ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Asthe

Левочская Дарья Валентиновна

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЭПИТЕРМАЛЬНОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СВЕТЛОЕ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук

1.6.10 - Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения

Томск - 2024

образования учреждении высшего политехнический университет»

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном «Национальный исследовательский Томский

Научный руководитель:

Мазуров Алексей Карпович

доктор геолого-минералогических наук, отделения геологии Инженерной профессор природных ресурсов Национального школы исследовательского Томского политехнического университета

Официальные оппоненты:

Толстых Надежда Дмитриевна

доктор геолого-минералогических наук, ведущий сотрудник Федерального научный государственного бюджетного учреждения науки института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН)

Белогуб Елена Витальевна

геолого-минералогических доктор наук, заместитель директора по научной работе Южнофедерального Уральского научного центра минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук (ЮУ ФНЦ МиГ УрО PAH)

Защита состоится «13» марта 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.28 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 73, 111 аудитория, «Томский политехнический университет, корпус № 1».



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « » января 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.28 кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Якич Тамара Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

<u>Актуальность исследования</u> обусловлена, с одной стороны, благоприятной конъюнктурой, сложившейся на мировом рынке золота, так как оно является стратегическим ресурсом каждой страны, поскольку представляет собой важный актив финансово-экономической системы, от которого зависят экономическое положение государств и валют, определяющееся золотовалютными запасами. Геополитическая напряженность и, как следствие, экономическая неопределённость, способствует сохранению положительной динамики цен на драгоценный металл, так как золото является инструментом сохранения финансовых активов и консервативного инвестирования.

С другой стороны, важным является фактор истощения минерально-сырьевой базы традиционных типов золотых руд, известных объектов, целых добывающих регионов, что приводит к перенесению фокуса внимания на новые типы минерального сырья и недостаточно изученные регионы, такие как Дальний Восток России.

Золотосеребряные эпитермальные месторождения Тихоокеанского рудного пояса известны и эксплуатируются в Северной и Южной Америке, Новой Зеландии, Японии, на островах Фиджи, Суматра, Ява, Сулавеси, в Папуа-Новой Гвинее, на Филиппинах и Северо-Востоке России. Значительная удалённость месторождений Северо-Востока России от энергетической и транспортной инфраструктуры, низкие средние содержания благородных металлов не позволяли рассматривать их в качестве минерально-сырьевой базы золота в предыдущие периоды. Однако, совершенствование технологий цианистого кучного выщелачивания: подача подогретых растворов, использование высокотехнологичных подложек под штабель, исключающих влияние многолетнемерзлых пород; конъюнктура рынка, позволяющая вовлекать в отработку руды с весьма низкими содержаниями полезного компонента – делают месторождения указанного типа привлекательными для эксплуатации.

Поэтому, учитывая относительно слабую опоискованность российского сегмента вулканогенных поясов Тихоокеанского кольца, проблема прогнозирования, оценки и изучения является одной из актуальных задач для расширения минерально-сырьевой базы региона.

<u>Целью</u> настоящей работы является изучение вещественного состава и условий формирования Au-Ag месторождения Светлое, выделение закономерностей, признаков и критериев рудоносности, пригодных для локального прогноза в пределах перспективных поисковых площадей.

<u>Задачи:</u>

1. Определить главные минеральные ассоциации и этапы рудообразования, на основе комплексного анализа вещественного состава руд и метасоматитов с помощью традиционного минералого-петрографического подхода и прецизионных способов исследования вещества.

2. Реконструировать термодинамические условия формирования месторождения Светлое, определить типы эпитермального оруденения.

3. Разработать генетическую модель формирования месторождения Светлое, выделить признаки и критерии рудоносности.

<u>Фактический материал.</u> Основой работы является каменный материал, отобранный в ходе полевых работ 2019 года: образцы вмещающих пород и руд (> 700), отобранных из керна скважин колонкового бурения и бортов карьеров рудных зон Тамара, Лариса, Людмила, Елена, Эми эпитермального золоторудного месторождения Светлое (недропользователь ООО «Светлое», входит в АО «Полиметалл УК»). Положения работы базируются на аналитических данных и литературных материалах. Автором выполнен минераграфический и петрографический анализы полированных шлифов и аншлифов (> 300 препаратов), обработаны данные сканирующей электронной микроскопии с локальным

рентгеноспектральным анализом (> 200 препаратов), микрометрии и Рамановской спектрометрии двуполированных пластин (> 50 препаратов), рентгенодифракционного анализа (> 50 препаратов), инфракрасной спектрометрии, термического анализа (около 100 определений). Анализ полученных результатов выполнен с применением опубликованных литературных источников, фондовых материалов по месторождению Светлое и его окрестностям. Графическое представление и обработка данных исследования выполнены с применением программных комплексов Microsoft Office, Corel Draw Graphics Suite 2020, ArcMap 10.8.1.

<u>Личный вклад автора</u> заключается в постановке цели и задач, выборе методики исследований, в организации, непосредственном участии в полевом этапе исследований, отборе проб, описании шлифов, аншлифов. Автором сформулированы защищаемые положения, проведена статистическая обработка и обобщение полученных результатов, которые изложены в диссертационной работе.

Основные защищаемые положения

- 1. Оруденение эпитермального месторождения Светлое приурочено к зонально построенным телам вторичных кварцитов, образованных в вулканитах среднего и основного состава хетанинской свиты (*K*₂*ht*), вмещающих рудную зону Эми и кислых вулканитах уракской свиты (*K*₂*ur*), с которыми связаны рудые зоны Людмила, Тамара, Елена и Лариса. Оруденение представлено тремя минеральными ассоциациями (ступенями): пирит-кварцевой, голдфилдит-пирит-кварцевой, золото-серебро-теллуридно-полиметаллической.
- 2. Ранние минеральные ассоциации месторождения Светлое: пирит-кварцевая и голдфилдит-пирит-кварцевая сформировались при воздействии кислотносульфатных растворов (НS-тип) с последующим отложением золото-серебротеллуридно-полиметаллической продуктивной ассоциации (IS-тип), сопровождающейся обилием теллуридов и самородного теллура. Аu-Ag и Au-Ag-Te типы оруденения проявлены в поздней продуктивной минеральной ассоциации и продуктах ее переотложения при процессах гипергенеза.
- 3. Разработана генетическая модель формирования месторождения Светлое, характеризующаяся следующими параметрами: оруденение формировалось при температурах 337-205°С, при давлении 20-140 бар, из флюида низкой солёности (0-0.18 мас. % NaCl-эквивалент), связанного со становлением уракской вулканоплутонической системы. Месторождение характеризуется составом руд и метасоматитов, специфичных для эпитермального кислотно-умеренно-сульфатного оруденения.

<u>Научная новизна полученных результатов</u>. Впервые разработана парагенетическая схема основных минеральных ассоциаций в соответствии с этапами рудообразования месторождения Светлое. Установлен термодинамический режим образования рудных зон, определены типы эпитермального благороднометального оруденения.

Установлены закономерности локализации, критерии и признаки золотого эпитермального оруденения, характерные для месторождения Светлое, которые могут быть использованы для прогнозирования рудных зон как в пределах поисковых площадей Ульинского прогиба Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса, так и за его пределами.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы на стадии прогнозирования, поисков и оценки эпитермальных объектов кислотносульфатного и умеренно-кислотного типов Уенминского рудно-россыпного узла и других районов.

<u>Апробация работы и публикации</u>. По теме диссертации опубликованы 4 печатных работы, в том числе в рецензируемых изданиях, включенный в перечень ВАК и базу данных Wos/Scopus – 3 публикации. Положения диссертации были представлены на XXV, XXVI,

ХХVII Международных симпозиумах им. академика А.М. Усова (г. Томск), XII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (ЦНИГРИ, г. Москва), Годичном собрании Российского минералогического общества «Минералого-геохимические исследования для решения проблем петро- и рудогенеза, выявления новых видов минерального сырья и их рационального использования» и Фёдоровской сессии (Санкт-Петербургский горный университет).

Результаты исследований включены в технический отчёт, изложены в статье корпоративного журнала и продемонстрированы в рамках постоянно действующего геологического совещания при заместителе генерального директора по минеральносырьевым ресурсам АО «Полиметалл УК». Сформулированные критерии и рекомендации использованы сотрудниками геологической службы Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК» в прогнозно-поисковых работах в пределах Ульинского прогиба (Охотский район, Хабаровский край). Часть диссертационных исследований выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW–2023–0010).

<u>Объём и структура работы</u>. Диссертационная работа общим объёмом 170 страниц состоит из введения, текста 9 глав, заключения, содержит 77 рисунков и 24 таблицы.

