

УДК 552.113

ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ, ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ И ТИПЫ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ УЧАСТКОВ ЭМИ И ЕЛЕНА ЭПИТЕРМАЛЬНОГО РУДНОГО ПОЛЯ СВЕТЛОЕ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

Левочская Дарья Валентиновна^{1,2},
levochskayaDV@polymetal.ru

Якич Тамара Юрьевна¹,
cherkasovatu@tpu.ru

Лесняк Дмитрий Викторович^{1,2},
lesnyakdv@polymetal.ru

Ананьев Юрий Сергеевич¹,
AnanyevYS@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК»,
Россия, г. Хабаровск, ул. Муравьева-Амурского, 18.

Актуальность исследования определяется получением новых данных о вещественном составе, текстурно-структурных особенностях, гидротермально-метасоматической зональности, флюидном режиме и типах золотого оруденения двух наиболее контрастных участков эпитеpмального поля Светлое (Хабаровский край), образованных в разновозрастных материнских породах позднемелового возраста (K_2) основного состава хетаниской свиты коньяк-сантонского яруса (участок Эми) и несогласно перекрывающих их породах кислого состава уражской свиты кампан-маастрихского яруса (участок Елена). Выбранные объекты характеризуются различным уровнем эрозионного среза и наиболее полно отражают разнообразие метасоматитов эпитеpмального поля Светлое от малоизмененных пород хетанинской свиты в пределах участка Эми до сильно измененных, в том числе гипергенными процессами, пород кислого состава, преобладающих на территории участка Елена. Полученные данные играют важную роль для установления класса эпитеpмальных месторождений, прогноза оруденения на глубину, а также могут быть использованы для выявления поисковых критериев и признаков аналогичных объектов как на территории Охотско-Чукотского вулканического пояса, так и за его пределами. **Целью** настоящей работы является изучение гидротермально-метасоматической зональности, вещественного состава, текстурно-структурных особенностей, флюидного режима, а также форм нахождения золота эпитеpмального рудного поля Светлое на примере двух участков – Эми и Елена. **Объектами** исследования являются руды, метасоматиты и слабоизмененные исходные породы в виде керновых, штуфовых и скопковых проб, отобранных в результате проведения научно-исследовательских работ из восьми скважин и двух действующих карьеров. Породы изучены **методами** оптической и электронной микроскопии с применением энергодисперсионной спектроскопии, а также методами рентгено-дифракционного анализа, микротермометрии и рамановской спектроскопии. В результате проведенных исследований установлено, что метасоматическая зональность эпитеpмального поля Светлое включает осевую зону остаточного кварца (вторичные кварциты с различными текстурно-структурными особенностями – мозаичный, перистый, колломорфный, крустификационный) и ореол переслаивающихся линейно-вытянутых зон метасоматитов (алуитовые и дикиитовые кварциты), сменяющихся на большем удалении от осевой зоны серицитовыми и иллит-хлоритовыми метасоматитами. Главная и основная доля минерализации связана с монокварцитами. Морфология рудных тел представлена субпластовыми линейными залежами килевидной формы с грибовидными раздувами в палеожерловинах до 110 м. Средняя мощность рудных тел варьирует от 12 до 60 м, длиной до 700 м при ширине 100...240 м. Падение рудных зон пологое, вблизи палеожерловин крутое с неравномерным или весьма неравномерным характером распределения полезного компонента. Среднее содержание золота в рудах 2,5 г/т. Состав гипогенной сульфидной минерализации представлен сульфидами полиметаллов Cu, Pb, Zn, Fe в виде пирита, галенита, сфалерита, халькопирита и теннантит-тетраэдрита. В пределах рудных тел участка Эми минеральная ассоциация сульфидов гидротермальной стадии составляет более 5 об. %, отличается разнообразием и обилием теллуридов. Золотое оруденение представлено двумя типами: Au-Ag и Au-Ag-теллуридным. Au-Ag руды представлены первичными рудами со средней пробой ~ 900 ‰, развитыми в пределах участка Эми, и вторичными (окисленные) рудами с пробой до 1000 ‰, преобладающими на участке Елена. По характеру и составу газовой-жидких включений в кварце гидротермально-рудный процесс на участке Эми протекал при температурах 260...330 °С. Микрокриотермометрические эксперименты участка Елена указывают на температурный интервал гидротермального процесса 200...240 °С. По вещественному составу измененных пород, гипогенной сульфидной ассоциации и флюидному режиму эпитеpмальное поле Светлое относится к сульфатно-кислотному и умеренно-кислотному (HS-IS) типу, обнаруживающему перспективу обнаружения порфирового оруденения на глубину.

Ключевые слова:

Гидротермально-метасоматическая зональность, эпитеpмальные месторождения золота, текстурно-структурные особенности, флюидный режим, эпитеpмальное рудное поле Светлое, Охотско-Чукотский вулканический пояс.

Введение

Эпитермальные месторождения золота относятся к низкотемпературным (<300 °С) месторождениям малых глубин (<1 км), приуроченным к конвергентным границам активных континентальных окраин [1–8]. Первоначально понятие «эпитермальные месторождения» было введено В. Лингредом [1] как низкотемпературные (<200 °С) месторождения золота, тесно связанные с обильным проявлением теллуридов, антимонидов и селенидов. Впоследствии температурный режим образования эпитермальных месторождений был увеличен до 300 °С и они стали условно разделяться на три типа в зависимости от состава и характера растворов, участвующих в их формировании: кислотный (high sulfidation – HS), умереннокислотный (intermediate sulfidation – IS) или низкокислотный (щелочной) (low sulfidation – LS) [5, 7, 9]. Важную роль в типизации эпитермальных месторождений играет характер метасоматических преобразований, их текстурно-структурные особенности, вещественный состав гипогенных сульфидов и флюидный режим.

Изучение особенностей вещественного состава и характера зональности околорудных метасоматитов и руд эпитермального поля Светлое на примере двух участков Эми и Елена представляет собой весьма актуальную задачу, учитывая тот факт, что нередко эпитермальные месторождения золота и в частности их «литокапы (lithocaps)» представляют собой верхние части единой продолжающейся на глубине эпитермально-порфировой системы [10]. Под «литокапами (lithocaps)» понимают каменистые покровы (шляпы), центральными частями которых являются области остаточного кварца и ореолы кварц-алунитовых метасоматитов. Они формируются на глубинах менее 500 м от палеоповрхности и контролируются зонами подводящих каналов [7, 11]. Несмотря на то, что согласно данным И.Н. Кигая на территории Востока Азии (Хабаровский край, Приморье, Япония) эпитермальные золото-серебряные месторождения не обнаруживают пространственной и возрастной связи с медно-порфировыми месторождениями ввиду отсутствия последних [12], единичные крупные порфировые месторождения, такие как местоождения Малмыж и Песчанка, на территории Дальнего Востока России все же известны, что повышает потенциал обнаружения последних в пределах изучаемой площади.

Идентификация метасоматической зональности золоторудных месторождений играет важную роль в понимании процессов гидротермального рудообразования [13, 14]. Эта информация может быть использована для разработки поисковых критериев и признаков аналогичных объектов как на территории Охотско-Чукотского вулканического пояса, так и за его пределами.

В статье рассматриваются два участка эпитермального рудного поля Светлое, наиболее интересных с точки зрения разнообразия и полноты проявлений гидротермально-метасоматических преобразований рудовмещающих пород кислой серии уракской

свиты (участок Елена), несогласно перекрывающих более ранние средне-основного состава породы хетанинской свиты (участок Эми). Участки отражают различный уровень эрозионного среза и, как следствие, различную специфику гидротермально-метасоматических преобразований, вещественный и минеральный состав руд, различный флюидный режим, что наиболее достоверно позволит классифицировать рудное поле Светлое и оценить его потенциал оруденения на глубину.

Геолого-структурная позиция золоторудного поля Светлое

Эпитермальное золоторудное поле Светлое приурочено к Ульяновскому прогибу, сложенному меловыми вулканическими образованиями Охотско-Чукотского вулканического пояса [15, 16] и занимает две палеовулканические структуры центрального типа (рис. 1). Эти вулканические постройки разновозрастные – северо-западная (вмещает участок Эми) хетанинского времени, а юго-восточная, более молодая, (участки Елена, Тамара, Людмила и Лариса) ураксского времени. Хетаниская свита представлена андезитами, андезибазальтами, их агломератовыми лавами, реже туфами. Наиболее широко развиты пироксеновые андезиты темно-серого, почти черного цвета.

Уракская свита несогласно залегает на размытых породах хетанинской свиты. Она сложена стекловатыми и кислыми породами риолитового состава, дацитами, белыми, серовато-сиреневыми и кремвожелтыми игнимбритами, а также различными туфами и туфоловами (рис. 1).

Разрывная тектоника широко распространена в пределах Светлинского рудного поля. Выделяются продольные (относительно простирания Охотско-Чукотского вулканического пояса) региональные северо-восточные, крупные поперечные северо-западные разрывы. Субвулканические интрузии и две палеовулканические постройки с кальдерами проседания тяготеют к узлам сопряжения. В кальдерах этих палеовулканов и на их склонах встречаются различные метасоматиты, в том числе вторичные кварциты. Области с промышленно значимой золотой минерализацией контролируются зонами сочленениями кольцевых разломов, ограничивающих кальдеры проседания, с разломами северо-западного простирания [17–19].

Методы исследования

Для изучения минерального состава и петрографических особенностей частично измененных пород, руд и метасоматитов в ходе полевых работ было отобрано порядка 250 керновых, штупфных и сколковых проб из восьми скважин и двух карьеров с двух исследуемых участков. Основная часть проб отбиралась с шагом не более 3 м, охватывая все петрографические разности из керна четырех скважин участка Елена и аналогичного количества скважин участка Эми. Также были взяты сколковые пробы в бортах карьеров Елена и Эми.

Из образцов были изготовлены шлифы и аншлифы для определения микротекстурных и структурных особенностей, общей минеральной ассоциации, точной идентификации минералов и их ассоциаций. Микроструктурный и элементный анализ проводился на оптическом микроскопе Carl Zeiss и на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU (Чехия, TESCAN), оснащенный приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4...11,5 нА. Локальный рентгеноспектральный анализ выполнялся с предварительной калибров-

кой интенсивности зонда (11,4...11,5 нА) по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. СЭМ фотографии накапливались для двух основных детекторов: вторичных электронов (SE – secondary electrons) и обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons), в лаборатории отделения геологии (НИ ТПУ, г. Томск). Глинистые минералы определялись дополнительно с использованием рентгенодифракционного анализа (РДА) на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser с CuK излучением. Порошковые пробы размера менее 10 мкм сканировались в интервале углов 2θ 3,70° с шагом 0,02°, скоростью сканирования 2 с/точка при параметрах измерения 40 кВ и 40 мА.

