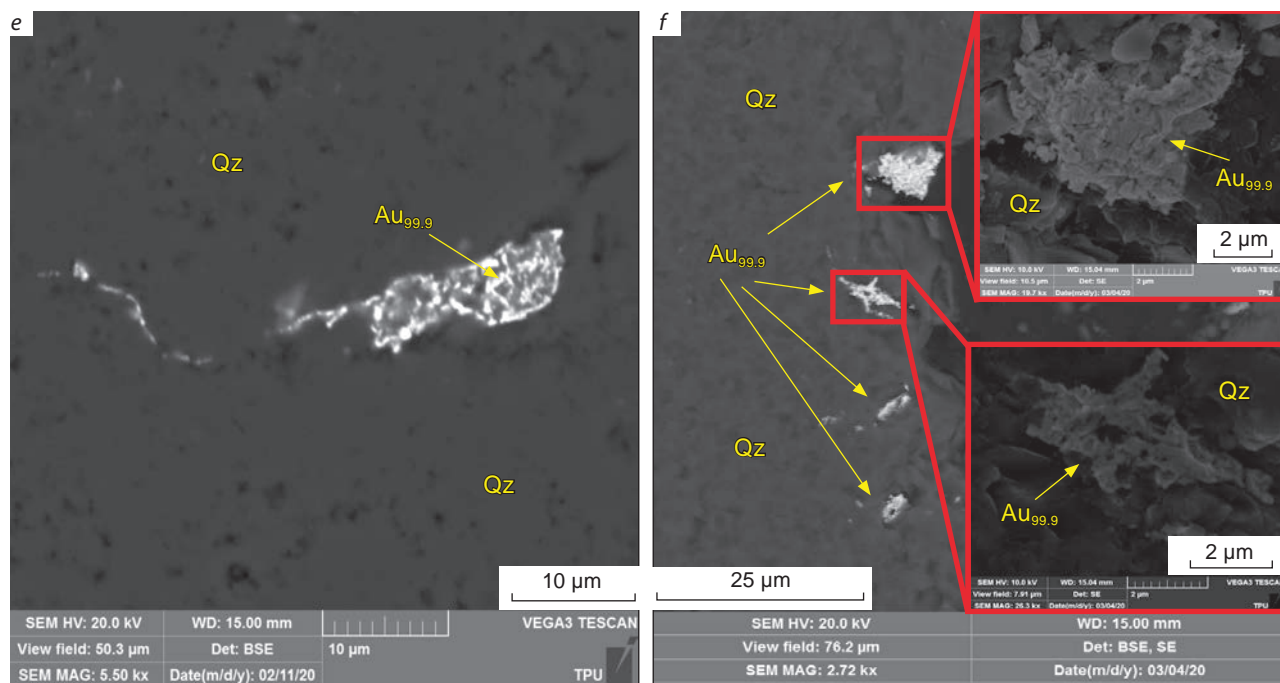


Рис. 5. Основные минеральные комплексы, проявленные в пределах позднего рудного этапа (зоны Елена, Лариса, Тамара, Людмила):

a – кварц-рутил-пиритовый комплекс, представленный кристаллами неправильной и выщелоченной формы пирита (Py I) в ассоциации с игольчатым рутилом (Rt) и ранним кварцем (Qz I); *b* – кварц-алунит-диккит-пиритовый комплекс, сложенный удлиненными кристаллами алунита (Alu) и тонкоочешуйчатыми агрегатами диккита (Dck) в ассоциации с кристаллами пирита (Py II) и кварца (Q II) (зона Елена, глубина 53,6 м); *c* – кварц-иллит-хлорит-кальцит-пиритовый комплекс, представленный кубическими кристаллами пирита (Py III), расположенными в агрегате хлорита с зёрнами кальцита (зона Лариса, глубина 92,8 м); *d* – кварц-пиритовый минеральный комплекс с редкими полиметаллическими сульфидами, представленными единичными зёрнами сфалерита (Sp), галенита (Gn) и пирита (Py III) (зона Лариса, глубина 122 м); *e, f* – гипергенный комплекс с производным золотом ($Au_{99,0-97,0}$) залегает в кавернах кварца (Qz) (зона Елена, глубина 18,3 м)