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, приведены цель и задачи работы. В *первой главе* дан аналитический обзор истории ранее проведённых на месторождении Светлое работ, выделены 4 этапа изучения геологического строения, вещественного состава руд и вмещающих оруденение пород. Во второй главе приведена методика выполненных исследований. Третья глава содержит информацию 0 геологическом строении и геолого-структурной позиции месторождения Светлое. В четвертой главе приведены данные о гидротермально-метасоматических образованиях, детально описана метасоматическая зональность, характеризующая особенности пяти рудных зон месторождения. Пятая глава содержит результаты изучения минералогогеохимических особенностей рудной минерализации. Детально описаны типоморфные особенности, химический состав, минеральная зональность. Шестая глава включает информацию об условиях образования месторождения Светлое, результаты исследований газово-жидких включений, реконструкцию термодинамического режима формирования рудных зон месторождения Светлое. В седьмой главе приведены данные об установленных минеральных ассоциациях, описаны последовательность и выявленные закономерности процессов минералообразования. В результирующей части представлены парагенетическая минералообразования. В восьмой главе описаны метасоматические. схема минералогические и термодинамические критерии рудоносности месторождения Светлое, описан алгоритм интеграции выявленных критериев в прогнозно-поисковый комплекс работ. В девятой главе приведена схематическая генетическая модель формирования эпитермального месторождения Светлое. В заключении перечислены основные выводы, подведены итоги исследования.

Благодарности. Автор работы благодарна за поддержку, помощь в разработке темы диссертационного исследования научному руководителю д. г.-м. н., профессору Мазурову Алексею Карповичу. Автор глубоко признательна д. г.-м. н. Ананьеву Юрию Сергеевичу, к. г.-м. н. Савиновой Олесе Вячеславовне, к. г.-м. н. Рудмину Максиму Андреевичу, к. г.-м. н. Рубану Алексею Сергеевичу за помощь в организации, выполнении и бесценные советы при написании текста разделов диссертации. Особую благодарность автор выражает к. г.-м. н. Якич Тамаре Юрьевне за бесконечную поддержку, мотивацию, консультации, совокупность которых привела к завершению работы. Автор благодарит сотрудников компании АО «Полиметалл УК»: заместителя генерального директора по минерально-сырьевым ресурсам Трушина Сергея Ивановича и директора дирекции геологоразведочных проектов Хабаровского филиала к.г.-м.н. Лесняка Дмитрия Викторовича за предоставление возможности выполнения диссертационного исследования.

Краткий геологический очерк месторождения Светлое

Месторождение Светлое расположено в 220 км к юго-западу от п. Охотск (Хабаровский край) и входит в состав Ульинской минерагенической зоны Охотско-Чукотской минерагенической провинции. Месторождение Светлое приурочено к Ульинскому прогибу, сложенному меловыми вулканическими образованиями Охотско-Чукотского вулканического пояса (Tikhomirov, 2006, 2008; Аананьев, 2019) и занимает две палеовулканические структуры центрального типа (рис. 1). Эти вулканические постройки разновозрастные – северо-западная (вмещает рудную зону Эми) хетанинского времени, а юго-восточная, более молодая, (рудные зоны Елена, Тамара, Людмила и Лариса) – уракского времени. Хетаниская свита представлена андезитами, андезибазальтами, их агломератовыми лавами, реже туфами. Наиболее широко развиты пироксеновые андезиты. Уракская свита несогласно залегает на размытых породах хетанинской свиты. Она сложена стекловатыми и кислыми породами риолитового состава, дацитами, игнимбритами, а также различными туфами и туфолавами (рис. 1). Положение палеовулканических построек контролируется сопряжения Дюльбакинского разлома северо-восточного узлом простирания с разломами северо-западного простирания. Ореол метасоматическиизмененных пород, в том числе вторичных кварцитов имеет площадь около 30 км². Области промышленно-значимой золотой минерализации контролируются зонами сочленения кольцевых разломов и кальдер проседания с разломами северо-западного простирания (Мишин, 2011; Ананьев, 2019; Лесняк, 2023; Левочская, 2023).



Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Светлое. Карта составлена с использованием материалов (Ананьев, 2015), (Колесников, 2006) и Новосёлова Б.А.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Оруденение эпитермального месторождения Светлое приурочено к зонально построенным телам вторичных кварцитов, образованных в вулканитах среднего и основного состава хетанинской свиты (K2ht), вмещающих рудную зону Эми, и кислых вулканитах уракской свиты (K2ur), с которыми связаны рудые зоны Людмила, Тамара, Елена и Лариса. Оруденение представлено тремя минеральными ассоциациями (ступенями): пирит-кварцевой, голдфилдит-пирит-кварцевой, золотосеребро-теллуридно-полиметаллической.

Рудовмещающие гидротермально-метасоматические породы месторождения Светлое развиваются по вулканитам среднего, основного состава (рудная зона Эми) (рис. 2) и кислого состава (рудые зоны Людмила, Тамара, Елена и Лариса) (рис. 2). Петрографическим анализом изучено более 300 образцов керна скважин с установлением кварциты следующих метасоматитов: вторичные (монокварииты, алунитовые, диккитовые, алунит-диккитовые, серицитовые), кварц-карбонатные и кварц-иллитовые метасоматиты. Вторичные кварциты, вмещающие рудные тела месторождения Светлое, слагают разобщенные зонально построенные, в плане многослойные залежи неправильной вытянутой формы, имеющие наклонное залегание (рис. 3,4). Осевые части рудовмещающих залежей сложены монокварцитами, серицитовыми и диккитовыми кварцитами, которые подразделяются по текстурным особенностям на массивные, брекчированные и пористые разности. Наибольшее распространение имеют пористые монокварииты, поровое пространство в которых может оставаться пустым, либо быть заполненным друзовым кварцем, рудной минерализацией, сульфатами, филлосиликатами и др. (рис. 3,4).



Рис. 2. Схематическая карта метасоматической зональности м. Светлое, составленная автором

Рудовмещающие метасоматиты. локализованные в породах среднего и основного состава хетанинской свиты (рудная зона Эми) представлены преимущественно монокварцитами, в том числе их брекчированными разностями, в меньшей степени диккитовыми и серицитовыми кварцитами, частично алунитовыми кварцитами (рис. 3). Брекчированные монокварциты, диккитовые и алунитовые кварциты развиты в виде линз. Серицитовые кварциты и серицит-кварцевые метасоматиты закартированы в виде прослоев среди вторичных кварцитов и на периферии монокварцитовой залежи (рис. 3). Основная масса пород сложена аллотриоморфнозернистым, микрозернистым (0.01-0.02 мм) кварцем (I) околорудной стадии. В межзерновом пространстве отмечается развитие глинистых минералов: диккита и каолинита. Среди кварц-глинистого агрегата выделяются включения веерообразных скоплений позднего серицита.



Рис. 3. Схематический геологический разрез, составленный автором, фотографии штуфных проб и микрофотографии шлифов, демонстрирующие рудовмещающие гидротєрмально-метасоматические разности и морфологию рудных тел рудной зоны Эми

Рудовмещающие метасоматиты, развитые по вулканитам кислого состава уракскской свиты, вмещающие рудные зоны Людмила, Тамара, Елена и Тамара наиболее полно проявлены в рудной зоне Елена, приуроченной к центральной части вулканической постройки уракского времени, ввиду чего эта рудная зона выбрана автором в качестве эталонной (Рис. 4). Исходя из проанализированного каменного материала околорудные изменения вмещающих пород рудной зоны Елена представлены, главным образом, вторичными кварцитами (монокварцитами и брекчированными кварцитами), алунитовыми и диккитовыми кварцитами, а также их окисленными и переходными разностями.

Монокварцитовые залежи переслаиваются И обрамляются алунитовыми кварцитами, при этом на локальных участках отмечается переход монокварцитов к диккитовым, алунит-диккитовым и алунитовым кварцитам (Рис. 4). Диккитовые залежи подстилаются кварц-иллитовыми метасоматитами (содержание кварца не превышает 30%). Монокварциты в целом аналогичны описанным в пределах рудной зоны Эми. На рудной зоне Елена развита зона окисления мощностью до 120 м (Рис. 4), которая диагностируется по наличию минералов гипергенной эпохи: лимонита, ярозита, микасаита, диадохита. Алунит-диккитовые кварциты представляют переходные породы между алунитовыми и диккитовыми разностями. Диккитовые кварциты обрамляют залежи монокварцитов, а также образуют в них линзы. Рудовмещающими являются монокварциты (массивные, пористые, брекчированные), алунитовые кварциты, алунит-диккитовые кварциты, диккитовые кварциты.



Рис. 4. Схематический геологический разрез, составленный автором, фотографии штуфных проб и микрофотографии шлифов, демонстрирующие рудовмещающие гидротєрмально-метасоматические разности и морфологию рудных тел рудной зоны Елена

Оруденение месторождения Светлое представлено тремя минеральными ассоциациями (ступенями) гидротермального этапа: *пирит-кварцевой*, голдфилдит-пирит-кварцевой и продуктивной золото-серебро-теллуридно-полиметаллической.