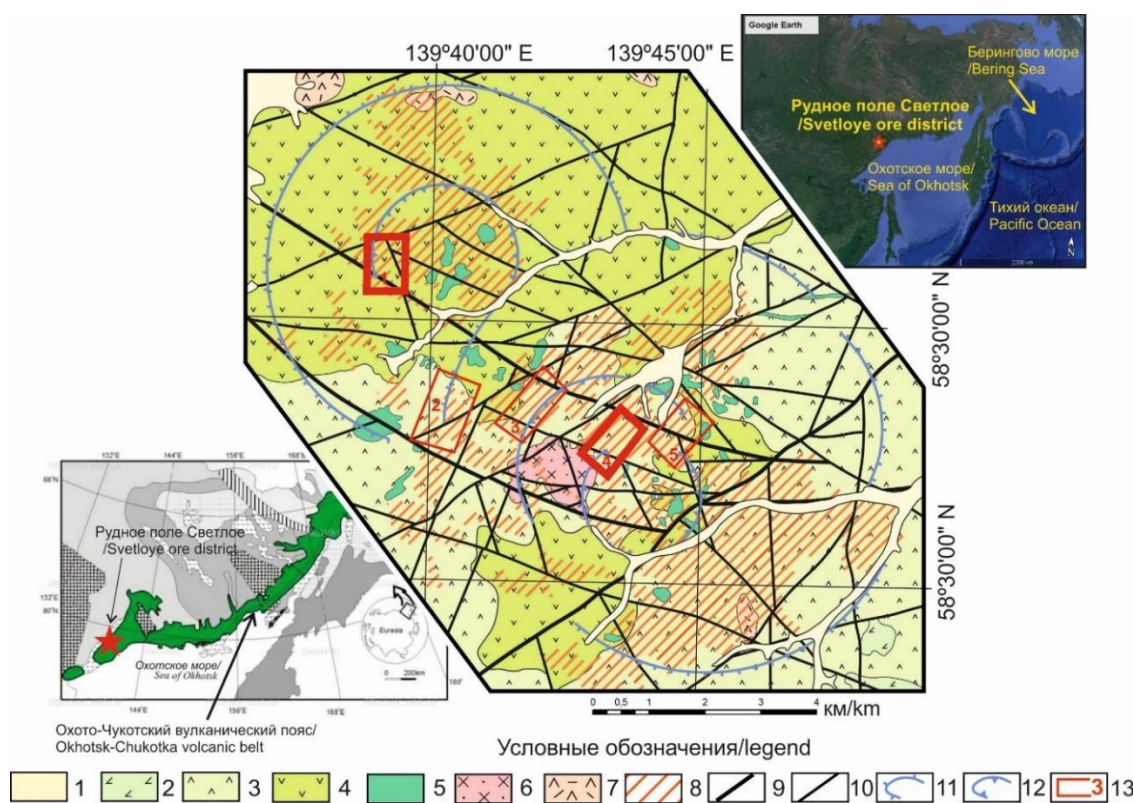


Рис. 1. Схематическая геологическая карта рудного поля Светлое. Составлена с использованием материалов Б.А. Новоселова и ООО «ПД РУС» с добавлениями и корректировками авторов: 1 – современные аллювиальные отложения (Q_{IV}); 2 – андезитовые базальты хакаринской свиты (K_2); 3 – лавы, туфы, игнимбриты уракской свиты (K_2); 4 – андезитовые лавы, андезитобазальты, андезитовые туфы хетанинской свиты (K_2); 5 – штоки и дайки базальтовых андезитов хакаринского базальтового комплекса (K_2); 6, 7 – уракский дацит-риолитовый комплекс (K_2); 6 – гранодиорит-порфировые штоки; 7 – дацитовые штоки и дайки; 8 – области распространения вторичных кварцитов и других метасоматитов; 9, 10 – разломы: 9 – региональные; 10 – другие; 11 – палеовулканические структуры; 12 – структуры проседания; 13 – участки рудного поля: 1 – Эми, 2 – Людмила; 3 – Тамара, 4 – Елена, 5 – Лариса

Fig. 2. Schematic geological map of the Svetloye ore district. Drawn up by the authors using materials of B.A. Novoselov and «PD RUS» Limited liability Company: 1 – alluvial deposits (Q_4); 2 – basaltic andesite of the Khakar Suite (K_2); 3 – lavas, tuffs, ignimbrites of the Urak Suite (K_2); 4 – lavas of andesites, basaltic andesites, andesites tuffs of the Khetanian Suite (K_2); 5 – stocks and dikes of basaltic andesites of the Khakarinsk basalt complex (K_2); 6, 7 – Urak dacite-rhyolite complex (K_2); 6 – stock of granodiorite-porphury; 7 – dacite stocks and dikes; 8 – areas of residual quartz and metasomatic alteration; 9, 10 – faults: 9 – regional; 10 – others; 11 – volcanic structures; 12 – subsidence zones; 13 – areas of deposits: 1 – Emmy, 2 – Lyudmila, 3 – Tamara, 4 – Elena, 5 – Larisa

Для определения температур фазовых переходов, солёности и состава газовой-жидких включений проводилась микротермометрия и рамановская спектроскопия двуполяризованных пластин. Микротермомет-

рические исследования флюидных включений проводились с использованием криотермокамеры Lincam THMSG 600 (Великобритания), совмещенной с оптическим микроскопом Carl Zeiss Axio A1, позволяю-

щей производить измерения температур фазовых переходов в интервале от -196 до $+600$ °С и наблюдать за ними при увеличениях до $500\times$. При достижении предполагаемых диапазонов фазовых переходов шаг нагрева снижался до $0,1$ °С/мин при точности измерения $0,2$ °С для криометрии и $0,5$ °С для термометрии.

Рамановская спектроскопия осуществлялась с помощью конфокального рамановского спектрометра Thermo Fisher Scientific DXR2. Все измерения проводились при длине волны лазера 785 нм и мощности $20...25$ мВт. Спектры обычно получали в течение 5 с для диапазона $0...3,364$ см⁻¹ с трехскоростным накоплением.

Результаты и их интерпретация

Гидротермально-метасоматическая зональность участков Елена и Эми

Золоторудное поле Светлое характеризуется разнообразием гидротермально-метасоматических образований, развивающихся по вулканогенным породам преимущественно кислого состава уракской свиты и, реже, среднего и основного состава хетанинской свиты. В результате петрографического анализа более 160 проб керна скважин с участка Елена и Эми с проведением дополнительных РДА анализов отдельных филлосиликатов были выделены следующие типы метасоматитов: вторичные кварциты (монокварциты, алунитовые, диккитовые, алунит-диккитовые, серицитовые), иллит-хлоритовые и гидрослюдистые кварциты (таблица). Исходные породы были обнаружены только в пределах участка Эми. Они представлены андезитами, андезитами и туфами, преимущественно андезитового состава. Во всех исследованных вулканических образованиях в разной степени проявлены метасоматические изменения, выраженные, прежде всего, в замещении полевых шпатов и темноцветных минералов (роговая обманка, биотит) глинистыми и гидрослюдистыми минералами. Последние можно интерпретировать как аргиллитизацию.

В пределах всего рудного поля Светлое вторичные кварциты слагают разобщенные в плане многослойные залежи неправильной вытянутой формы, имеющие наклонное залегание. Выделяются три группы монокварцитов – массивные, пористые, брекчированные. Распространение тех или иных структурно-текстурных разновидностей монокварцитов отражает изменчивость состава и строения материнских пород. Пористые и брекчированные разновидности развиваются по наиболее проницаемым породам (например, крупнообломочные туфы, вулканические брекчии), в то время как массивные – по слабопроницаемым (пелитовые туфы, дациты). Наибольшее распространение имеют пористые монокварциты, поровое пространство в которых может оставаться пустым либо быть заполненным кварцем более поздних генераций, рудной минерализацией, сульфатами, филлосиликатами (глинистыми минералами) и др.

В монокварцитовой залежи присутствуют прослои и линейно-вытянутые зоны, сложенные диккитовыми, реже алуниновыми, кварцитами.

Диккит и алунит здесь образуют отдельные включения и их агрегаты, которые заполняют поровое пространство. Значительно реже они развиваются по трещинам, образуя как мономинеральные, так и кварц-диккит-алунитовые прожилки. Процентное содержание диккита и алунита здесь, как правило, составляет $15-20$ %.

Монокварцитовые залежи обрамляются алуниновыми кварцитами, при этом на локальных участках (участок Елена, Скв. 2, рис. 2, А, рис. 3) отмечается переход монокварцитов к диккитовым, алунит-диккитовым и алуниновым кварцитам. 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 %). Рост содержания алунита сопровождается уменьшением размеров кристаллов и их более равномерным рассредоточением в основной массе породы – в периферийных частях залежи алунит представлен порфиробластовыми включениями длиннопризматических кристаллов размером до 1 мм, в осевой части – тонкозернистым агрегатом. В алуниновых кварцитах также отмечаются прослои, представленные монокварцитами (вероятно, реликтовые формы от сульфат-насыщенных растворов) и алунит-диккитовыми кварцитами. На участке Эми монокварциты оконтуриваются серицитовыми кварцитами (рис. 2, Б, рис. 4).

Через алунит-диккитовые разности алуниновые кварциты переходят в диккитовые, которые обрамляют залежь вторичных кварцитов, слагая её прикровельную и приподшвенную зоны. На локальных участках диккитовые кварциты оконтуривают монокварциты. Диккит представлен мелкочешуйчатым агрегатом, который заполняет поровое пространство в микрозернистой кварцевой основной массе, а также замещает реликты кристаллокластов. В переходных зонах (к монокварцитам, алуниновым и алунит-диккитовым кварцитам) отмечается развитие относительно крупных таблитчатых кристаллов диккита, которые формируют порфиробластовые включения и заполняют трещины, образуя мономинеральные или алунит-диккитовые прожилки. Диккитовые залежи подстилаются иллит-хлоритовыми метасоматитами, содержание кварца в которых в большинстве случаев не превышает 30 %. В пределах залежи вторичных кварцитов участка Эми метасоматически измененные вулканические и вулканогенно-обломочные образования слагают крутопадающие линейно-вытянутые зоны, являющиеся останцами первичных вмещающих пород. Эти зоны, ввиду их слабой метасоматической переработки, по-видимому, отражают механически устойчивые и наименее проницаемые области.

Морфология рудных тел и рудовмещающие метасоматически-измененные породы

Рудовмещающими являются монокварциты (массивные, пористые, брекчированные), алуниновые кварциты, алунит-диккитовые кварциты, диккитовые кварциты, иллит-хлоритовые аргиллитизиты.