Fig. 5. The main mineral complexes manifested within the late ore stage (Elena, Larisa, Tamara, Lyudmila zones):

a – quartz-rutile-pyrite complex, represented by crystals of irregular and leached pyrite (Py I) in association with acicular rutile (Rt) and early quartz (Qz I); *b* – quartz-alunite-dickite-pyrite complex, composed of elongated alunite crystals (Alu) and fine-scaled dickite aggregates (Dck) in association with pyrite (Py II) and quartz (Q II) (Elena zone, depth 53.6 m); *c* – quartz-illite-chlorite-calcite-pyrite complex, represented by cubic crystals of pyrite (Py III), located in a chlorite aggregate with calcite grains (Larisa zone, depth 92.8 m); *d* – quartz-pyrite mineral complex with rare polymetallic sulfides, represented by single grains of sphalerite (Sp), galena (Gn) and pyrite (Py III) (Larisa zone, depth 122 m); *e, f* – hypergene complex with derivative gold ($Au_{99,0-97,0}$) occurs in quartz caverns (Qz) (Elena zone, depth 18.3 m)



точных типов.

Метасоматиты позднего этапа, в свою очередь, соответствуют продуктам кислого метасоматоза (HS-тип) с обильным развитием сульфатов – барита, алуниита, ярозита, микасита, англезита и т. д.

Вопрос о взаимоотношениях растворов IS- и HS-типов остаётся спорным и откры-

тым для проведения дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0010).

Список литературы

1. Ананьев Ю. С., Житков В. Г., Поцелуев А. А. Дистанционная прогнозно-поисковая модель эпитеpмальных Au-Ag месторождений (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 84–92.
2. Борнеман-Старынкевич И. Д. Руководство по расчёту формул минералов. – М.: Наука, 1964. – 218 с.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 книгах / под ред. А. И. Ханчука. – Владивосток: Дальнаука, 2006.
4. Левочская Д. В., Лесняк Д. В., Якич Т. Ю. Теллуридная минерализация эпитеpмального золоторудного поля Светлое (Хабаровский край) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума им. академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, 5–9 апреля 2021. – Томск. – Т. 1. – С. 98–100.
5. Левочская Д. В., Якич Т. Ю., Лесняк Д. В., Ананьев Ю. С. Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золоторудного месторождения Эми и Елена эпитеpмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 10. – С. 17–32.
6. Мишин Л. Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Россия) (Ульинский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30, № 4. – С. 32–48.
7. Перчук А. Л., Плечов П. Ю., Сазонова Л. В., Сафонов О. Г., Тихомиров П. Л., Шур М. Ю. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов: учебное пособие. – М.: КДУ, 2015. – 472 с.
8. Якич Т. Ю. Теллур и селен в месторождениях благородных металлов: Особенности состава, форма нахождения и связь с оруденением // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума им. академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 90-летию со дня рождения Н. М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л. Л. Халфина, 50-летию научных молодёжных конференций им. академика М. А. Усова, 4–8 апреля 2022. – Т. 1. – С. 72–75.
9. Якич Т. Ю., Буханова Д. С., Синкина Е. А., Сарсекеева Э. М., Левочская Д. В., Николаева А. Н., Максимов П. Н., Кутырев А. В., Жегунов П. С., Рудмин М. А. Особенности вещественного состава и условия формирования медной минеральной ассоциации Бараньевского эпитеpмального месторождения (Центральная Камчатка) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 12. – С. 74–87.
10. Cook N. J., Ciobanu C. L., Spry P., Kojonen K. K., Kovalenker V. Telluride and selenide minerals in gold deposits – a half-term report for IGCP-486 // Extension Abstract 12th Quadrennial IADOD Symposium Understanding the Genesis of Ore Deposits to Meet the Demands of the 21st Century. – 2006. – P. 106–109.
11. Hedenquist J. W., Arribas R. A. Exploration for epithermal gold deposits // Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 245–277.
12. Hedenquist J. W., Izawa E., Arribas A., White N. C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration // Resource Geology. – 1996. – V. 1. – P. 1–15.
13. Keith M., Smith D. J., Doyle K., Holwell D. A., Jenkin G. R. T., Barry T. L., Becker J., Rampe J., Pyrite



chemistry: A new window into Au-Te ore-forming processes in alkaline epithermal districts, Cripple Creek, Colorado // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2020. – V. 274. – P. 172–191.