Околорудная стадия минералообразования месторождении на Светлое характеризуется развитием пирит-кварцевой ассоциации (рис. 5, а-б), которая установлена для всех рудных зон месторождения и является наиболее ранней в гидротермальном процессе. Квари первой генерации (I) аллотриоморфнозернистый, микро-, реже мелкозернистый, слагающий основную массу метасоматических пород, ассоциируя зачастую с диккитом и алунитом (Рис. 5, а-б). Среди кварцевой массы формируются мелкокристаллические (не более 10 мкм) скопления игольчатого рутила. Также в этой ассоциации встречается *пирит*, наличие примесей в котором ниже предела обнаружения ЭДС-рентгеноспектрального сканирующего электронного анализа микроскопа. Размерность кристаллов пирита этой ступени варьирует в пределах 20 мкм до 0.5 мм. Облик кристаллов *пирита* (I) кубический, местами выщелоченный, неправильный (Рис. 5, а-б).

<u>Гидротермальная рудная стадия</u> представлена двумя минеральными ассоциациями: голдфилдит-пирит-кварцевой и золото-серебро-теллуридно-полиметаллической.

Голдфилдит-пирит-кварцевая минеральная ассоциация характеризуется появлением специфичных минералов, таких как голдфилдит, хемусит, кавацулит, которые ассоциируют с кристаллическим *пиритом* (IIb), нарастающим на пирит колломорфного облика (IIa). В обеих разновидностях пирита этой ассоциации устанавливается значимая примесь меди (до 6 вес.%). Кристаллический пирит (IIb) характеризуется разнообразным внешним обликом: призматическим, тетраэдрическим, пентагондодекаэдрическим и др., отличным от кубической формы пирита (I). Облик кристаллов *пирита* (IIb) определяется глубине вертикальной зональностью: на отмечаются кристаллы пентагондодекаэдрического габитуса, тетраэдрические на средних глубинах И В приповерхностных условиях кристаллы пирита (IIb) становятся призматическими и обогащаются мышьяком.

Голдфилдит-пирит-кварцевая минеральная ассоциация проявлена в большей степени в пределах рудной зоны Эми (рис. 5, в-ж). Основным жильным минералом этой ассоциации является кварц коломорфного облика (Па) (моганит/кристаболит?) по данным



Рис. 5. Микрофотографии аншлифов в обратно-отраженных электронах сканирующего электронного микроскопа (Tescan Vega 3 SBU). (a-6) Кварц-пиритовая минеральная ассоциации в пределах рудной зоны Елена (скв. El0002, 53.6 м). Выщелоченный облик кристаллов пирита (I) околсрудной стадии в ассоциации с рутилом (Rt) в кварц (Qz I)-алунит (Alu)-диккитовом (Dck) агрегате. (6) Коломсрфные агрегаты Сисодержащего пирита (Col_PyCu_IIa) голдфилдит (Gf)-пирит-кварцевой минеральной ассоциации в пределах рудной зоны Эми; Взаимоотношения голдфилдит-пирит-кварцевой и золото-серебро-теллуридно-полиметаллической минеральных ассоциаций рудной зоны Эми. (г) Коломсрфный пирит (Col_PyCu_IIa) в тесной ассоциации с моганитом (Mog), обрастающий кристаллическим пиритом с голдфилдитом (Gf) и хемуситом (Hm) по краям обрастающие более поздними сильванитом (Syl), самородным теллуром (Native Te), теллуристым тетраэдритом (TtrTe), колсрадоитом (Clr) и продуктами их окисления (Ox_Sb_Te) в пустотах кристаллического кварца (Qz IIb); (д) Кристаллы голдфилдита (Gf), замещенные по зонам роста халькопиритом (Ccp), сильванитом (Sylv), мелонитом (Mel), галенитом (Gn), алтаитом (Alt) (Скв. AM0003, 38.2-46.4 м)

ренгенодифракционного анализа (рис. 6) и кварц кристаллический (IIb). *Пирит* (IIb) находится в тесной парагенетической связи с *хемуситом* (Рис. 5, г), голдфилдитом (Рис. 5, г), кавацулитом. Кристаллы голдфилдита характеризуются осцилляторной зональностью, отражающей неравномерное распределение As, Te, Sb, иногда Bi. По определенным зонам голдфилдита развивается поздняя наложенная *золото-серебро-теллуридно-полиметаллическая минеральная ассоциация* (рис. 5., д-ж).

Золото-серебро-теллуридно-полиметаллическая ассоциация завершает рудную стадию минералообразования и наиболее полно проявлена в пределах рудной зоны Эми (рис. 5, г-ж). Основными жильными минералами является кварц (III), мусковит, серицит, рудными – блеклые руды группы тетраэдрита, теллуриды, халькопирит, галенит, сфалерит, самородный теллур, самородное золото и разнообразные теллуриды золота.

2. Ранние минеральные ассоциации месторождения Светлое: пирит-кварцевая и голдфилдит-пирит-кварцевая сформировались при воздействии кислотносульфатных растворов (НS-тип) с последующим отложением золото-серебротеллуридно-полиметаллической продуктивной ассоциации (IS-тип), сопровождающейся обилием теллуридов и самородного теллура. Au-Ag и Au-Ag-Te гипы оруденения проявлены в поздней продуктивной минеральной ассоциации и продуктах ее переотложения при процессах гипергенеза.

Ранняя околорудная минеральная ассоциация месторождения Светлое, представлена пирит-кварцевой ступенью с набором жильных и рудных минералов, отлагающихся в условиях повышенной кислотности растворов, о чем свидетельствует набор таких жильных минералов как квари, алунит, диккит, (в пределах зоны Эми – пирофиллит), гипогенные каолинит и алюмосульфофосфаты вудхаузеит-крандаллитовой серии по данным ренгенодифракционного анализа (рис. 6.). Метасоматиты, развитые в пределах рудных зон Елена, Тамара, Лариса, Людмила, помимо перечисленных жильных минералов, содержат повышенное количество других сульфатов (барит, ярозит, микасаит, англезит и т.д.). Отсутствие адуляра и ограниченное распространение кальцита, спорадически отмечающегося в периферийных зонах месторождения, например, в пределах рудной зоны Лариса, позволяет сделать вывод о формировании околорудных метасоматитов месторождения Светлое в условиях повышенной кислотности фильтрующихся растворов согласно существующим представлениям об эпитермальных системах (Lindgren, 1933; White, 1955; Sillitoe, 1977, 1993; Hedenquist and Henley, 1985; Henley, 1991; White and Hedenquist, 1995; Sillitoe and Thompson, 1998; Heinrich, 2004; Chang, 2011; Cooke, 2017; Hedenquist, 2018; Melfos, 2019).

	Mineral		Depth(117.8m)	Depth(133.1m)
	Quartz	Qz	59.3	46.08
	Pyrite	Ру	3.74	23.74
	Pyrophyllite	Prl	8.65	19.25
	Moganite/Cristob	alite Mog	1.89	2.07
	Muscovite/Illite	Ms/Ilt	5.12	3.28
	APS	APS	0.2	3.69
	Kaolinite	Kln	11.85	1.89
	Dickite	Dck	7.14	0.00
	Sericite	Ser	2.11	0.00
	Summ, %		100.00	100.00
PV AND PV AND PV AND PV AND PV AND	Pri	Pri Kin Py	5 5 5 5 5 5	epth (133.1 m)
10 20	30 40 5	0 60	70 80	4/11 / 10 m)
10 20	30 40 3	0 00		

Гипогенные сульфиды голдфилдит-пиритквариевой минеральной ассоциации представлены колломорфным И кристаллическим медьсодержащим пиритом, голдфилдитом, хемуситом, кавацулитом. Гипогенный ковеллин, энаргит, люцонит, фаматинит, являющиеся индикаторными для оруденения кислотносульфатного (HS)-типа, диагностированы не были. Однако, автором с коллегами опубликовано в Ore Geology Reviews

Рис. 6. Рентгенограмма валового состава рудовмещающих метасоматитов рудной зоны Эми

(Yakich, 2021) предположение, что классические (HS)-гипогенные сульфиды могли быть эродированы на современном уровне эрозионного среза аналогично эпитермальному рудному полю Саммитвиля (Колорадо) (Steven, 1960; Stoffregen, 1987), м. Перама Хилл (Греция) (Voudouris, 2011; Repstock, 2015), м. Акупан (Филлипины) (Waters, 2011) и м. Эмперор (Фиджи) (Pals, 2003).

Золото-серебро-теллуридно-полиметаллическая минеральная ассоциация представляет результат нового импульса в развитии гидротермального этапа месторождения Светлое, о чем свидетельствуют взаимоотношения жильных минералов (появление крупнокристаллического кварца, мусковита/серицита, заполняющих трещины в

мелкозернистом кварце), а также замещение голдфилдита блёклыми рудами нормального ряда с халькопиритом, галенитом, теллуридами и самородным теллуром, специфичных для классических кислотно-сульфатных систем, но весьма распространенных в переходных системах (HS-IS типа) (Repstock, 2016; Voudouris, 2019).