Таблица. Сводная петрографическая характеристика гидротермально-метасоматических, вулканических и вулканогенно-осадочных образований участка Елена и Эми эпитермального золоторудного поля Светлое
Table. Integrated petrographic characteristics of hydrothermal-metasomatic, volcanic and volcanogenic-sedimentary formations of the Elena and Emmy deposits of the Svetloe gold ore epithermal district

Типы гидротермально-метасоматических образований Types of hydrothermal-metasomatic formations	Минеральный состав Mineral composition	Структуры пород Rock structures	Текстуры пород Rock textures	Текстуры кварца Quartz textures
Участок Елена/Elena deposit				
Монокварциты массивные Massive residual quartz	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...15 %	Микрозернистая, реликтовая, бластопорфировая Microgranular, relict, blastoporphyritic	Неоднородная, полосчатая, пятнистая, гнездовая, трещиноватая, прожилковая Heterogeneous, banded, spotted, nesting, fractured, veined	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Монокварциты пористые Residual quartz with vuggy texture	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...5 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...20 %	Неравнозернистая, реликтовая бластопорфировая Inequigranular, relict blastoporphyritic	Неоднородная, пористая, пятнистая, трещиноватая, сплошная, прожилковая Heterogeneous, porous, spotted, fissured, platy, veined	Крустификационная, мозаичная, колломорфная Crustified, mosaic, collomorphic
Монокварциты брекчированные Residual quartz with brecciated texture	Кварц/quartz 75...85 %, глинистые минералы/phyllsilicate 10...15 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 5...10 %	Неравнозернистая, реликтовая бластопорфировая Inequigranular, relict blastoporphyritic	Неоднородная, брекчиевидная, пятнистая, трещиноватая Heterogeneous, brecciated, spotted, fractured	Мозаичная, крустификационная, колломорфная Mosaic, crustified, collomorphic
Алунитовые кварциты Alunite quartz zone	Кварц/quartz 50...70 %, алунит/alunite 20...50 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...20 %	Неравнозернистая, микрозернистая гетеробластовая, реликтовая бластопорфировая, порфиробластовая Inequigranular, micro-grained heteroblastic, relict blastoporphyritic, porphyroblastic	Неоднородная, пористая, трещиноватая, пятнистая Heterogeneous, porous, fractured, spotted	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Алунит-диккитовые кварциты Alunite dickite quartz zone	Кварц/quartz 30...50 %, алунит/alunite 20...35 %, диккит/dickite 20...35 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 5...10 %	Микрозернистая, гетеробластовая, бластопорфировая, порфиробластовая, гранобластовая Microgranular, heteroblastic, blastoporphyritic, porphyroblastic, granoblastic	Неоднородная, пористая, трещиноватая, пятнистая, прожилковая Heterogeneous, porous, fractured, spotted, veined	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Диккитовые кварциты Dickite quartz zone	Кварц/quartz 50...70 %, диккит/dickite 20...50 %, карбонатно-гидрослюдистый агрегат/carbonate-hydromica aggregate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...10 %, барит/barite 0...1 %	Неравнозернистая, микрозернистая, гетеробластовая Inequigranular, micro-grained, heteroblastic	Неоднородная, пористая, трещиноватая, пятнистая Heterogeneous, porous, fractured, spotted	Крустификационная, мозаичная Crustified, mosaic
Участок Эми/Emmy deposit				
Монокварциты массивные Massive residual quartz	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...15 %	Неравнозернистая, реликтовая бластопорфировая, гетеробластовая Inequigranular, micro-grained, heteroblastic	Неоднородная, полосчатая, гнездовая, трещиноватая, прожилковая Heterogeneous, banded, nested, fractured, veined	Колломорфная, перистая, крустификационная, мозаичная Collomorphic, feathery, crustified, mosaic
Монокварциты пористые Residual quartz with vuggy texture	Кварц/quartz 80...100 %, глинистые минералы/phyllsilicate 0...10 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 0...15 %	Неравнозернистая Inequigranular	Неоднородная, гнездовая, пористая, трещиноватая Heterogeneous, nested, porous, fractured	Колломорфная, перистая, крустификационная, мозаичная Collomorphic, feathery, crustified, mosaic
Монокварциты брекчированные Brecciate residual quartz with vuggy texture	Кварц/quartz 75...85 %, глинистые минералы/phyllsilicate 10...15 %, рудные минералы (включая гидроокислы железа)/opaque minerals, including hydrous ferric oxides 5...10 %	Микрозернистая Microgranular	Неоднородная, брекчиевидная, пятнистая, трещиноватая Heterogeneous, brecciated, spotted, fractured	—

Алунитовые кварциты Alunite quartz zone	Кварц/quartz 60...70 %; алу- нит/alunite 30...40 %	Микрозернистая, гетеробласто- вая, порфиробластовая Microgranular, heteroblastic, porphyroblastic	Неоднородная, про- жилковая, пятнистая Heterogeneous, veined, spotted	Мозаичная Mosaic
Диккитовые квар- циты Dickite quartz zone	Кварц/quartz 75...80 %, дик- кит/dickite 15 %, рудные мине- ралы/opaque minerals 5...10 %	Неравнозернистая, гетеробластовая Inequigranular, heteroblastic	Неоднородная, тре- щиноватая, прожил- ковая Heterogeneous, fractured, veined	Мозаичная Mosaic
Гидрослюдистые кварциты Hydro-mica quartz zone	Кварц/quartz 65...70 %, сери- цит/white mica 25...30 %, руд- ные минералы/opaque minerals 5 %	Микрозернистая, порфиробластовая Microgranular, porphyroblastic	Пористая, трещиноватая, прожилковая, пятнистая Porous, fissured, veined, spotted	Крустификацион- ная, мозаичная Crustified, mosaic
Метаандезиты Altered andesites	Плагиоклаз/plagioclase 50...75 %, вулканическое стек- ло/volcanic glass 15...35 %, кальцит/calcite 5...30 %, роговая обманка/hornblende 5...10 %, биотит/biotite 5...10 %, хло- рит/chlorite 5 %, серицит/ white mica 5 %, рудные мине- ралы/opaque minerals <1...15 %	Порфировая Porphyry	Прожилковая, трещиноватая Veined, fractured	
МетатUFFы Altered tuffs	Плагиоклаз/plagioclase 15...40 %, вулканическое стек- ло/volcanic glass 20...70 %, кальцит/calcite 10...40 %, кварц/quartz 5...15 %, ил- лит+хлорит+серицит/illite+chlori- te+white mica 15...50 %, рудные мине- ралы/opaque minerals <1...20 %	Литокластическая, кристалло- кластическая, литокристалло- кластическая, фельзитовая Lithoclastic, crystalloclastic, lithocrystallineclastic, felsic	Массивная, пористая, флюидальная, про- жилковая Massive, porous, fluid, veined	

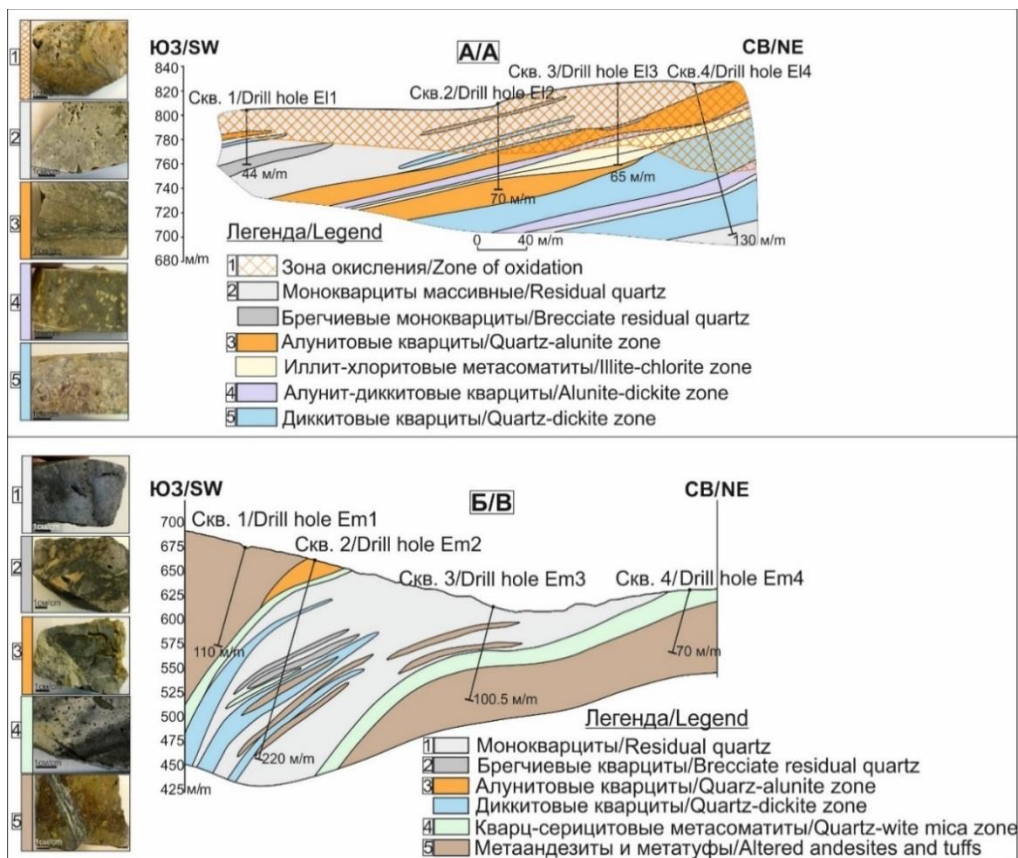


Рис. 2. Схематические разрезы участков Елена (А) и Эми (Б), показывающие вертикальную изменчивость гидротермально-метасоматических образований с наглядным представлением образцов метасоматитов (слева от разрезов)

Fig. 2. Schematic cross sections of alteration zonation within the Elena (A) and Emmy (B) deposits with demonstration of hand specimens (on the left side from the cross sections)