14. Lindgren W. Mineral deposits. – New York ; London : McGraw-Hill Book Company, 1933. – 930 p.

15. Sillitoe R. H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features // Mineral Deposits Division. – Saint John's : Geological Association of Canada, 1993. – Special Paper. – P. 403–417.

References

1. Anan'ev Yu. S., Zhitkov V. G., Potseluev A. A. Distantionnaya prognozno-poiskovaya model' epitermal'nykh Au-Ag mestorozhdenii (na primere rudnogo polya Svetloe, Khabarovskii krai) [Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field Svetloe, Khabarovsk Krai)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2019, V. 330, No 5, pp. 84–92. (In Russ.).

2. Borneman-Starynkevich I. D. Rukovodstvo po raschetu formul mineralov [Guide to the calculation of mineral formulas], Moscow, Nauka Publ., 1964, 218 p.

3. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. In 2 books. Ed. A. I. Khanchuk, Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2006.

4. Levochskaya D. V., Lesnyak D. V., Yakich T. Yu. Telluridnaya mineralizatsiya epitermal'nogo zolotorudnogo polya Svetloe (Khabarovskii krai) [Telluride mineralization of the epithermal gold ore field Svetloye (Khabarovsk Krai)], *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXV Mezhdunarodnogo simpoziuma im. akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu gorno-geologicheskogo obrazovaniya v Sibiri, 125-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 5–9 aprelya 2021 [Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the Academician M. A. Usov XXV International Symposium of students and young scientists, dedicated to the 120th anniversary of mining and geological education in Siberia and the 125th anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University, April 5–9, 2021]*, Tomsk, V. 1, pp. 98–100.

16. Wang L., Qin K. Z., Song G. X., Li G. M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification // *Ore Geology Reviews* – 2019. – V. 107. – P. 434–456.

17. Yakich T. Y., Ananyev Y. S., Ruban A. S., Gavrilov R. Y., Lesnya D. V., Levochskaya D. V., Savinova O. V., Rudmin M. A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 136. – 104257.

5. Levochskaya D. V., Yakich T. Yu., Lesnyak D. V., Anan'ev Yu. S. Gidrotermal'no-metasomaticheskaya zonal'nost', flyuidnyi rezhim i tipy zolotogo orudneniya uchastkov Emi i Elena epitermal'nogo rudnogo polya Svetloe (Khabarovskii krai) [Hydrothermal-metasomatic zonalinity, fluid regime, and types of gold mineralization of the Emi and Elena sites of the epithermal ore field Svetloye (Khabarovsk Krai)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2021, V. 332, No 10, pp. 17–32. (In Russ.).

6. Mishin L. F. Vtorichnye kvartcity i ikh svyaz' s zolotorudnoi mineralizatsiei mestorozhdeniya Svetloe (Rossiya) (Ul'inskii progib, Okhotsko-Chukotskii vulkanogennyi poyas) [Secondary quartzites and their relation to gold ore mineralization of the Svetloye deposit (Ulya trough, Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt)], *Tikhookeanskaya geologiya [Russian journal of Pacific geology]*, 2011, V. 30, No 4, pp. 32–48. (In Russ.).

7. Perchuk A. L., Plechov P. Yu., Sazonova L. V., Safonov O. G., Tikhomirov P. L., Shur M. Yu. Osnovy petrologii magmaticheskikh i metamorficheskikh protsessov [Fundamentals of petrology of magmatic and metamorphic processes], Moscow, KDU Publ., 2015, 472 p.