Изучение химического состава и особенностей внутреннего строения отдельных минералов переменного состава как жильных, так и рудных в пределах месторождения Светлое позволили проследить эволюцию физико-химических условий минералообразования и выявить последовательность формирования оруденения.

Изучение сульфатов (барита) и алюмосульфофосфатов (AC Φ) – минералов группы алунита (Scott, 1987; Jambor, 1999, 2000; Keith, 2000; Mills, 2009), в том числе входящих в комплекс индикаторных минералов околорудных глинистых изменений «advanced argillic alteration» различных эпитермальных местрождений (Brimhall, 1983; Stoffregen, 1987) позволило проследить изменение условий становления месторождения Светлое с формированием переходных разностей AC Φ в пределах одних и тех же зерен, возникающих в результате воздействия на исходный апатит кислотных растворов с последующей их нейтрализацией в условиях неравновесной открытой системы. Аналогичные исследования минералов группы AC Φ из вторичных кварцитов Литошкинского проявления на Полярном Урале (Силаев, 2001) показали, что сванбергит и вудхаузеит образуют единую систему упорядоченных твердых растворов, в которых почти непрерывно и согласованно происходят изоморфные замещения как в катионной части (Ca, Sr, REE, Pb, Ba), так и анионных (P,S) подрешетках, позволяющие интерпретировать условия формирования месторождений и рудопроявлений во времени их становления.

АСФ месторождения Светлое диагностированы на глубине не менее ~ 120-150 м от современной поверхности, располагаясь как в *диккитовых*, так и *серицитовых кварцитах* в ассоциации с *пирофиллитом* (рудная зона Эми) (рис. 6). Они встречаются отдельно от *алунита* и *барита*, которые распространены в относительно приповерхностных условиях на глубине менее 50 м от современной поверхности. АСФ месторождения Светлое представлены серией *сванбергита* SrAl₃(P_{0,5}S_{0,5}O₄)₂(OH)₆ – *вудхаузеита* CaAl₃(P_{0,5}S_{0,5}O₄)₂(OH)₆ согласно классификации Скота (Scott, 1987), Дилла (Dill, 2001) и Миллса (Mills, 2009). При этом центральные части зерен представлены (Ca и Sr - *сванбергитом*), а краевые части зерен – *Pb-вудхаузеитом* (таблица 1).

Вариации и количество глинистых минералов, сопровождающих АСФ показаны на рентгенограмме валового состава рудовмещающих метасоматитов (рис. 6) и на рисунке 7. месторождения Светлое характеризуются повторяющимися особенностями ACΦ внутреннего строения: центральные части зерен имеют неоднородный «червеообразный» характер строения, затем следует промежуточная зона растворения зерна и во внешних (краевых) частях зерен наблюдается обогащение Pb и Ва ритмично повторяющихся полос зонального строения (рис. 7). Центральная часть зерен АСФ демонстрирует процесс замещения апатита, она обогащена Sr, Ca и редкоземельными элементами (РЗЭ), главным образом Се, и характеризуется неравномерным распределением этих компонентов между собой, что обуславливает хаотичный случайный узор (рис. 7а-б) и соответствует околорудной ступени формирования месторождения. Промежуточные части зёрен АСФ практически полностью растворены и могут соответствовать дальнейшим процессам кислотного выщелачивания ранней рудной стадии (HS-тип). Новый импульс гидротермально-метасоматических преобразований, соответствующий продуктивной стадии (IS-тип), преобразует краевые части зерен АСФ, обогащая их Ва, Рb и замещая Р→S (рис. 8) в условиях открытой неравновесной системы, о чем свидетельствует повторяющаяся осцилляторная зональность краевых частей зерен АСФ (рис. 7-8).

N	Al ₂ O ₃	P_2O_5	SO ₃	CaO	SrO	BaO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	PbO	Сумма	Формула:	Минерал
1	32.13	22.19	11.20	3.97	9.38	нпо	1.94	3.46	0.85	нпо	85.12	$(Sr_{0.424}Ca_{0.332}Ce_{0.099}La_{0.056}Nd_{0.024})_{\Sigma 0.933}Al_{2.949}(PO_4)_{1.463}(SO_4)_{0.655}(OH_{4.096}H_2O_{1.90})$	Са-сванбергит
2	34.02	23.65	10.72	2.23	13.45	нпо	2.54	4.33	1.43	нпо	92.36	$(Sr_{0.672}Ca_{0.206}Ce_{0.137}La_{0.081}Nd_{0.044})_{\Sigma 1.14}Al_{2.956}(PO_4)_{1.476}(SO_4)_{0.593}(OH_{2.326}H_2O_{3.67})$	Са-сванбергит
3	33.68	22.47	13.32	нпо	21.16	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	90.63	$Sr_{1.02}Al_{2.941}(PO_4)_{1.409}(SO_4)_{0.741}(OH_{2.752},H_2O_{3.248})$	Сванбергит
4	33.30	23.75	9.96	2.40	10.89	нпо	2.31	4.55	2.36	нпо	89.53	$(Sr_{0.525}Ca_{0.214}Ce_{0.138}La_{0.063}Nd_{0.070})_{\Sigma^{1.02}}Al_{2.978}(PO_4)_{1.526}(SO_4)_{0.567}(OH_{3.075}H_2O_{2.93})$	Са-сванбергит
5	29.69	21.58	9.16	1.25	12.98	нпо	1.93	3.11	0.90	нпо	80.60	$(Sr_{0.572}Ca_{0.102}Ce_{0.087}La_{0.054}Nd_{0.024})_{\Sigma 0.839}Al_{2.95}(PO_4)_{1.54}(SO_4)_{0.579}(OH_{5.122},H_2O_{0.79})$	Са-сванбергит
6	31.32	20.06	12.19	1.23	18.69	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	83.49	$(Sr_{0.839}Ca_{0.102})_{\Sigma 0.941}Al_{2.945}(PO_4)_{1.355}(SO_4)_{0.73}(OH_{4.52},H_2O_{1.48})$	Са-сванбергит
7	32.49	22.65	11.10	2.07	13.40	нпо	нпо	2.29	нпо	нпо	84.00	$(Sr_{0.595}Ca_{0.17}Ce_{0.064})_{\Sigma 0.828}Al_{2.999}(PO_4)_{1.501}(SO_4)_{0.652}(OH_{4.52}H_2O_{1.48})$	Са-сванбергит
8	32.05	20.82	13.03	4.96	9.79	нпо	1.35	2.69	0.72	нпо	85.41	$(Sr_{0.441}Ca_{0.413}Ce_{0.076}La_{0.039}Nd_{0.020})_{\Sigma 0.989}Al_{2.909}(PO_4)_{1.357}(SO_4)_{0.753}(OH_{4.00},H_2O_{1.99})$	Са-сванбергит
9	31.69	22.06	10.38	2.48	11.73	нпо	1.86	4.02	1.54	нпо	86.64	$(Sr_{0.552}Ca_{0.216}Ce_{0.119}La_{0.056}Nd_{0.045})_{\Sigma 0.988}Al_{2.949}(PO_4)_{1.475}(SO_4)_{0.615}(OH_{3.83},H_2O_{2.17})$	Са-сванбергит
10	31.33	15.53	16.40	3.60	7.00	4.03	нпо	нпо	нпо	11.46	89.54	$(Sr_{0.355}Ca_{0.338}Pb_{0.27}Ba_{0.137})_{\Sigma 0.955}Al_{3.019}(PO_4)_{1.075}(SO_4)_{1.00}(OH_{3.238}H_2O_{2.76})$	Са-сванбергит
11	32.36	22.28	9.76	2.00	12.28	нпо	2.06	4.56	1.78	нпо	87.08	$(Sr_{0.581}Ca_{0.175}Ce_{0.136}La_{0.062}Nd_{0.052})_{\Sigma1.00}Al_{2.985}(PO_4)_{1.476}(SO_4)_{0.573}(OH_{3.726}H_2O_{2.27})$	Са-сванбергит
12	33.63	24.96	8.91	1.79	9.77	нпо	3.43	6.32	2.35	нпо	91.17	$(Sr_{0.483}Ce_{0.197}Ca_{0.164}La_{0.108}Nd_{0.072})_{\Sigma 1.02}Al_{2.993}(PO_4)_{1.596}(SO_4)_{0.505}(OH_{2.662},H_2O_{3.338})$	Се-сванбергит
13	34.47	22.99	11.88	5.54	5.02	0.49	2.41	3.87	1.25	нпо	87.92	$(Sr_{0.23}Ca_{0.469}Ce_{0.112}La_{0.070}Nd_{0.035}Ba_{0.015})_{\underline{>}0.915}Al_{3.02}(PO_4)_{1.449}(SO_4)_{0.664}(OH_{2.662},H_2O_{3.34})$	Sr-вудхаузеит
14	35.70	25.23	10.87	6.44	4.98	нпо	3.00	4.79	1.61	нпо	92.62	$(Ca_{0.575}Sr_{0.241}Ce_{0.146}La_{0.092}Nd_{0.048})_{\Sigma^{1.102}}Al_{2.977}(PO_4)_{1.511}(SO_4)_{0.577}(OH_{2.17},H_2O_{3.83})$	Sr-вудхаузеит
15	29.67	12.49	16.69	4.96	нпо	4.54	нпо	нпо	нпо	13.40	81.74	$(Ca_{0.420}Pb_{0.285}Ba_{0.141})_{\Sigma^{0.706}}Al_{3.051}(PO_4)_{0.923}(SO_4)_{1.093}(OH_{5.105},H_2O_{0.895})$	Рb-вудхаузеит
16	34.67	15.41	19.31	5.73	1.30	5.24	нпо	нпо	нпо	15.49	97.15	$(Ca_{0.58}Pb_{0.394}Ba_{0.194}Sr_{0.071})_{\Sigma 1.045}Al_{3.008}(PO_4)_{0.96}(SO_4)_{1.067}(OH_{0.951}H_2O_{5.05})$	Рb-вудхаузеит
17	31.67	14.00	18.26	5.16	1.36	5.75	нпо	нпо	нпо	13.93	90.49	$(Ca_{0.486}Pb_{0.329}Ba_{0.198}Sr_{0.069})_{\underline{\Sigma}0.884}Al_{2.978}(PO_4)_{0.946}(SO_4)_{1.093}(OH_{2.952}H_2O_{3.05})$	Рb-вудхаузеит
18	31.53	12.13	20.91	5.43	нпо	4.31	нпо	нпо	нпо	10.75	86.75	$(Ca_{0.475}Pb_{0.236}Ba_{0.138})_{\Sigma 0.711}AI_{3.033}(PO_4)_{0.838}(SO_4)_{1.281}(OH_{3.824}H_2O_{2.18})$	Рb-вудхаузеит
19	31.35	13.57	18.18	5.44	нпо	6.21	нпо	нпо	нпо	11.78	86.54	$(Ca_{0.468}Pb_{0.261}Ba_{0.20})_{\Sigma^{0.741}}Al_{3.016}(PO_{4})_{0.938}(SO_{4})_{1.114}(OH_{3.919},H_2O_{2.08})$	Рb-вудхаузеит
20	30.17	12.70	17.70	4.38	нпо	5.74	нпо	нпо	нпо	15.68	86.38	$(Ca_{0.397}Pb_{0.357}Ba_{0.19})_{\Sigma 0.754}Al_{3.015}(PO_4)_{0.912}(SO_4)_{1.126}(OH_{4.07},H_2O_{1.93})$	Рb-вудхаузеит