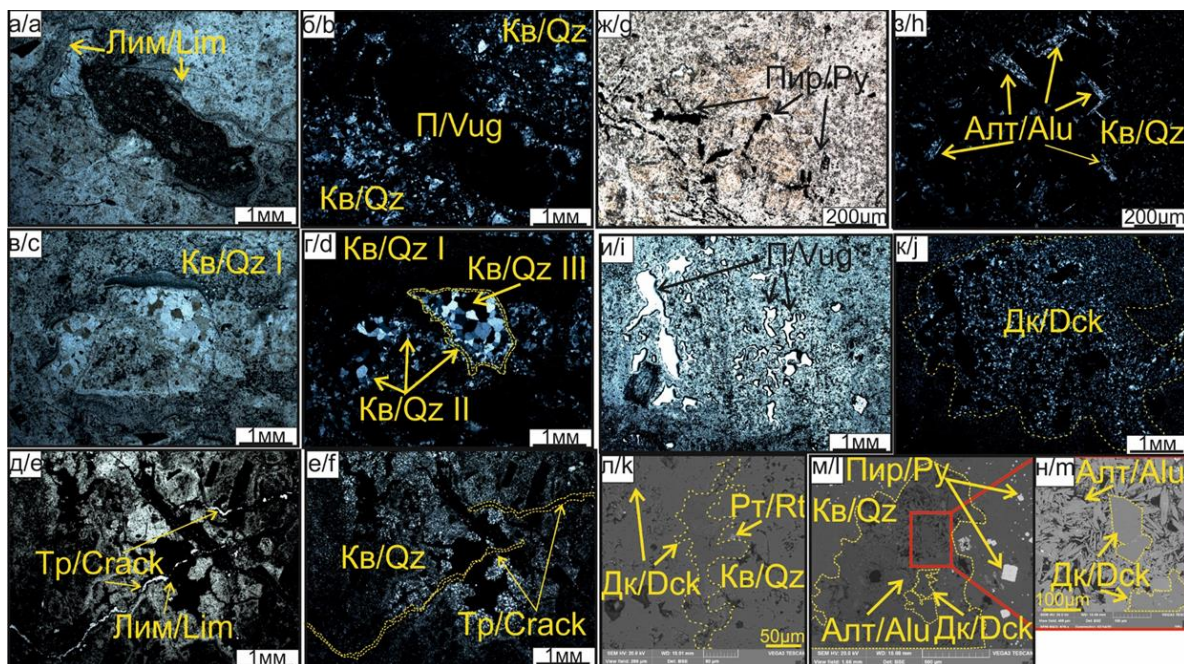


Рис. 3. Фотографии полированных шлифов метасоматитов участка Елена в параллельных (а, в, д, ж, и) и скрещенных (б, г, е, з, к) николях, а также обратно-отражённых электронах электронного сканирующего микроскопа (л–н). Пористые (П) монокварциты из поверхностной зоны окисления представлены кварцем (Кв) в ассоциации с лимонитом (Лим) (участок Елена, скв. 2, гл. 0,8 м) (а, б); увеличенный фрагмент пористого монокварцита, отражающий несколько поколений кварца (Кв): микрокристаллический (неразличимозернистый) (I), мелкозернистый – перистый, формирующий структуры обрастания (II), и мелкозернистый мозаичный (III) (участок Елена, скв. 2, гл. 0,8 м) (в, г); брежчиевые монокварциты (Кв) с брежчиево-цементной текстурой и обильным количеством трещин (Тр), частично заполненных гидроксидами железа (Лим) (участок Елена, скв. 2, гл. 11,3 м) (д, е); алунитовый (Алт) кварцит (Кв) с вкрапленностью рудных минералов, представленных преимущественно пиритом (Пир) (участок Елена, скв. 2, гл. 55,7 м) (ж, з); диккитовые кварциты (Кв), где диккит (Дк) заполняет гнезда и пустоты выщелачивания (П) в кварце (Кв) (участок Елена, скв. 4, гл. 61,3 м) (и, к); увеличенный фрагмент предыдущего образца диккитовых кварцитов в обратно-отраженных электронах сканирующего микроскопа, демонстрирующий зерно диккита (Дк) в ассоциации с рутилом (Рт) на фоне кварца (Кв) (участок Елена, скв. 4, гл. 61,3 м) (л); алунит (Алт)-диккитовые (Дк) кварциты (Кв) с вкраплениями пирита (Пир) кубического габитуса (участок Елена, скв. 2, гл. 41,3 м) (м); увеличенный фрагмент предыдущего участка, показывающий тесные взаимоотношения вытянутых кристаллов алунита с доменными агрегатами диккита, выполняющими пустоты выщелачивания в кварце (участок Елена, скв. 2, гл. 41,3 м) (н)

Fig. 3. Transmitted-light microphotographs of altered rocks within the Elena deposit in plane (a, c, e, g, i) and cross-polarized (b, d, f, h, j) light, and backscatter electron images (k–m). Residual quartz (Qz) with vuggy (Vug) texture from zone of oxidation represented by quartz (Qz) in association with limonite (Lim) (d. Elena, drill hole E12, depth 0,8 m) (a, b); an enlarged fragment of residual quartz, reflecting various generations of quartz (Q): microcrystalline (indistinguishable) (I), fine-grained – pinnate, forming fouling structures (II), and fine-grained mosaic (III) (d. Elena, drill hole E12, depth 0,8 m) (c, d); brecciate residual quartz (Qz) with a brecciate-cement texture and an abundant number of cracks in places filled with iron hydroxides (Lim) (d. Elena, drill hole E12, depth 11,3 m) (e, f); quartz-alunite (Alu) zone with dissemination of opaque minerals, represented mainly by pyrite (Py) (d. Elena, drill hole E12, depth 55,7 m) (g, h); dickite-quartz zone, where dickite (Dck) fills nests and cavities of leaching (Vug) in quartz (Qz) (d. Elena, drill hole E14, depth 61,3 m) (i, j); backscatter electron image of enlarged fragment of the previous dickite-quartz zone, demonstrated dickite grains (Dck) in the association with rutile (Rt) in quartz (Qz) (d. Elena, drill hole E14, depth 61,3 m) (k); alunite (Alu)-dickite (Dck) quartz (Qz) zone with dissemination cubic crystals of pyrite (Py) (d. Elena, drill hole E12, depth 41,3 m) (l); enlarged fragment of the previous section showing the close relationship of elongated alunite (Alu) crystals with domain structure aggregates of dickite (Dck), filling leaching cavities in quartz (d. Elena, drill hole E12, depth 41,3 m) (m)

Морфология рудных залежей представляет собой субпластовые линейные залежи килевидной формы с грибовидными раздувами. Параметры рудных залежей существенно изменчивые, длиной до 700 м и шириной 100...240 м, мощностью 12...60 м, с раздувами в палеожерловинах до 110 м, вертикальный размах достигает 300 м. Падение рудных зон пологое, вблизи палеожерловин крутое с неравномерным или весьма неравномерным характером распределения полезного компонента. Струк-

тура руд: микро- и мелкозернистая, порфириовидная, гипидиоморфнозернистая, колломорфная. Текстура руд: прожилковая (микропрожилковая), гнездовая, крустификационная, брежчиевидная, полосчатая.

Текстурные особенности кварца

Текстуры жильного кварца, наблюдаемого во всех разновидностях вторичных кварцитов, представлены четырьмя типами – крустификационный, мозаичный,

перистый, колломорфный (рис. 5). Наиболее широко распространен крустификационный кварц, развивающийся по стенкам порового пространства и трещин (рис. 5, а–в). Этот текстурный тип жильного кварца отмечен во всех вторичных кварцитах, за исключением брекчированных монокварцитов. Крустификационный кварц формировался преимущественно по открытому поровому пространству, отвечающему стадии кислотно-го выщелачивания. Колломорфный (рис. 5, з), мозаич-

ный (рис. 5, д) и перистый (эвгедральный) (рис. 5, ж–к) жильный кварц формируется на более поздних стадиях гидротермального процесса при перенасыщении раствора, которое может происходить при его вскипании, а также при быстром падении температуры и/или давления [20]. Наиболее ранним из них является колломорфный кварц, который обрамляется более крупнокристаллическим кварцем мозаичной и перистой текстур (рис. 5, з).

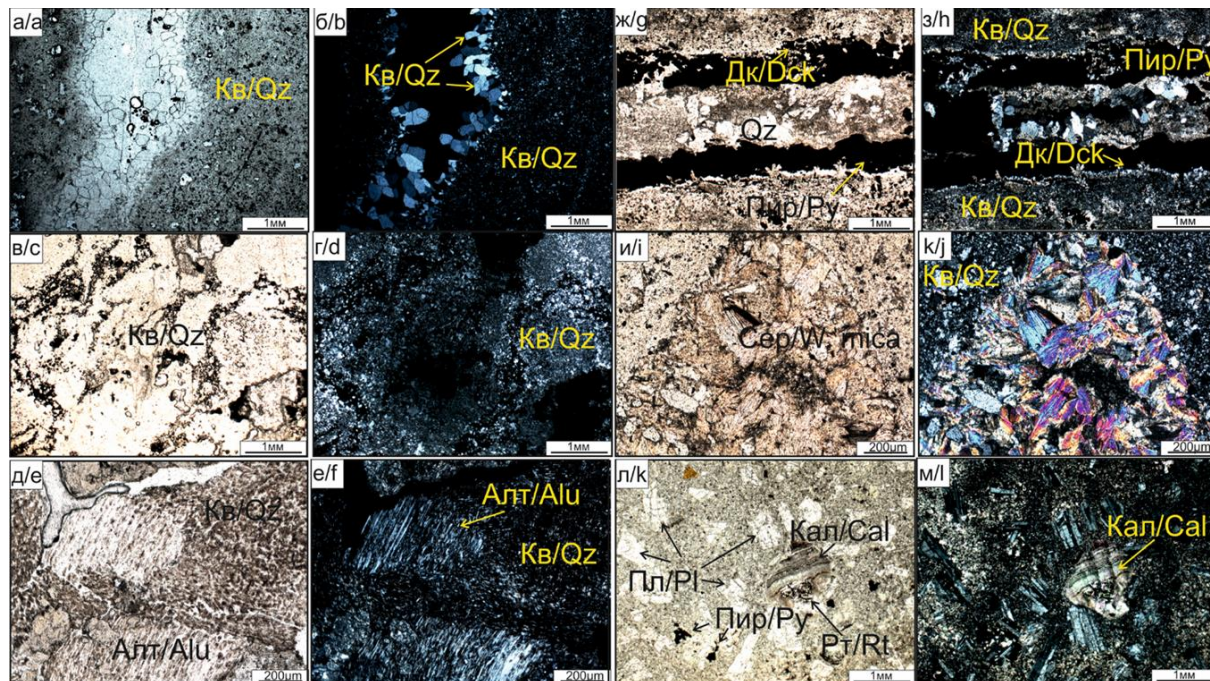


Рис. 4. Фотографии полированных шлифов метасоматитов участка Эми в параллельных (а, в, д, ж, и, л) и скрещенных (б, г, е, з, к, м) николях. Пористые монокварциты представлены кварцем (Кв) различных морфологических типов – мозаичным и перистым (участок Эми, скв. 2, гл. 40,9 м) (а, б); брекчированные кварциты с повышенной трещиноватостью (участок Эми, скв. 2, гл. 109,8 м) (в, г); алунитовые (Алт) кварциты (участок Эми, скв. 2, гл. 13,6 м) (д, е); диктитовые (Дк) кварциты с прожилками пирита (Пир) (участок Эми, скв. 2, гл. 200 м) (ж, з); кварц-серицитовые (Сер) метасоматиты (участок Эми, скв. 3, гл. 62,5 м) (и, к); метаандезиты с реликтовыми вкрапленниками плагиоклазов (Пл) на фоне измененной основной массы стекла с вкрапленностью пирита (Пир) неправильной формы и зональным зерном кальцита (Кал) с вкрапленностью игольчатого рутила (Рт) (участок Эми, скв. 4, гл. 21,8 м) (л, м)

Fig. 4. Transmitted-light microphotographs of altered rocks within the Emmy deposit in plane (a, c, e, g, i, k) and cross-polarized (b, d, f, h, j, l) light. Residual quartz (Qz) with vuggy texture represented by mosaic and drusy varieties (d. Emmy, drill hole Em2, depth 40,9 m) (a, b); brecciated residual quartz with fracture pattern (d. Emmy, drill hole Em2, depth 109,8 m) (c, d); quartz-alunite (Alu) zone (d. Emmy, drill hole Em2, depth 13,6 m) (e, f); quartz-dickite (Dck) zone with veinlets of pyrite (d. Emmy, drill hole Em2, depth 200 m) (g, h); quartz-white mica (W.mica) zone (d. Emmy, drill hole Em3, depth 62,5 m) (i, j); altered andesites with disseminated irregularly shaped pyrite (Py) and zonal grain of calcite (Cal) contained needles of rutile (Rt) (d. Emmy, drill hole Em4, depth 21,8 m) (k, l)