Yakich T. Yu. Tellur i selen v mestorozhdeniyakh blagorodnykh metallov: Osobennosti sostava, forma nakhozhdeniya i svyaz' s orudneniem [Tellurium and selenium in deposits of precious metals: Features of composition, form of location and connection with mineralization], *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXV Mezhdunarodnogo simpoziuma im. akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 90-letiyu so dnya rozhdeniya N. M. Rasskazova, 120-letiyu*



so dnya rozhdeniya L. L. Khalfina, 50-letiyu nauchnykh molodezhnykh konferentsii im. akademika M. A. Usova, 4–8 aprelya 2022 [Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the Academician M. A. Usov XXV International Symposium of students and young scientists, dedicated to the 90th anniversary of the birth of N. M. Ras-skazov, the 120th anniversary of the birth of L. L. Khalfin, the 50th anniversary of scientific youth conferences named after academician M. A. Usov, April 4–8, 2022], V. 1, pp. 72–75.

8. Yakich T. Yu., Bukhanova D. S., Sinkina E. A., Sarsekeeva E. M., Levochskaya D. V., Nikolaeva A. N., Maksimov P. N., Kuttyrev A. V., Zhegunov P. S., Rudmin M. A. Osobennosti veshchestvennogo sostava i usloviya formirovaniya mednoi mineral'noi assotsiatsii Baran'evskogo epitermal'nogo mestorozhdeniya (Tsentral'naya Kamchatka) [Mineral features of the copper association of the Baran'evskoe epitermal deposit (Central Kamchatka)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2022, V. 333, No 12, pp. 74–87. (In Russ.).
9. Cook N. J., Ciobanu C. L., Spry P., Kojonen K. K., Kovalenker V. Telluride and selenide minerals in gold deposits – a half-term report for IGCP-486, *Extension Abstract 12th Quadrennial IAGOD Symposium "Understanding the Genesis of Ore Deposits to Meet the Demands of the 21st Century"*, 2006, pp. 106–109.
10. Hedenquist J. W., Arribas R. A. Exploration for epithermal gold deposits, *Reviews in Economic Geology*, 2000, V. 13, pp. 245–277.
11. Hedenquist J. W., Izawa E., Arribas A., White N. C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration, *Resource Geology*, 1996, V. 1, pp. 1–15.
12. Keith M., Smith D. J., Doyle K., Holwell D. A., Jenkin G. R. T., Barry T. L., Becker J., Rampe J., Pyrite chemistry: A new window into Au-Te ore-forming processes in alkaline epithermal districts, Cripple Creek, Colorado, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, V. 274, pp. 172–191.
13. Lindgren W. Mineral deposits, New York; London, McGraw-Hill Book Company Publ., 1933, 930 p.
14. Sillitoe R. H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features, *Mineral Deposits Division, Saint John's, Geological Association of Canada*, 1993, Special Paper, pp. 403–417.
15. Wang L., Qin K. Z., Song G. X., Li G. M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification, *Ore Geology Reviews*, 2019, V. 107, pp. 434–456.
16. Yakich T. Y., Ananyev Y. S., Ruban A. S., Gavrilov R. Y., Lesnyak D. V., Levochskaya D. V., Savinova O. V., Rudmin M. A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration, *Ore Geology Reviews*, 2021, V. 136, 104257.

Левочская Дарья Валентиновна (levochskayaDV@polymetal.ru)

аспирант¹, начальник отдела поисковых работ²

Якич Тамара Юрьевна кандидат геол.-минерал. наук, доцент отделения геологии¹

Лесняк Дмитрий Викторович аспирант¹, директор дирекции геологоразведочных проектов²

Рудмин Максим Андреевич кандидат геол.-минерал. наук, доцент¹

Рубан Алексей Сергеевич кандидат геол.-минерал. наук, доцент¹

Ерофеев Алексей Евгеньевич студент¹

Мазуров Алексей Карпович доктор геол.-минерал. наук, профессор¹

¹ Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

² Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК», г. Хабаровск, Россия