Таблица 2. Представительные электронно-зондовые микроанализы алюмосульфофосфатов месторождения Светлое (нпо:ниже предела обнаружения)



Рис. 8. Микрофотографии увеличенного фрагмента зерна алюмосульфофосфата (АСФ) в обратноотраженных (а,в) и вторичных (б) и электронах СЭМа и профиль AB, отражающий концентрацию микроэлементов в краевой части зерна. Ms/Ser – мусковит/серицит, Dck/Kln – диккит/каолинит, Py – пирит, Qz – кварц.

Такая же картина осцилляторной зональности наблюдается и в *барите*, который в некоторых зонах, как правило, краевых, обогащается Pb. В микропорах такого барита устанавливается самородное золото микронного размера (рис. 9).



Рис. 9. Микрофотографии барита (Вп) в обратно рассеянных электронах сканирующего электронного микроскопа, демонстрирующие осциллятсрную зональность, обусловленную обогащением отдельных зон свинцом (Brt+Pt). Qz III – кварц, Au – самородное золото.

Информативными минералами, свидетельствующими составе 0 металлоносных растворов И изменении **условий** формирования месторождений, зачастую являются не только жильные, но и рудные минералы переменного состава. Отличительной особенностью месторождения Светлое является обилие блёклых руд минералов группы теннатит-тетраэдрита (TT) (Biagioni, Учитывая 2020). способность блёклых образовывать твердые растворы, они являются подходящим петрогенетическим

инструментом для определения условий минералообразования (Плотинская, 2015; Repstock, 2016; Hu, 2018; Любимцева, 2019; Keim, 2019 и др.). Таким образом, состав ТТ и характер строения можно использовать как индикатор физико-химических условий минералообразования.

В пределах месторождения Светлое встречается довольно редкая теллуристая разновидность TT – голдфилдит (рудные зоны Эми, Людмила). В недавнее время IMA выделила две разновидности голдфилдита, а именно стибиоголдфилдит (Biagioni, 2022) и арсеноголдфилдит (Sejkora, 2022). На месторождении Светлое встречаются обе разновидности (таблица 2). Голдфилдит рудной зоны Эми также характеризуется осцилляторной зональностью, отражающей различное распределение мышьяка, сурьмы и теллура, иногда висмута в отдельных зонах кристаллической решётки (таблица 2).

Голдфилдит может образовываться в составе рудных комплексов IS порфировоэпитермальных месторождений, однако он также является характерным минералом и минеральных комплексов HS-типа (Trudu, 1998; Плотинская, 2005; Voudouris, 2011). В отсутствие типичных HS-минералов, таких как энаргит, люцонит, фаматинит, автор не может со уверенностью отнести голдфилдит-хемусит-кавацулитовую ассоциацию к HSтипу. Однако автор предполагает начальное отложение данной минеральной ассоциации из кислотных растворов из-за её тесного сродства с каолинитом/диккитом и пирофиллитом в пределах рудной зоны Эми. Парагенетическая последовательность демонстрирует эволюцию системы в сторону нейтрализации и более восстановительных условий с течением времени.

Осцилляторная зональность голдфилдита в пределах месторождения Светлое могла быть результатом быстрых изменений в составе поступающих флюидов или изменений состава флюидов во время быстрого отложения минеральной фазы, или того и другого. Аналогичная однофазная и многофазная колебательная зональность установлена для голдфилдита из других эпитермальных месторождений золота (HS-типа), таких как Елшица (Болгария), Прасоловское (о. Кунашир, Курильские острова) и Озерновское (Камчатка) (Плотинская, 2015). Подобный состав голдфилдита характерен также для месторождений Пефка и Св. Деметриос/Сапес на северо-востоке Греции (Repstock, 2016).