Вещественный состав гипогенных сульфидов

Преобладающим сульфидом гипогенной гидротермальной стадии формирования обоих участков эпitherмального рудного поля Светлое является пирит $(\text{Fe}_{0,87-1,13}, \text{Cu}_{0,0-0,12}, \text{As}_{0,0-0,02}, \text{Sb}_{0,0-0,06}, (\text{S}, \text{Te}_{0,006-0,03}, \text{Se}_{0,0-0,01}))_2$, а также сульфиды полиметаллов, представленные галенитом $(\text{Pb}_{0,89-1,12}, \text{Fe}_{0,0-0,14})\text{S}$, сфалеритом $(\text{Zn}_{0,74-1,0}, \text{Fe}_{0,01-0,11}, \text{Cu}_{0,01}, \text{Na}_{0,19})\text{S}$ и халькопиритом $(\text{Cu}_{0,68-1,09}, \text{Fe}_{0,66-1,19})\text{S}_2$, помимо перечисленных минералов широкое распространение, особенно в пределах участка Эми, получили блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрита $(\text{Cu}_{2,93-11,99}, \text{Fe}_{0,0-6,44}, \text{Zn}_{0-1,74}, \text{Ag}_{0,0-0,36})$

$(\text{Sb}_{0,0-3,88}, \text{As}_{0,0-4,0}, \text{Bi}_{0,0-0,51}, \text{Te}_{0,0-2,68})\text{S}_{13}$. В пределах участка Елена пирит представлен преимущественно мелкими (~5 мкм) кристаллами кубического габитуса, не обнаруживающими примесей. Кристаллы сфалерита, галенита, халькопирита и блеклых руд имеют аналогичную пириту размерность в первые мкм.

Участок Эми отличает разнообразие гипогенной сульфидной ассоциации и ее процентное содержание в рудоносных прожилках более 5 %. Пирит представлен несколькими морфологическими типами: колломорфным и кристаллическим сложного пентагондодекаэдрического и тетраэдрического габитусов. Он обнаруживает примеси меди до 6,0 вес. %, реже тел-

лура, селена, сурьмы. В тесной ассоциации с таким пиритом находятся халькопирит, блеклые руды теннантин-тетраэдритового ряда, голдфилдит ($\text{Cu}_{9,93-12,0}\text{Fe}_{0,0-1,74}\text{Ag}_{0,0-0,36}(\text{Te}_{1,41-2,68}\text{Sb}_{0,0-2,54}\text{Bi}_{0,0-0,28}\text{As}_{0,0-1,28})\text{S}_{13}$, хемусит ($\text{Cu}_{5,46-6,27}\text{Fe}_{0,0-0,33}\text{Sn}_{0,75-1,07}(\text{Mo}_{0,93-1,32}\text{Sb}_{0,0-0,27})\text{S}_8$, кавачулит $\text{Bi}_{2,65-3,08}\text{Te}_{2,88-3,3}\text{Se}$, теллуриды никеля (мелонит $\text{Ni}_{0,92-1,00}\text{Te}_2$), свинца (алтаит $\text{Pb}_{0,90}\text{Te}$), висмута (теллурувисмутин $\text{Bi}_{1,82-1,93}\text{Te}_3$), сурьмы и висмута (теллуритимон $\text{Sb}_{1,65-2,2}\text{Bi}_{0,15-0,7}\text{Te}_3$), ртути (колорадоит $\text{Hg}_{0,77-0,94}\text{Te}$).

Типы золотого оруденения

Золотое оруденение эпитегрмального рудного поля Светлое представлено двумя типами: Au-Ag и Au-Ag-теллуридным. Первый тип оруденения развит как в пределах участка Елена, так и на участке Эми, при этом проба золота различна. Этот тип оруденения представлен первичными и окисленными (переотложенными) рудами. Зона окисления, содержащая окисленные руды, широко развита в пределах участка Елена и варьирует в пределах от 50 до 120 м, она определяется по охристо-желтому цвету и обильному развитию минералов зоны гипергенеза, таких как лимонит, ярозит, сепиолит, гипсцит, брушит, микасаит и т. д. Окисленные руды представлены переотложенным высокопробным золотом с пробой до 1000 ‰, оно находится в ассоциации с самородным теллуридом, селеном и т. д., гидроокислами железа и ярозитом и относится к гипергенному переотложенному этапу формирования.

В пределах участка Эми встречаются первичные руды Au-Ag типа со средней пробой около 900 ‰, а также широко развит второй тип золотой минерализации, представленный теллуридами золота. Они обнаруживают определенную вертикальную зональность химического состава от наиболее высокосеребряных разностей, представленных ютенбогаардитом ($\text{Ag}_{3,42-3,61}\text{Au}_{0,67-0,74}\text{Fe}_{0,16-0,29}\text{S}_2\text{Te}_{0,07-0,12}$, штютцитом $\text{Ag}_{4,43-5,14}\text{Au}_{0,06-0,07}\text{Fe}_{0,6}\text{Bi}_{0,15}\text{Te}_3$, мутманнитом $\text{Au}_{0,55}\text{Ag}_{1,26}\text{Fe}_{0,18}\text{Mo}_{0,05}\text{Te}_2$ и гесситом $\text{Ag}_{1,71}\text{Au}_{0,1}\text{Te}$, развитых в приповерхностных условиях (38...40 м) до наиболее обогащенных золотом на глубоких горизонтах (198...200 м) в виде калаверита $\text{Au}_{0,71-0,91}\text{Ag}_{0,0-0,19}\text{Fe}_{0,0-0,19}\text{Cu}_{0,0-0,15}\text{Te}_2$. Промежуточная разновидность теллурида золота наиболее распространенная в пределах участка Эми представлена сальванитом $\text{Au}_{0,86-1,67}\text{Ag}_{0,4-2,31}\text{Fe}_{0,06-0,39}\text{Mo}_{0,2-0,77}\text{Ta}_{0,04-0,08}\text{Te}_4$.

Флюидный режим

На современном уровне эрозионного среза в пределах рудного поля Светлое в формировании продуктивной залежи участвовал слабосоленый (0..0,5 мас. % NaCl-экв.) флюидный поток. Изученные двухфазовые включения установлены в позднем эвгедральном кварце перистого строения (рис. 5, ж-к, б а, б), алуниите (рис. 5, в), кальците (рис. 6, з). Соотношение газовой и жидкой фазы для двухфазных включений равно 1:3, 2:3. Газовая фаза в подобных включениях, согласно данным Раман-спектроскопии, представлена диоксидом углерода. В зонах роста призматического кварца наличие одновременно захваченных газовых

(рис. 6, д), газовой-жидких и жидких включений (рис. 5, е-з) указывает на процесс кипения, протекавший во флюидной системе в момент кристаллизации минералов. Наличие различных форм диоксида кремния и его текстур свидетельствует о смене pH среды вследствие кипения. Так, в результате резкого вскипания и потери флюидом газовой составляющей растворимость кремнезема резко падает и отлагается аморфный и скрытокристаллический кварц с коллоидными и крустификационно-полосчатыми текстурами (рис. 5, з). Такая структура кварца не является благоприятной для захвата первичных флюидных включений, тем не менее о процессе можно судить по вторичным включениям в ранее образованных минералах. Так, в скрытокристаллическом кварце участка Елена были зафиксированы многочисленные газовые (CO_2) включения, состав которых диагностирован при помощи рамановского спектрометра, что подтверждает нахождение флюида в паровом (газовом) состоянии в момент формирования минерала. Учитывая совместное нахождение разнофазовых флюидных включений (на уровне одной пробы), минералообразующая система характеризовалась неоднократными условиями «вскипания» флюидов, источниками которых служили как гидротермальные потоки, так и метеорные воды, о чем свидетельствует низкая температура льда во вторичных включениях.

В пределах участка Эми гидротермально-рудный процесс протекал при температурах 260...340 °С. Относительно крупный размер газовой-жидких включений позволил проследить закономерное увеличение температур с глубиной в скв. 2. С двумя зонами максимальных температур гомогенизации в интервалах глубин 38...40 и 198...200 м связана интенсивная минерализация кварцитов. При этом по мере приближения по глубине к этим интервалам температура повышается. Так, в промежутке от 30...40 и от 50...200 м отмечается увеличение температуры гомогенизации газовой-жидких включений от 260 до 340 °С.

Обсуждение результатов

Метасоматическая зональность рудного поля Светлое и ее интерпретация

В пределах двух изучаемых участков – Елена и Эми – рудного поля Светлое, отражающих различный уровень эрозионного среза согласно принятым представлениям о моделях эпитегрмальных систем [21] выделяется осевая зона остаточного кварца (вторичные кварциты с различными текстурно-структурными особенностями – мозаичный, перистый, колломорфный, крустификационный) и ореол переслаивающихся линейно-вытянутых зон метасоматитов (алунитовые и диккитовые кварциты), сменяющихся на большем удалении от осевой зоны серицитовыми и иллит-хлоритовыми метасоматитами. Рудно-метасоматический процесс приурочен к дегазации средне-кислого магматического очага и накладывался на поля вулканитов. Металлоносные флюиды поступали по зонам тектонического разуплотнения, кольцевым и радиальным разломам и в неравновесных условиях приводили к интенсивному преимущественно кислотному (местами близ нейтраль-

ному) метасоматозу в кальдерах проседания, на склонах и у основания палеовулканических аппаратов. В результате формировался так называемый ореол вторичных кварцитов. Мощные и протяженные поля монокварци-

тов, сменяющиеся алуниновыми кварцитами и наложением диккитовых или диккит-каолинитовых кварцитов в дистальном направлении переходят в хлоритовые, иллит-хлоритовые аргиллизиты.