Глубина, м	Cu	Fe	Ag	Zn	Sb	As	Bi	Те	S	Сумма	Формула:
Тетраэдрит											
31.6	36.22	6.10	1.16	1.87	21.44	6.27	нпо	нпо	26.94	100.00	$(Cu_{9.09}Ag_{0.17}Fe_{1.74}Zn_{0.46})_{\Sigma^{11.46}}(Sb_{2.81}As_{1.33})_{\Sigma^{4.14}}S_{13.4}$
49.8	42.04	6.90	нпо	нпо	10.51	13.16	нпо	нпо	27.39	100.00	$(Cu_{10.09}Fe_{1.88})_{\sum 11.97}(As_{2.68}Sb_{1.32})_{\sum 4.00}S_{13.03}$
62.0	40.04	1.46	нпо	3.94	21.83	2.19	нпо	4.99	25.55	100.00	$(Cu_{10.38}Zn_{0.99}Fe_{0.43})_{\Sigma 11.80}(Sb_{2.95}Te_{0.64}As_{0.48})_{\Sigma 4.08}S_{13.12}$
76.2	37.88	6.63	нпо	нпо	26.00	3.18	нпо	нпо	26.32	100.00	$(Cu_{9.65}Fe_{1.92})_{\Sigma 11.57}(Sb_{3.46}As_{0.69})_{\Sigma 4.14}S_{13.29}$
83.2	37.27	6.54	нпо	0.7	27.93	1.73	нпо	нпо	25.83	100.00	$(Cu_{9.60}Fe_{1.92}Zn_{0.18})_{\Sigma 11.69}(Sb_{3.75}As_{0.38})_{\Sigma 4.13}S_{13.18}$
109.8	35.74	9.04	нпо	нпо	26.45	2.24	нпо	нпо	26.54	100.00	$(Cu_{9.07}Fe_{2.61})_{\Sigma 11.67}(Sb_{3.50}As_{0.48})_{\Sigma 3.98}S_{13.34}$
Теннантит											
46.4	40.92	7.29	нпо	нпо	5.31	16.58	нпо	нпо	27.77	100.00	$(Cu_{9.80}Fe_{1.99})_{\sum 11.97}(As_{3.37}Sb_{0.66})_{\sum 4.03}S_{13.18}$
49.8	41.20	6.83	нпо	нпо	12.48	11.66	нпо	0.64	27.19	100.00	$(Cu_{9.99}Fe_{1.89})_{\Sigma^{11.88}}(As_{2.40}Sb_{1.58}Te_{0.08})_{\Sigma^{4.06}}S_{13.07}$
70.2	38.49	8.68	нпо	нпо	11.16	13.85	нпо	нпо	27.82	100.00	$(Cu_{9.22}Fe_{2.37})_{\Sigma 11.58}(As_{2.81}Sb_{1.40})_{\Sigma 4.21}S_{13.21}$
76.2	41.99	7.59	нпо	нпо	0.84	20.47	нпо	нпо	29.11	100.00	$(Cu_{9.66}Fe_{1.99})_{\Sigma 11.64}(As_{3.99}Sb_{0.1})_{\Sigma 4.09}S_{13.27}$
83.2	42.21	7.64	нпо	нпо	1.02	20.36	нпо	нпо	28.76	100.00	$(Cu_{9.74}Fe_{2.01})_{\Sigma^{11.74}}(As_{3.98}Sb_{0.12})_{\Sigma^{4.11}}S_{13.15}$
Аргентотетраэдрит											
31.6	4.11	5.16	47.12	1.99	14.47	6.11	-	-	21.05	100.00	$(Ag_{8.55}Cu_{1.27}Fe_{1.81}Zn_{0.60})_{\Sigma 12.22}(Sb_{2.33}As_{1.60})_{\Sigma 3.92}S_{12.85}$
								Голдфи	илдит		
38.2	42.25	1.60	2.39	нпо	6.11	3.12	нпо	19.00	25.52	100.00	$(Cu_{11.00}Ag_{0.37}Fe_{0.47})_{\Sigma 11.84}(Te_{2.46}Sb_{0.83}As_{0.69})_{\Sigma 3.98}S_{13.17}$
38.8	44.93	нпо	нпо	нпо	9.19	2.83	3.01	15.44	24.60	100.00	$Cu_{11.90}(Te_{2.04}Sb_{1.27}As_{0.64}Bi_{0.24})_{\sum 11.90}S_{12.91}$
38.2	43.84	нпо	нпо	нпо	7.39	3.42	2.38	17.80	25.17	100.00	$(Cu_{11.55})_{\Sigma 11.55}(Te_{2.34}Sb_{1.02}As_{0.76}Bi_{0.19})_{\Sigma 4.31}S_{13.14}$
38.2	44.91	0.61	нпо	нпо	8.04	3.16	нпо	17.55	25.73	100.00	$(Cu_{11.61}Fe_{0.18})_{\sum 11.79}(Te_{2.26}Sb_{1.08}As_{0.69}Bi_{0.19})_{\sum 4.04}S_{13.18}$
38.2	44.07	нпо	нпо	нпо	4.88	5.88	нпо	19.03	26.13	100.00	$(Cu_{11.32})_{\Sigma 11.32}(Te_{2.44}Sb_{0.65}As_{1.28})_{\Sigma 4.37}S_{13.31}$
38.2	46.08	0.37	нпо	нпо	6.85	2.42	нпо	19.08	25.19	100.00	$(Cu_{11.98}Fe_{0.11})_{\sum 12.09}(Te_{2.47}Sb_{0.93}As_{0.53})_{\sum 3.93}S_{12.98}$
38.2	43.54	0.35	нпо	нпо	6.85	4.06	3.05	16.79	25.37	100.00	$(Cu_{11.42}Fe_{0.10})_{\Sigma^{11.53}}(Te_{2.19}Sb_{0.94}As_{0.90}Bi_{0.24})_{\Sigma^{4.28}}S_{13.19}$
38.2	46.09	0.91	нпо	нпо	8.34	2.89	нпо	16.24	25.54	100.00	$(Cu_{11.87}Fe_{0.27})_{\sum 12.13}(Te_{2.08}Sb_{1.12}As_{0.63})_{\sum 3.83}S_{13.03}$
Стибиоголдфилдит											
62.0	43.02	0.38	нпо	0.80	14.30	1.98	1.98	12.23	25.32	100.00	$(Cu_{11.32}Zn_{0.21}Fe_{0.11})_{\Sigma 11.64}(Sb_{1.96}Te_{1.60}As_{0.44}Bi_{0.16})_{\Sigma 4.16}S_{13.20}$
38.2	43.85	0.86	нпо	0.00	12.79	4.13	нпо	12.62	25.75	100.00	$(Cu_{11.32}Fe_{0.25})_{\Sigma^{11.57}}(Sb_{1.72}Te_{1.62}As_{0.91})_{\Sigma^{4.25}}S_{13.18}$

Таблица 3. Представительные электронно-зондовые микроанализы минєралов группы тетраэдрита месторождения Светлое (нпо:ниже предела обнаружения)

В пределах месторождение Светлое автором выделено два типа золотого оруденения: Au-Ag и Au-Ag-Te. Оба типа золотого оруденения проявились в продуктивную золото-серебро-теллуридно-полиметаллическую позднюю ступень гидротермального этапа развития месторождения Светлое (рис. 10). Аи-Ад тип оруденения обнаружен как в первичных рудах, связанных с гипогенной эпохой, так и в окисленных. Первичная Au-Ag минерализация гидротермального этапа гипогенной эпохи характеризуется пробой золота ~ 870-970‰, средняя размерность золотин не превышает 5 мкм и в основном варьирует на уровне 1 мкм (рис. 10, б). Переотложенное золото гипергенной эпохи "mustard gold" (Lindgren, 1933; Tolstykh, 2019) преобладает в зоне окисления рудной зоны Елена и характеризуется более высокой пробой ~ 980-1000‰, являясь продуктом переотложения Au-Ag и Au-Ag-Te минерализации рудного гидротермального этапа (рис.10, ж). Нередко в ассоциации с высокопробным золотом гипергенной эпохи обнаруживаются ярозит, англезит, ковеллин, церуссит, диадахит. Переотложенное микасаит. сепиолит, высокопробное золото представлено в виде агрегатов неправильной формы среди пористого пространства вторичных кварцитов размером от долей мкм до 35 мкм, местами с ним ассоциирует самородный селен, теллур, железо (рис.10, ж).



Рис. 10. Тройная диаграмма Аи-Ag-Te, показывающая фазовые соотношения Au-Ag теллуридов с самородным Аи и самородным Те в пределах месторождения Светлое. Большинство точек соответствует химическому составу минералов рудной зоны Эми. Цифры указывают глубину обнаружения минєралов современной omповерхности; Микрофотографии в обратноотраженных (б-ж) u вторичных (ж) электронах электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 SBU. (б) Самородное золото в трещинах медьсодєржащего пирита (Аи-Ад тип сруденения гидротермального этапа); (ве) Au-Ag-Te тип сруденения на различных глубинах рудной зоны Эми сверху вниз; (ж) Самородное высокопробное золото гипергенное в окисленной зоне рудной зоны Елена (Аи-Ад тип сруденения гипергенной эпохи). Py_Cu(IIb) пирит кристаллический медьсодєржащий; Rt – рутил, Ptz-nemuum M., Hess-reccum, Sylv – сильванит, Cal калаверит, SeTe – самородный

селлен-теллур, Qz – кварц

Au-Ag-Te mun оруденения наиболее интенсивно проявлен в пределах рудной зоны Эми (рис.10) и характеризуется вертикальной зональностью, выражающейся в виде последовательной смены сверху вниз по разрезу скважин от преимущественно серебросодержащих разностей (гессит Ag_{1.71}Au_{0.1}Te, петцит Ag_{2.93-3.4}Au_{0.93-0.97},Fe_{0.17-0.44}Te₂, штютцит Ag_{4.43-5.14}Au_{0.06-0.07},Fe_{0.6}Bi_{0.15}Te₃, мутманнит), преобладающих на глубинах 30-40 м через золото-серебро-содержащий теллурид (сильванит Au_{0.86-1.67}Ag_{0.4-2.31},Fe_{0.06-0.39},Mo_{0.2-0.77},Ta_{0.04-0.08}Te₄), имеющий широкое распространение в интервале глубин от 40-80 м и с отложением золотосодержащего теллурида – *калаверита*, и в меньшей степени *креннерита* на глубине 105.6 м.

Последовательность минералообразования, отражающая закономерности эволюции рудного процесса в пределах месторождения Светлое продемонстрирована в таблице 3.

ГИПОГЕННАЯ ГИПЕРГЕННАЯ эпоха ЭТАП **ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ** СТАЛИЯ РУДНАЯ ПОСТРУДНАЯ ОКОЛОРУДНАЯ Минерал Переоотложенное Звлото-серебро-Гоздфиадит-ширн Пирит-кварцевая золото с гидрооксидами TYDEH Карбонатцая теллуриднокварневая лиметаллическа Минералы (I) (11 a) (II b and Кварц моганит Сванбергитвудхаузеит Алунит Барит Каолинит Диккит Иллит Рутил fil a (II b Пирит Хемусит (Cu6SnMoS8) Каванулит (Bi2Te2Se) Голдфилдит Мусковит Серицит Халькопирит Теннантит-Тетраэдрит Галенит Сфалерит Саморолное (III) золото Теллуриды Самородный теллур Прочие самородные Кальцит Ломолит Ковеллин Акантит Прочие сульфаты Лимонит Гиббсит Тектонические подвижки интенсивность их проявления

Таблица 3. Схема последовательности минєралообразования в пределах месторождения Светлое (толщина линий отражает интенсивность процесса отложения минєралов)

Калаверит, креннерит, сильванит, мутманит, петнит, гессит, штютцит, колорадоит, мелонит, алтаит, теллурантимон, теллуровисмутит

² Самородные сера, теллур, селен, висмут, теллуро-селен, селено-теллур

Смешанные фосфаты и сульфаты сурьмы и теллура; ярозит, микасаит, англезит, целестин

3. Разработана генетическая модель формирования месторождения Светлое, характеризующаяся следующими параметрами: оруденение формировалось при температурах 337-205°С, при давлении 20-140 бар, из флюида низкой солёности (0-0.18 мас. % NaCl-эквивалент), связанного со становлением уракской вулканоплутонической системы. Месторождение характеризуется составом руд и метасоматитов, специфичных для эпитермального кислотно-умеренно-сульфатного оруденения.

Термобарогеохимические исследования жильного кварца выполнены при изучении пятидесяти двуполированных пластин, отобранных из различных рудных зон месторождения Светлое. Исходя из наблюдений состояния и поведения фазовых компонентов при комнатной температуре, микротермометрии и результатов Раманспектроскопии, выявлено *три типа флюидных включений*: водно-углекислотные (CO₂-H₂O-NaCl), газовые (CO₂) и водные (H₂O-NaCl).

Формирование продуктивных залежей месторождения Светлое происходило при участии слабосоленого флюидного потока (Рис. 11). Понижение солёности и температуры от первичных к вторичным включениям свидетельствует о разбавлении, охлаждении флюида, установленная температура плавления льда равна 0 °С, что, вероятно, указывает на преобладание метеорных вод во флюидной системе. Участие метеорных вод в процессе формирования руд месторождения также подтверждается изотопным составом кислорода и водорода, которые были получены методом масс-спекторметрии по лазерной методике выделения воды из минералов предшествующими работами (Alderton, 2006; Мишин, 2011).

Сводные результаты расчета давления, плотности флюида и уровня эрозионного среза захвата флюидных включений для всех детально изученных рудных зон месторождения Светлое приведены в Таблице 4. Разница между глубиной отбора пробы (ниже современной поверхности) и рассчитанной палеоглубиной отражает уровень эрозионного среза рудных зон. Исходя из полученных данных, можно заключить, что наибольшей денудации подверглась рудная зона Эми.



Puc. 11. Микрофотографии вторичных двухфазных (а, г, д, є) и пєрвичных двухфазных (б, в, з), первичных углекислотных (ж), включений, изученных жильном кварце в месторождения Светлое; (и) рамановский спектр, соответствующий углекислому газу, отражающий состав газа газово-жидких включений в кварце (рудная зона Елена). Суммарные диаграммы температур гомогенизации (K) u солености (л), полученные no включениям месторождения Светлое; Рудная зона Эми (а -г), Елена (д-з)

Таблица 4. Результаты расчета давления, плотности флюида и уровня зрозионного среза захвата флюидных включений

н	Рудная зона								
параметры	Эми	Елена	Лариса	Людмила					
Температуры, °С	337-233	253-247	273-230	237-205					
Давление, бар	141-29	42-38		31-17					
Эрозионный срез, м	550-720	412-468	400	136-316					
Плотность флюида, гр/см ³	0.62-0.82	0.8		0.82-0.86					

Интенсивное осаждение рудной минерализации было приурочено к зонам смешения металлоносных магматогенных флюидов с температурой 205-337 °C, солёностью 0-0.18 мас.% экв. NaCl, с метеорными водами. Зоны смешения отражаются в специфических текстурах кварца (крутификационная, колломорфная и пр.) иногда в сопряжении с крустификационной или колломорфной текстурой пирита. Смена РТ-равновесия гидротермальной системы при смешении с метеорными водами привело к формированию рудных ассоциаций: голдфилдит-пирит-кварцевой и золото-серебро-теллуридно-полиметаллической.

Детальное изучение жильных и рудных минералов переменного состава, а также наиболее распространенного в пределах месторождения Светлое сульфида – пирита позволили сделать вывод о том, что периоды быстрого рудоотложения на границе гидротермальный флюид – метеорные воды сменялись условиями медленного отложения минералов в условиях открытой системы. Колломорфный медьсодержащий пирит указывает на процесс быстрого осаждения при резком охлаждении растворов, последующее образование идиоморфных кристаллов медьсодержащего пирита, обрастающих ядра колломорфной разности (Рис. 3г), являются индикатором медленной кристаллизации. В условиях открытой системы образуются зональные за счёт изменения концентраций Bi, As, Те кристаллы голдфилдита, ассоциирующие с кристаллическим медьсодержащим пиритом. Развитие вдоль зон роста и трещин голдфилдита самородного теллура, теллуридов Hg, Ni, Pb, Cu объясняется поступлением новой порции металлоносного флюида в открытую систему. Гидротермы в эпитермальных системах часто представляют собой разбавленный раствор (почти нейтральный, слабокислый и, в основном, метеорного происхождения). Они содержат растворённые газы, преимущественно CO₂ в меньшем количестве H₂S, SO₂ (Кигай, 2020). В результате конденсация летучей фазы в водоносном горизонте начинается процесс кислотного выщелачивания. Подобный механизм описан для месторождения Лепанто (Филиппины) (Hedenquist, 2011). Разбавление металлоносного первично магматического флюида в гидротермальной системе, сформировавшей месторождение Светлое, подтверждается понижением солёности и температуры флюидных включений. установлением температуры плавления льда 0 °С и исследованиями изотопного состава водорода и кислорода (Alderton, 2006; Мишин, 2011). Присутствие газовой фазы CO₂ подтверждается наличием в первичных двухфазных включениях СО2 и преимущественно углекислотным составом флюидных включений. Флюид гидротермальной системы месторождения Светлое при смешении с метеорными водами постепенно терял концентрацию. В центральной части гидротермальной системы (рудные зоны Елена, Людмила, Тамара), расположенной над предполагаемым интрузивным очагом, в температурном диапазоне 150-270° С и солёности флюида 0 - 0.35 мас. % NaCl-эквивалент, сформировались монокварциты, сменяющиеся алунитовыми, алунит-диккитовыми, диккитовыми разностями кварцитов.

Формирование метасоматических пород рудной зоны Эми, по-видимому, происходило на периферии по отношению к дегазирующему магматическому очагу, а значительное разбавление метеорными водами и нейтрализация флюида за счёт взаимодействия в вмещающими породами привело к формированию помимо монокварцитов, серицитовых, диккитовых кварцитов и иллитовых метасоматитов при участии близнейтральных растворов при температурах 233-270° С и солёности флюида 0 - 0.35 мас. % NaCl-эквивалент.

Условия, при которых формировалась залежь Лариса, относящейся к периферийной зоне, хотя и сопоставимы с залежами Елена, Тамара и Людмила по температурному режиму растворов (230-273 °C), отличаются от них повышенным уровнем pH, что объясняется нейтрализацией растворов при взаимодействии с вмещающими породами. Образование кварц-кальцитовых метасоматитов, в которых основными минералами являются филлосиликаты и кальцит, происходило при близнейтральных pH. Относительно широкое развитие кальцита при отсутствии адуляра в метасоматитах залежи Лариса следует рассматривать как один из ключевых критериев физико-химического режима, соответствующего краевым зонам кислотно-сульфатных (HS) гидротермальных систем (Arribas, Hedenquist, 2021).

Многоактное пульсационное поступление флюидов в гидротермальной системе месторождения Светлое подтверждается микрозональностью и осцилляторной зональностью кварца (по данным катодолюминисценции), осцилляторной зональностью алюмосульфофосфатов (Рис. 8), барита (Рис. 9).

Дальнейшая эволюция месторождения Светлое связана с процессами гипергенеза и денудации, которые продолжаются до настоящего времени. Тектонический блок, в котором локализована рудная зона Эми, выводится на 150-250 м вверх. Формируется минеральная ассоциация переотложенного золота с гидроокислами, наиболее благоприятная для извлечения золота по принятой на месторождении технологии кучного выщелачивания.