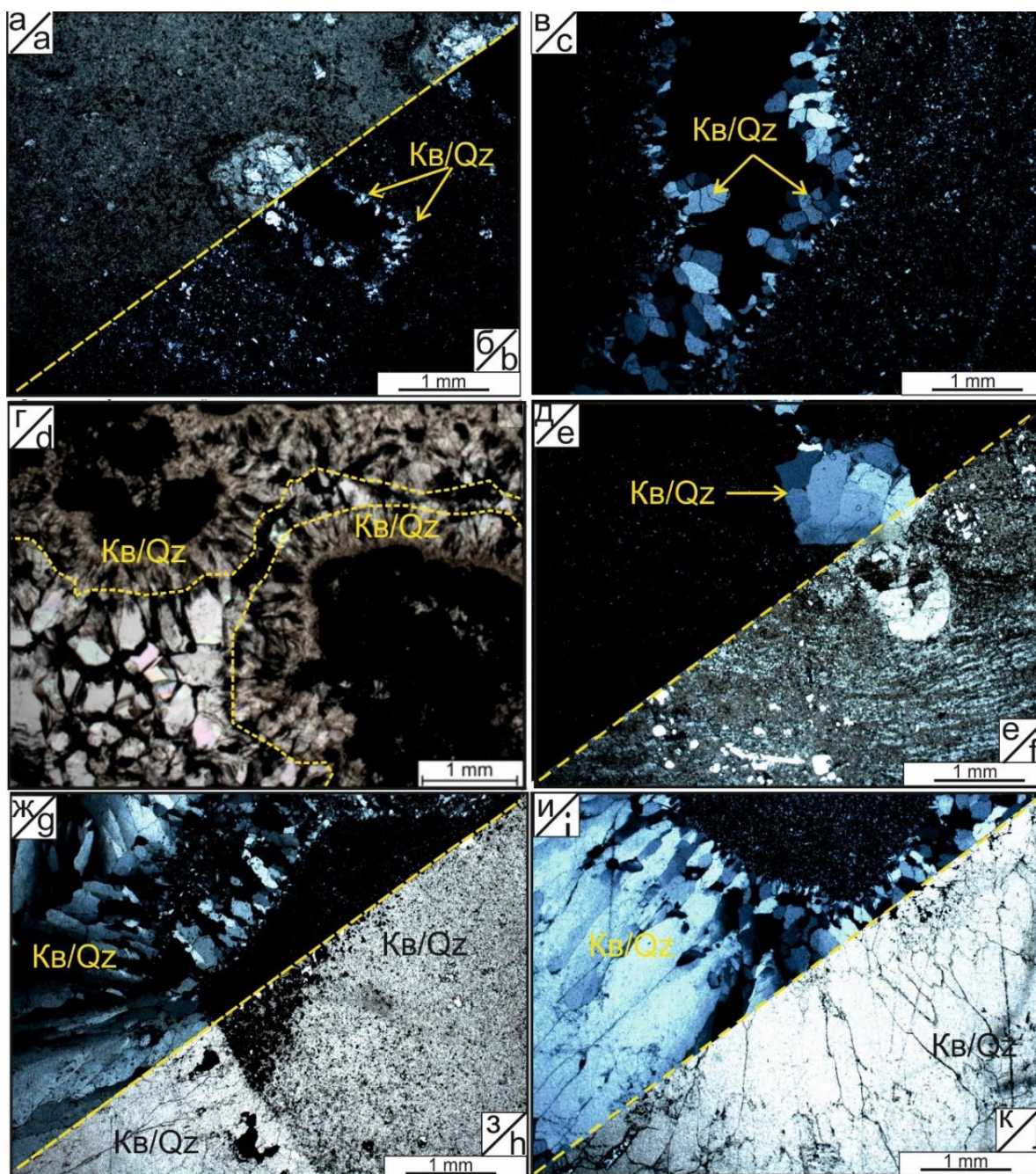


Рис. 5. Микрофотографии в проходящем (а, с, е, г, и) и отраженном (б, д, ж, и) свете текстурных особенностей жильного кварца (Кв): кристификационная (а–в); колломорфная (с); мозаичная (д, е); перистая (ж–к)

Fig. 5. Transmitted-light photomicrographs in plane- (a, d, f, h, j) and cross-polarized (b, c, e, g, i) light of vein quartz (Qz) textures: crustified (a–c); collomorphic (d); mosaic (e, f); feathery (g–j)

Тип эпитермального оруденения

Околорудный метасоматизм играет важную роль при установлении того или иного типа эпитермальных месторождений золота. Распространение вторичных кварцитов (с преобладанием остаточного кавернозного кварца) и аргиллизитов (с преобладанием

алуниита, диккита и пиррофиллита) обычно характеризует «литокапы (lithocaps)», связанные с кислотно-сульфатными (HS) и умеренно-кислотными эпитермальными месторождениями (IS) [1, 2, 5, 10, 22–24]. Присутствие карбонатов в наименее измененных породах участка Эми является одним из свидетельств умеренно-кислотного режима (IS) [5, 25–28].

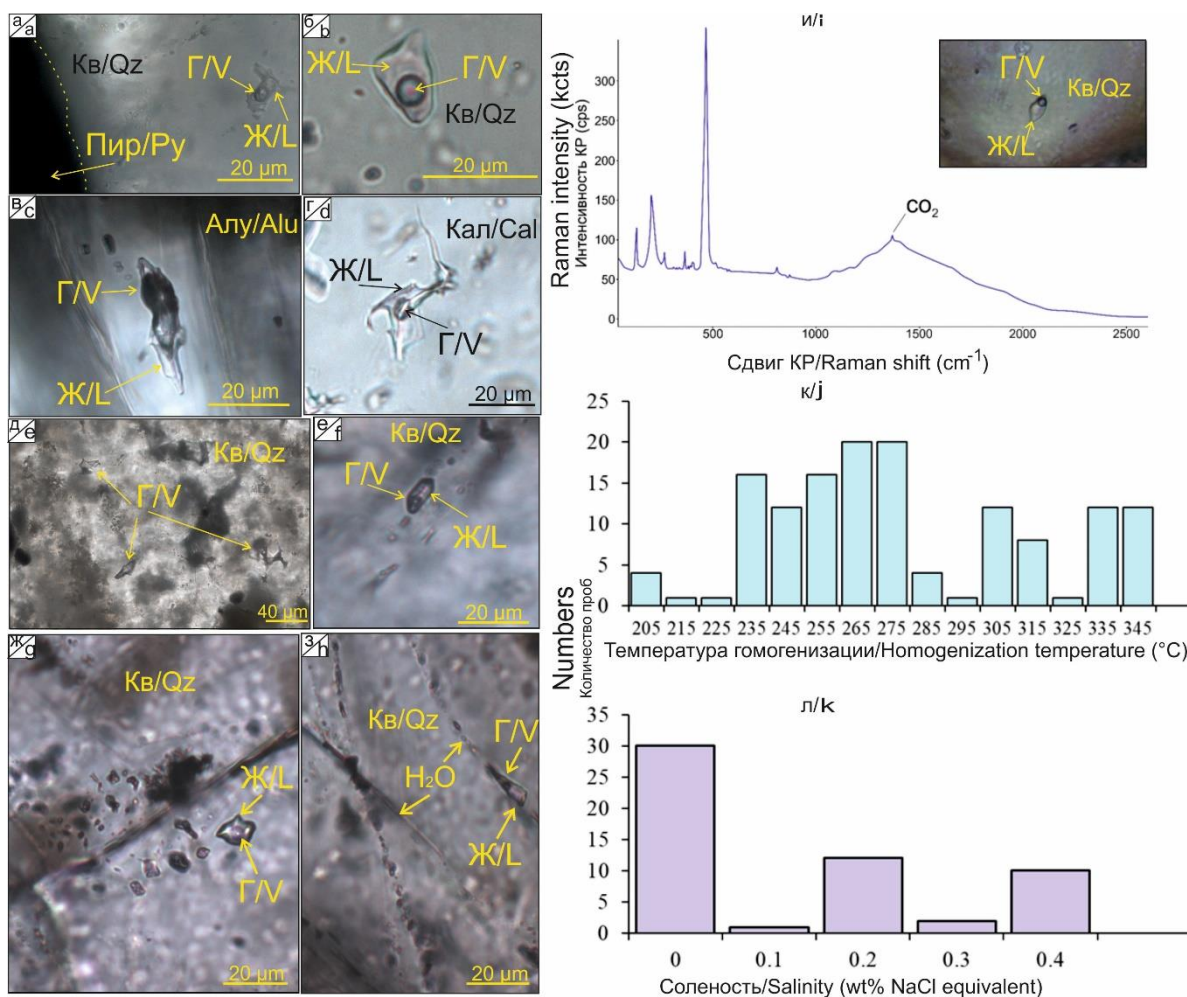


Рис. 6. Микрофотографии первичных газовой(Г)-жидких(Ж) (а–д) и газовых(Г) (д) включений, захваченных в кварце (Кв) (а, б), алуните (Алу) (в), кальците (Кал) (г) и вторичных газовой-жидких (е–з) и жидких (з) включениях, представленных водой (H₂O), изученных в пределах рудного поля Светлое; (и) рамановский спектр, соответствующий углекислому газу, отражающий состав газа вторичных газовой-жидких включений в кварце (Кв) (м. Елена). Суммарные диаграммы температур гомогенизации (к) и солености (л), полученные по включения рудного поля Светлое

Fig. 6. Microphotographs of primary vapor(V)-liquid(L) (a–d) and vapor(V) (e) fluid inclusions hosted in quartz (Qz) (a, b), alunite (Alu) (c) and calcite (Cal) (d), and secondary vapor-liquid (f–h) and liquid (h) inclusions, represented by water (H₂O), observed within the SED; Raman spectra of dioxide carbon reflecting gas composition of the secondary two-phase liquid and vapor rich inclusion (i) in quartz (d. Elena); summary histograms of (j) homogenization temperatures and (k) salinity for inclusions of the SED

Учитывая тот факт, что в пределах участка Елена широко развиты алунитовые и диккитовые кварциты, этот участок по набору метасоматически-измененных пород соответствует кислотно-сульфатному (HS) типу. При этом участок Эми характеризует небольшое количество алунитовых кварцитов и преобладание вторичных кварцитов и аргиллизитов (рис. 2, Б), где широко распространены такие филлосиликаты, как серицит и иллит, что наиболее характерно для промежуточного умеренно-кислотного эпитеермального (IS) типа. Преобладающими текстурами кварца являются колломорфная, мозаичная, крустификационная и перистая (эвгдральный кварц), характерные для HS-IS типов.

Типы эпитеермальных месторождений идентифицируются не только на основе состава метасоматически-измененных пород, но и главным образом на ос-

нове вещественного состава гипогенной сульфидной ассоциации [8].

Состав гипогенных сульфидов представлен главным образом сульфидами полиметаллов и теннантит-тетраэдритом, при этом типичные сульфиды, отвечающие кислотно-сульфатному (HS) типу, такие как энаргит, люционит, фаматинит, гипогенный ковеллин, установлены не были. Однако можно с определенной долей уверенности предположить, что (HS) гипогенные сульфиды могли быть эродированы на меньшей глубине или изменены до блеклых руд на современном уровне эрозионного среза в пределах участка Эми аналогично эпитеермальному рудному полю Саммитвиля (Колорадо) [29, 30] и согласно существующим представлениям о эпитеермальных системах в целом [21]. Содержание гипогенной сульфидной ассоциации в рудоносных жилах и прожилках

участка Эми более 5 %, что, согласно данным [27], характерный признак месторождений IS типа. По данным Ли Ванга [28] месторождения умеренно-кислотного типа зачастую имеют тесную связь с андезитом-дацитовыми вулканогенно-субвулканическими породами, образованными в субдукционных обстановках на глубинах от 300...1000 м как результат известково-щелочного магматизма. Температуры гомогенизации газовой-жидких включений варьируют в пределах от 150 до 350 °С аналогично полученным нами данным при проведении микрокриотермометрических экспериментов.

Таким образом, по особенностям проявления метасоматической зональности, ассоциации жильных минералов, вещественному составу гипогенных сульфидов и флюидному режиму эпitherмальное золоторудное поле Светлое относится к «кислотно-умеренно-кислотному сульфатному типу (HS-IS)» [31–33] аналогично Малетойвямскому полю центральной Камчатки [34–36], а также другим зарубежным аналогам, таким как месторождения Виктория-Лепанто (Филлиппинские острова) [37]; Ресковское рудное поле (Венгрия) [38]; Перама-Хилл (Греция) [39]; Зиншиан (Китай) [40, 41], Мах-Ад-Дахаб (Саудовская Аравия) [42], Зехабад (Иран) [43].