При прогнозировании и поисках эпитермальных месторождений кислотносульфатного типа на региональном, локальном и детальном уровне используются структурные, геофизические и геохимические методы (Лесняк, 2022), а в условиях слабого развития растительного покрова – дешифрирование современных космических снимков (Ананьев, 2019). Для локализации потенциально рудоносных зон в пределах опоисковываемых участков предлагается использовать следующие, установленные критерии и признаки рудоносности:

1. Метасоматические: переслаивающиеся тела монокварцитов, алунитовых кварцитов, диккитовых кварцитов и кварц-иллитовых метасоматитов.

2. *Минералогические прямые:* высокопробное самородное золото (> 900 ‰) и теллуриды золота.

Минералогические косвенные локальные (уровень месторождения): картирование ореола площадной пиритизации, примерно соответствующей площади месторождения (25 км² вокруг месторождения Светлое).

Минералогические косвенные детальные (уровень рудной зоны): обилие пирита (до 20%), обилие блеклых руд переменного состава теннантит-тетраэдритового ряда; теллуридов Hg, Au и Ag, Ni, Pb, Sb, Bi для умеренно-кислотного типа; наличие примесей Cu, Te, Se в сульфидах.

3. Термодинамические: картирование минеральных особенностей – индикаторов процесса смешения флюидной фазы и метеорных вод (совместное нахождение преимущественно жидких и газовых включений в пределах одной генерации), текстурноструктурные особенности метасоматических образований (колломорфные, крустификационные, скрытокристаллические, мозаичные, перистые), температуры гомогенизации первичных флюидных включений в интервале 337-205 °C, низко соленый флюид 0-0.18 мас. % NaCl-эквивалент, давление 141-17 бар. Отнесение минерализации опоисковываемого участка к кислотно-сульфатному или умеренно-кислотному типу, исходя из приведённых выше критериев, и определение степени развития зоны окисления может косвенно, до проведения полноценных технологических испытаний, оценить вероятность принципиальной возможности переработки руд с использованием технологии кучного выщелачивания.

Обобщённые полученные данные по рудно-метасоматической зональности и термобарогеохимии, свидетельствуют о том, что источником флюидов являлось интрузивное тело, предположительно, верхнемелового уракского дацит-риолитового комплекса. По результатам исследований была разработана схематическая модель формирования эпитермального оруденения месторождения Светлое. Гидротермальнометасоматический процесс, наложен на верхнемеловые вулканогенно-осадочные отложения уракской и хетанинской свит, локализованные в двух палеовулканических постройках центрального типа, и приурочен, по-видимому, к дегазации единого среднекислого магматического очага, связанного, предположительно со становлением интрузивного тела верхнемелового уракского дацит-риолитового комплекса. Глубина заложения интрузивного тела не менее 600-800 м, о чём свидетельствует уровень эрозионного среза при захвате флюидных включений наиболее эродированной рудной зоны Эми и вертикальный размах оруденения последней, изученный на современном уровне эрозионного среза. Единство рудного процесса доказывается однотипностью минеральных комплексов и метасоматической зональностью (Hedenquist и др., 1995; Sillitoe, 2010; Arribas, Hedenquist, 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оруденение месторождения Светлое локализовано в двух палеовулканических структурах центрального типа коньяк-сантонского и кампан-маастрихского времени, приурочено к зонально построенным телам вторичных кварцитов: пористых и брекчированных монокварцитов, алунитовых, диккитовых кварцитов и, для рудной зоны Эми, серицитовых кварцитов.

В ходе исследований установлено, что оруденение месторождения Светлое представлено тремя минеральными ассоциациями (ступенями) гидротермального этапа: пирит-кварцевой, голдфилдит-пирит-кварцевой, золото-серебро-теллуридно-полиметаллической. Последняя ассоциация является результатом нового флюидного импульса развития гидротремальной системы и характеризуется обилием теллуридов и самородного теллура.

Выделено два типа золотого оруденения: золото-серебряный и золото-серебротеллуридный, которые были сформированы в золото-серебро-теллуриднополиметаллическую ступень гидротермального этапа.

Установлено, что месторождение Светлое характеризуется составом руд и метасоматитов, позволяющим отнести его к промежуточному кислотно-умеренносульфатному эпитермальному типу.

Обобщенные данные термобарогеохимического и петрографо-минералогического изучения позволили установить, что температуры образования минеральных ассоциаций гидротермальной стадии, включающих продуктивную золото-серебро-теллуридно-полиметаллическую, варьируют в диапазоне 337-205 °C при давлении 17-141 бар и солёности флюида 0-0,18 мас.% экв. NaCl.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С. Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпитермального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов - 2021. – Т.332, №10. – С.17-32.

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

3. Yakich T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov R.Y., Lesnyak D.V., Levochskaia D.V., Savinova O.V., and Rudmin M.A. Mineralogy of the Svetloe epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration //Ore Geology Reviews -2021 - V.136 - 104257

4. Yakich T.Y., Voudouris P., Levochskaia D.V., Mazurov A.K., Shaldybin M.V., Lopushnyak Y.M., Ruban A.S., Erofeev A.E., Minakov M.S., Maximov P.N., Sinkina E.A., Bestemianova K.V., Rudmin M.A. Sulfosalts and sulfates in the epithermal Au-Ag-Te Emmy deposit (Khabarovsk Territory, Far East, Russia): implication for the mineralization process//Geosciences MDPI (в печати)

В прочих изданиях

5. Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Ананьев Ю.С., Рудмин М.А. Минеральная и метасоматическая зональность Светлинского рудного поля (Хабаровский край). Возможности практического использования при выполнении прогнозных и поисковых работ // Геологический вестник. Производственные и методические аспекты геологоразведочных работ – 2021. – Т.1. – №9. – С.90-98.

Материалы симпозиумов и конференций

6. Левочская Д.В., Ерофеев А.Е., Якич Т.Ю. Осциляторная зональность алюмо-сульфо-фосфатов в эпитермальном золоторудном месторождении Светлое (Хабаровский край) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVII Международного сипозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, Томск. – 2023. – С. 91-92.

7. Левочская Д.В., Лесняк Д.В., Якич Т.Ю. Особенности химизма блеклых руд участка Эми Светлинского эпитермального рудного поля (Хабаровский край) // Проблемы геологии и освоения недр труды XXV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горногеологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5-9 апреля 2021 г.: в 2 т. – 2021. – Т.1, – С.66-68.

8. Левочская Д.В., Лесняк Д.В., Якич Т.Ю. Теллуридная минерализация эпитермального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Проблемы геологии и освоения недр труды XXV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горногеологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5-9 апреля 2021 г.: в 2 т. – 2021. – Т.1, – С.98-99

9. Левочская Д.В., Лесняк Д.В., Якич Т.Ю. Этапы, стадии минеральные ассоциации рудобразующего процесса эпитермального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения Н. М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л. Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М. А. Усова, Томск, 4-8 апреля 2022 г. : в 2 т. – 2022. – С. 88-89

10. Лесняк Д.В., **Левочская** Д.В., Ананьев Ю.С. Структурные критерии и признаки эпитермального золотого оруденения кислотно-сульфатного типа Среднеульинского рудного района на основе данных дистанционного зондирования // Проблемы геологии и освоения недр труды XXV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горногеологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5-9 апреля 2021 г.: в 2 т.:. – 2021. - Т.1, – С.100-101

11. Лесняк Д.В., **Левочская Д.В.**, Гаврилов Р.Ю. Геохимические критерии и признаки эпитермального золотого оруденения кислотно-сульфатного типа Среднеульинского рудного района на основе данных дистанционного зондирования // Проблемы геологии и освоения недр труды XXV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, к 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5-9 апреля 2021 г.: в 2 т.:. – 2021. – Т.1, – С.101-102

12. Якич Т.Ю., Левочская Д.В. Осцилляторная зональность сульфатов и сульфосолей и их типоморфизм в качестве маркеров эволюции процессов рудообразования в пределах эпитермального Au-Ag месторождения Светлое (Хабаровский край) //Материалы Годичного собрания РМО «Минералогические исследования в интересах развития минерально-сырьевого комплекса России и создания современных технологий», г. Апатиты, 16-21 сентября 2024 г. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2024 – С.283-284

13. Якич Т.Ю., **Левочская Д.В.**, Ерофеев А.Е. Минералогические критерии обнаружения слепого порфирового оруденения на примере Au-Ag месторождения Эми (Хабаровский край) // Годичное собрание РМО «Минералого-геохимические исследования для решения проблем петро- и рудогенеза, выявления новых видов минерального сырья и их рационального использования» и Федоровская сессия. – 2023. – Т.1. – С.163-164

14. Якич Т.Ю., **Левочская** Д.В., Ерофеев А.Е. Этапы рудообразования эпитермального месторождения Светлое (Хабаровский край) // Тезисы докладов XII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», г. Москва, 11-14 апреля 2023 г. – М.: ЦНИГРИ, 2023. – С. 563-567.