В определенных случаях с месторождениями HS-IS типа генетически связаны порфировые месторождения, которые являются корневыми частями единой гидротермальной системы [37–40].

Выводы

Зональность проявления гидротермальных изменений в пределах эпitherмального рудного поля Светлое имеет следующие основные особенности:

1. Схема метасоматической зональности эпitherмального рудного поля Светлое представлена следующей сменой метасоматитов от центральной

зоны к периферии: монокварциты → алунитовые кварциты → диккитовые кварциты → кварц-гидрослюдистые аргиллизиты → пропилиты.

2. Жильный кварц представлен четырьмя текстурными разновидностями – крустификационный, мозаичный, перистый (эвгедральный), колломорфный. Установленная микрозональность кварца (колломорфный → мозаичный → перистый) отражает многоактное (или пульсационное) поступление флюидов.
3. В пределах залежи вторичных кварцитов отмечается приуроченность колломорфного и перистого кварца к пористым и, реже, массивным монокварцитам. Мозаичный и крустификационный кварц встречаются во всех типах вторичных кварцитов.
4. Состав гипогенной сульфидной минерализации представлен сульфидами полиметаллов Cu, Pb, Zn, Fe в виде пирита, галенита, сфалерита, халькопирита и теннантит-тетраэдрита. В пределах участка Эми минеральная ассоциация сульфидов гидротермальной стадии составляет более 5 об. % и отличается разнообразием и обилием теллуридов.
5. Золотое оруденение представлено двумя типами: Au-Ag и Au-Ag-теллуридным. Au-Ag руды представлены первичными рудами со средней пробой ~900 ‰, развитыми в пределах участка Эми, вторичные (окисленные) руды с пробой до 1000‰ преобладают на участке Елена.
6. По вещественному составу измененных пород, гипогенной сульфидной ассоциации и флюидному режиму эпitherмальное поле Светлое относится к сульфатно- и умеренно-кислотному (HS-IS) типу, для которого характерна перспектива обнаружения порфирового оруденения на глубину.

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindgren W. Mineral deposits. – New York; London: McGraw-Hill Book Company, 1933. – 930 p.
2. White D.E. Thermal springs and epithermal ore deposits // *Economic Geology*. – 1955. – V. 55. – P. 99–154.
3. Henley R.W. Epithermal deposits in volcanic terranes // *Gold Metallogeny and Exploration*. – Glasgow: Blackie, 1991. – P. 133–164.
4. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features // *Mineral Deposits Division, Special Paper*. – Saint John's: Geological Association of Canada, 1993. – P. 403–417.
5. White N.C., Hedenquist J.W., Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration // *SEG Newsletter*. – 1995. – V. 23. – P. 1–9.
6. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // *Resource Geology*. – 1996. – V. 1. – P. 1–15.
7. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 245–277.
8. Sillitoe R., Hedenquist J. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // *Society of Economic Geologists Special Public.* – 2003. – V. 10. – P. 315–343.
9. Taylor B.E. Epithermal gold deposits // *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods /*

Ed. by W.D. Goodfellow. Mineral Deposits Division, Special Publication. – Saint John's, NL, Canada: Geological Association of Canada, 2007. – V. 5. – P. 113–139.

10. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines / Z. Chang, J.W. Hedenquist, N.C. White, D.R. Cooke, M. Roach, C.L. Deyell, J.Jr. Garcia, J.B. Gemmill, S. McKnight, A.L. Cuisson // *Economic Geology* – 2011. – V. 106. – P. 1365–1398.
11. Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration / D.R. Cooke, N.C. White, L. Zhang, Z. Chang, H. Chen // *Mineral Resources to Discovery – 14 th SGA Biennial Meeting*. – Quebec City, Canada, 2017. – V. 1. – P. 291–294.
12. Кигаи И.Н. Условия формирования метасоматитов и оруденения эпitherмальных золото-серебряных месторождений // *Геология рудных месторождений*. – 2020. – V. 62. – № 5. – P. 475–480.
13. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymetallic zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27: *Problems of Geology and Subsurface Development*. – P. 1–5.
14. Estimating gold-ore mineralization potential within Topolninsk ore field (Gorny Altai) / T. Timkin, V. Voroshilov, O. Askanakova, T. Cherkasova, A. Chernyshov, T. Korotchenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27: *Problems of Geology and Subsurface Development*. – P. 1–6.

15. The Okhotsk-Chukotka volcanic belt: age of its northern part according to new Ar-Ar and U-Pb geochronological data / P.L. Tikhomirov, V.V. Akinin, V.O. Ispolatov, P. Alexander, I.Y. Cherepanova, V.V. Zagoskin // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2006. – V. 14. – P. 524–537.
16. Late Mesozoic silicic magmatism of the North Chukotka area (NE Russia): age, magma sources, and geodynamic implications / P.L. Tikhomirov, E.A. Kalinina, K. Kobayashi, E. Nakamura // *Lithos*. – 2008. – V. 105. – P. 329–346.
17. Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А. Дистанционная прогнозно-поисковая модель эпitherмальных Au-Ag месторождений (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 84–92.
18. 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.
19. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. – Владивосток: Даль-наука, 2006. – 981 с.
20. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: application to exploration / D. Moncada, S. Mutchler, A. Nieto, T.J. Reynolds, J.D. Rimstidt, R.J. Bodnar // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2012. – V. 114. – P. 20–35.
21. Hedenquist J.W., Taran Y.A. Modeling the formation of advanced argillic lithocaps: Volcanic vapor condensation above porphyry intrusions // *Economic Geology*. – 2013. – V. 108. – P. 1523–1540.
22. Sillitoe R.H. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism // *Geological Society Special Publication*. – 1977. – V. 7 (1) – P. 99–116.
23. Sillitoe R.H. Epithermal models; genetic types, geometrical controls and shallow features // *Special Papers*. – Saint John's: The Geological Association of Canada, 1993. – P. 403–417.
24. Hedenquist J.W., Henley R.W. The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition // *Economic Geology*. – 1985. – V. 80. – P. 1379–1406.
25. Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid- sulfate and adularia-sericitic types // *Economic Geology*. – 1987. – V. 82. – P. 1–26.
26. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // *Publications Society of Economic Geologists News*. – 1995. – V. 1. – P. 9–13.
27. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold polymetallic Deposits and prospects / G.X. Song, K.Z. Qin, G.M. Li, L. Wang // *Acta Petrologica Sinica*. – 2018. – V. 34. – P. 748–762.
28. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification / L. Wang, K.Z. Qin, G.X. Song, G.M. Li // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 107. – P. 434–456.
29. Steven T.A., Ratte J.C. Geology and ore deposits of the Summitville District, San Juan Mountains, Colorado. United States Geological Survey Professional Paper. – Washington, NL, Canada: Geological Association of Canada, 1960. – V. 343. – 70 p.
30. Stoffregen R. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado // *Economic Geology*. – 1987. – V. 82. – P. 1575–1591.
31. Sillitoe R.H. Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in porphyry and epithermal environments // *AusIMM Proceedings* 306. – Bali: Indonesia, 1999. – P. 19–34.
32. Arribas A. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid // *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*. – 1995. – V. 23. – P. 419–454.
33. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration / T.Yu. Yakich, Y.S. Ananyev, A.S. Ruban, R.Y. Gavrillov, D.V. Lesnyak, D.V. Levochskaia, O.V. Savinova, M.A. Rudmin // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 136. – 104257.
34. Au(Ag)-Se-Te-S-Cu-Sb-As-Bi mineralization at the Maletoyvayam deposit (Central Kamchatka, Russia) and physicochemical conditions of its formation / E.G. Sidorov, A.A. Borovikov, N.D. Tolstykh, D.S. Bukhanova, G.A. Palyanova, V.M. Chubarov // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – P. 1–19.
35. Shapovalova M., Tolstykh N., Bobrova O. Chemical composition and varieties of sulfosalts from gold mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 319. – P. 7–16.
36. Mustard gold of the gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia) / N.D. Tolstykh, G.A. Palyanova, O.V. Bobrova, E.G. Sidorov // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – P. 1–18.
37. Claveria R.J.R. Mineral paragenesis of the Lepanto copper and gold and the Victoria gold deposits, Mankayan Mineral District, Philippines // *Resource Geology*. – 2001. – V. 51. – P. 97–106.
38. Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu-Au-Ag deposit in the Reck ore complex, Hungary / A. Takács, F. Molnár, J. Turi, A. Mogessie, J.C. Menzies // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112. – P. 1461–1481.
39. Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrola Graben, NE Greece / P.C. Voudouris, V. Melfos, P.G. Spry, R. Moritz, C. Papavassiliou, G. Falalakis // *Mineralogy and Petrology*. – 2011. – V. 103. – P. 79–100.
40. Geology and fluid inclusion geochemistry of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, Fujian Province, SE China: implication for deep exploration targeting / J. Zhong, Y.-J. Chen, J. Chen, J.-P. Qi, M.-C. Dai // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – V. 184. – P. 49–65.
41. Spatial distribution and variation of ore body, alteration and ore-forming fluid of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, SE China: implication for mineral exploration / J.-Y. Pan, P. Ni, Z. Chi, Y.-L. Yang, S.-N. Li, T. Bao, W.-B. Wang, W. Zeng, K. Xue // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2018. – V. 18. – P. 279–293.
42. Geology, mineralogy and genesis of the world-class Mahd Adh Dhahab epithermal Au-(Ag)-telluride deposit, Kingdom of Saudi Arabia / S.A. El-shafei, K.M. Abdel-Maksoud, H.M. Helmy, A.H. Ahmed // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – V. 201. – 104510.
43. Shabazi S., Ghaderi M., Alfonso P. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran // *Turkish Journal of Earth Sciences*. – 2019. – V. 28. – P. 882–901.

Поступила 25.08.2021 г.

Информация об авторах

Левочская Д.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; начальник отдела поисковых работ Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК».

Якич Т.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лесняк Д.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; начальник управления минерально-сырьевых ресурсов Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК».

Ананьев Ю.С., доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.113

HYDROTHERMAL-ALTERED ZONING, FLUID CONDITIONS, AND TYPES OF GOLD MINERALIZATION WITHIN THE ELENA AND EMMY DEPOSITS OF THE EPITHERMAL SVETLOE ORE DISTRICT (KHABAROVSK TERRITORY)

Darya V. Levochskaya^{1,2},
levochskayaDV@polymetal.ru

Tamara Yu. Yakich¹,
cherkasovatu@tpu.ru

Dmitry V. Lesnyak^{1,2},
lesnyakdv@polymetal.ru

Yuriy S. Ananiev¹,
AnanyevYS@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch,
18, Muravev-Amursky street, Khabarovsk, 680000, Russia.

The relevance of the study is determined by obtaining new data concerning mineral composition, textural and structural features, hydrothermal-metasomatic zoning, fluid regime, and types of gold mineralization of two most contrasting areas of the Svetloe epithermal district (Khabarovsk Territory), formed in different-aged parent rocks of the Late Cretaceous age (K_2) of the Khetanian Formation basic composition in the Cognac-Santonian Stage (d. Emmy) and discordant bedding felsic rocks of the Urak Formation of the Campanian-Maastrichtian Stage (d. Elena). The selected objects are characterized by different levels of zone erosion and most fully reflect the diversity of altered rocks of the Svetloe epithermal district. Altered rock represented by weakly altered rocks of the Khetanian Formation within the Emmy deposit and strongly altered, including hypogene processes, acidic rocks prevailing on the territory of the Elena deposit. The data obtained play an important role in establishing the type of epithermal deposits, forecasting mineralization at depth, and can also be used to identify search criteria and features of similar objects both in the Okhotsk-Chukotka volcanic belt and beyond. The **aim** of this work is to study the hydrothermal-metasomatic zoning, material composition, textural and structural features, fluid regime, as well as the forms of gold occurrence in the Svetloe epithermal ore district using the Emmy and Elena deposits as example. The **objects** of the study are ores, metasomatites and weakly altered parental rocks in the form of core, ore and chipped samples taken as a result of research work from eight wells and two operating open pits. The rocks were studied by optical and electron microscopy **methods** using energy dispersive spectroscopy, as well as by X-ray diffraction analysis, microthermometry, and Raman spectrometry. As a **result** of the studies, it has been established that the altered zoning of the Svetloe epithermal district includes an axial zone of residual quartz with various texture and structural features – mosaic, feathered, collomorphic, and crustifying structure and a halo of interbedded linearly elongated zones of altered rocks composed of alunite-and dickite-quartz zone, which are replaced at more distance from the axial zone by sericite and illite-chlorite zones of the propylite formation, with a lesser degree of elaboration of volcanic and volcanic-clastic rocks of the acid composition of the Urak Formation, the ore-containing area of the Elena, and of intermediate and basic composition including the Emmy deposit. The main part of mineralization is associated with the residual quartz zone. The morphology of ore bodies is represented by sub-layer linear keeled deposits with mushroom-like swells in paleo-grooves up to 110 m. The average thickness of ore bodies varies from 12 to 60 m, up to 700 m long, and 100...240 m wide. The fall of the ore zones is gentle, steep near the paleo-grooves with uneven or very uneven distribution of the valuable component. The average grade of gold in ores is 2,5 g/t. The composition of hypogene sulfide mineralization is represented by sulfides of polymetals Cu, Pb, Zn, Fe in the mineral form of pyrite, galena, sphalerite, chalcopyrite, and tennantite-tetrahedrite. Within the ore bodies of the Emmy deposit, the mineral association of sulfides of the hydrothermal stage is more than 5 vol. % and distinguished by the diversity and abundance of tellurides. Gold mineralization is represented by two types: Au-Ag and Au-Ag-telluride. Au-Ag ores are represented by primary ores with an average fineness of ~900 ‰ developed within the Emmy deposit and secondary (oxidized) ores with a fineness of up to 1000 ‰ prevailing at the Elena deposit. According to the results of the study of vapor-liquid inclusions in quartz, the hydrothermal-ore process at the Emmy deposit proceeded at 260...330 °C. Microcryothermometric experiments of the Elena deposit indicate the 200...240 °C range of the hydrothermal process. In terms of the material composition of altered rocks, hypogene sulfide association, and fluid regime, the Svetloe epithermal district belongs to the sulfate-acid and medium-acid (HS-IS) type, showing the prospect of detecting porphyry mineralization at depth.

Key words:

Hydrothermal-altered zoning, epithermal gold deposits, textural and structural features, fluid conditions, Svetloe epithermal ore district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

The research was carried out within the TPU Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. Lindgren W. *Mineral deposits*. New York, London, McGraw-Hill Book Company, 1933. 930 p.
2. White D.E. Thermal springs and epithermal ore deposits. *Economic Geology*, 1955, vol. 55, pp. 99–154.
3. Henley R.W. Epithermal deposits in volcanic terranes. *Gold Metallogeny and Exploration*. Glasgow, Blackie, 1991. pp. 133–164.

4. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features. *Special Paper*. Saint John's, Geological Association of Canada, 1993. pp. 403–417.
5. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, 1995, vol. 1, pp. 9–13.
6. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White, N.C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Resource Geology*, 1996, vol. 1, pp. 9–13.
7. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 245–277.
8. Sillitoe R., Hedenquist J. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Public*, 2003, vol. 10, pp. 315–343.
9. Taylor B.E. Epithermal gold deposits. *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Ed. by W.D. Goodfellow. Mineral Deposits Division, Special Publication; Saint John, NL, Canada, Geological Association of Canada, 2007. Vol. 5, pp. 113–139.
10. Chang Z., Hedenquist J.W., White N.C., Cooke D.R., Roach M., Deyell C.L., Garcia J., Jr., Gemmill J.B., McKnight S., Cuisson A.L. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 1365–1398.
11. Cooke D.R., White N.C., Zhang L., Chang Z., Chen H., Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration. *Mineral Resources to Discovery – 14th SGA Biennial Meeting*. Quebec City, Canada, 2017. Vol. 1, pp. 291–294.
12. Kigay I.N. Conditions for the formation of metasomatites and mineralization of epithermal gold-silver deposits. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, Iss. 5, pp. 475–480. In Rus.
13. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymetallic zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. *Problems of Geology and Subsurface Development*. pp. 1–5.
14. Timkin T., Voroshilov V., Askanakova O., Cherkasova (Yakich) T., Chernyshov A., Korotchenko T. Estimating gold-ore mineralization potential within Topolninsk ore field (Gorny Altai) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. *Problems of Geology and Subsurface Development*. pp. 1–6.
15. Tikhomirov P.L., Akinin V. V., Ispolatov V.O., Alexander P., Cherepanova I.Y., Zagoskin V.V. The Okhotsk-Chukotka volcanic belt: age of its northern part according to new Ar-Ar and U-Pb geochronological data. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2006, vol. 14, pp. 524–537.
16. Tikhomirov P.L., Kalinina E.A., Kobayashi K., Nakamura E. Late Mesozoic silicic magmatism and metallogeny of the North Chukotka area (NE Russia): age, magma sources, and geodynamic implications. *Lithos*, 2008, vol. 105, pp. 329–346.
17. Ananyev Y.S., Zhitkov V.G., Potseluev A.A. Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field svetloe, Khabarovskiy kray). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 84–92. In Rus.
18. Mishin L.F. Secondary quartzites and their relation to gold ore mineralization of the Svetloye deposit (Ulya trough, Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt). *Russian journal of pacific geology*, 2011, vol. 30, pp. 32–48. In Rus.
19. *Geodinamika, magmatism i metallogeniya Vostoka Rossii* [Geodynamics, magmatism, and metallogeny of the Russian East]. Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2006. 981 p.
20. Moncada D., Mutchler S., Nieto A., Reynolds T.J., Rimstidt J.D., Bodnar R.J. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 114, pp. 20–35.
21. Hedenquist J.W., Taran Y.A., Modeling the formation of advanced argillic lithocaps: Volcanic vapor condensation above porphyry intrusions. *Economic Geology*, 2013, vol. 108, pp. 1523–1540.
22. Sillitoe R.H. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism. *Geological Society Special Publication*, 1977, vol. 7 (1), pp. 99–116.
23. Sillitoe R.H. Epithermal models; genetic types, geometrical controls and shallow features. *Special Papers*. Saint John's, The Geological Association of Canada, 1993. pp. 403–417.
24. Hedenquist J.W., Henley R.W. The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology*, 1985, vol. 80, pp. 1379–1406.
25. Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid- sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 1–26.
26. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Publications Society of Economic Geologists News*, 1995, vol. 1, pp. 9–13.
27. Song G.X., Qin K.Z., Li G.M., Wang L. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold polymetallic deposits and prospects. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, vol. 34, pp. 748–762.
28. Wang L., Qin K.Z., Song G.X., Li G. M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 434–456.
29. Steven T.A., Ratte J.C. Geology and ore deposits of the Summitville District, San Juan Mountains, Colorado. *United States Geological Survey Professional Paper. 343*, Washington, NL, Canada, Geological Association of Canada, 1960. 70 p.
30. Stoffregen R. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 1575–1591.
31. Sillitoe R.H. *Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in porphyry and epithermal environments* [AusIMM Proceedings 306]. Bali, Indonesia, 1999. pp. 19–34.
32. Arribas A. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, vol. 23, pp. 419–454.
33. 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 Geol. Rev.*, 2021, vol. 136, 104257.
34. Sidorov E.G., Borovikov A.A., Tolstykh N.D., Bukhanova D.S., Palyanova G.A., Chubarov V.M. Au(Ag)-Se-Te-S-Cu-Sb-As-Bi mineralization at the Maletoyvayam deposit (Central Kamchatka, Russia) and physicochemical conditions of its formation. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–19.
35. Shapovalova M., Tolstykh N., Bobrova O. Chemical composition and varieties of sulfosalts from gold mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 319, pp. 7–16.
36. Tolstykh N.D., Palyanova G.A., Bobrova O. V., Sidorov E.G. Mustard gold of the gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia). *Minerals*, 2019, vol. 9, pp. 1–18.
37. Claveria R.J.R. Mineral paragenesis of the Lepanto copper and gold and the Victoria gold deposits, Mankayan Mineral District, Philippines. *Resource Geology*, 2001, vol. 51, pp. 97–106.
38. Takács Á., Molnár F., Turi J., Mogessie A., Menzies J.C. Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu-Au-Ag deposit in the Recsk ore complex, Hungary. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, pp. 1461–1481.
39. Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Moritz R., Papavassiliou C., Falalakis G. Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrota Graben, NE Greece. *Mineralogy and Petrology*, 2011, vol. 103, pp. 79–100.
40. Zhong J., Chen Y.-J., Chen J., Qi J.-P., Dai M.-C. Geology and fluid inclusion geochemistry of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, Fujian Province, SE China: implication for deep exploration targeting. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 184, pp. 49–65.
41. Pan J.-Y., Ni P., Chi Z., Yang Y.-L., Li S.-N., Bao T., Wang W.-B., Zeng W., Xue K. Spatial distribution and variation of ore body, alteration and ore-forming fluid of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, SE China: implication for mineral exploration.

- Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2018, vol. 18, pp. 279–293.
42. El-shafei S.A., Abdel-Maksoud K.M., Helmy H.M., Ahmed A.H. Geology, mineralogy and genesis of the world-class Mahd Adh Dhahab epithermal Au-(Ag)-telluride deposit, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, vol. 201, 104510.
43. Shahbazi S., Ghaderi M., Alfonso P. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2019, vol. 28, pp. 882–901.

Received: 25 August 2021.

Information about the authors

Darya V. Levochskaya, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; head of prospecting geological works department, JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch.

Tamara Yu. Yakich, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry V. Lesnyak, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; head of Mineral resources department, JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch.

Yuriy S. Ananiev, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.