

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Лесняк Дмитрий Викторович

**ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ЭПИТЕРМАЛЬНОГО ВЫСОКОСЕРНИСТОГО ЗОЛОТОГО
ОРУДЕНЕНИЯ РУДНОГО ПОЛЯ СВЕТЛОЕ (ХАБАРОВСКИЙ
КРАЙ)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Мазуров Алексей Карпович

доктор геолого-минералогических наук,
профессор отделения геологии Инженерной
школы природных ресурсов

Официальные оппоненты:

Сазонов Анатолий Максимович

доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры Геологии, минералогии и
петрографии Института цветных металлов,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск

Дамдинов Булат Батуевич

доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Геологический институт им.
Н.Л. Добрецова Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Улан-Удэ

Защита диссертации состоится «15» января 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.28 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



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

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.28,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент



Рудмин Максим Андреевич

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность условий формирования золоторудных месторождений определяется двумя глобальными факторами. При сохранении традиционной инвестиционной привлекательности золота отмечается снижение динамики мирового производства этого драгоценного металла по фактическому объему добычи в период с 2019-2021 гг. По экспертным оценкам мировое производство золота может сократиться на 15-20% уже к 2030 году по причине снижения качества и количества мировых запасов. Российский сектор будет подчиняться глобальным тенденциям, что создает возможность прохождения пиковых объемов добычи золота в нашей стране в ближайшей перспективе. Истощение сырьевой базы лидирующих золотодобывающих регионов России делает актуальным проведение геологоразведочных работ на выявление перспективных золоторудных объектов, не являющихся привычными по геологической и/или технологической характеристикам, в том числе находящихся в труднодоступных районах. В таком качестве могут рассматриваться эпитермальные кислотно-сульфатные золоторудные месторождения Охотско-Чукотского вулканического пояса.

Геологические работы, направленные на поиски золоторудных объектов на территориях, перспективных к обнаружению объектов кислотно-сульфатного типа, традиционно специализировались на выявлении кварцево-жильных месторождений (низко-сульфатных или адуляр-серицитовых). Поэтому поля вторичных кварцитов, характерных для кислотно-сульфатных обстановок, не изучались должным образом, а обширные проявления алунитовых кварцитов время от времени рассматривались в качестве потенциального источника получения алюмосодержащего сырья. Однако, в последнее время отмечается рост интереса золотопромышленников ко вторичным кварцитам. В геологоразведочные проекты и горно-перерабатывающее производство стали включаться месторождения и рудопроявления Малетойваям-Ветроваямской группы и Озерновского рудного поля на Камчатке, а также рудного поля Светлое в Хабаровском крае. Привлекательной особенностью этого типа месторождений служит наличие свободного, дисперсного, легкорастворимого золота в относительно хорошо проницаемом матриксе пористых и глинистых кварцитов, что позволяет экономически и технологически обоснованно применять сравнительно менее затратную технологию кучного выщелачивания в условиях труднодоступных территорий. Возможность применения технологии кучного выщелачивания в условиях низких температур Крайнего севера успешно подтверждена на месторождении Светлое (Хабаровский край, компания «Полиметалл»), на котором себестоимость производства золота является одной из самых низких в отрасли не только в России, но и в мире [Polymetal International Plc].

Таким образом относительно низкая изученность эпитермальных кислотно-сульфатных месторождений, обусловленная их редким нахождением на территории России, в совокупности с экономической привлекательностью технологий разработки и переработки определяет актуальность проблемы прогнозирования и поисков золоторудных месторождений этого типа.

Цель и задачи работы. Целью работы является определение основных факторов локализации эпитермального кислотно-сульфатного оруденения на основе анализа геолого-структурной позиции рудного района, рудного узла и рудного поля, особенностей проявления оруденения во вторичном и первичном геохимических полях, а также разработка комплекса критериев и признаков на обнаружение данного типа месторождений в пределах Ульинского прогиба.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Установление главных геолого-структурных факторов, определяющих пространственное расположение золотого кислотно-сульфатного оруденения;
2. Установление особенностей проявления золотого эпитермального кислотно-сульфатного оруденения во вторичном и первичном геохимических полях.
3. Разработка главных разноранговых критериев прогноза и поисков и уточнение поисковой модели эпитермального кислотно-сульфатного золотого оруденения.

Научная новизна. В пределах золоторудного поля Светлое описан эпитермальный кислотно-сульфатный тип золотого оруденения. Обоснована роль вулканотектонических депрессий I и II порядков и продольных северо-восточных и северо-западных разломов мантийного и корового заложения в размещении вулканотектонических депрессий, метасоматических полей и золотых рудопроявлений. Детально охарактеризованы геологические и структурные особенности рудного поля. Установлено, что рудоносные участки размещаются в кальдерах проседания вулканических аппаратов. Описаны характеристики потенциально рудоносных вулканических структур в магнитном поле и полях распределения естественных радиоактивных элементов. Установлены закономерности формирования и зональность рудогенных геохимических полей, сопровождающих золотое оруденение эпитермального кислотно-сульфатного типа. Для определения критериев отбраковки участков на ранних стадиях их изучения проведено сопоставление особенностей рудного поля Светлое с рудопроявлением Дюльбаки, участками минерализации Алядакан и Большая Холи. Полученные данные легли в основу разработки новых региональных и локальных критериев прогноза, поисков и оценки золотого оруденения.

Практическая значимость. Разработанные прогнозно-поисковые критерии могут быть использованы предприятиями, ведущими поисковые и оценочные работы на эпитермальный кислотно-сульфатный тип золотого оруденения в пределах Уенминского золоторудного узла и в сходных геологических обстановках.

Фактический материал и методы исследований. В основе исследований лежат космоматериалы Landsat ETM+, Landsat 8, Aster, Sentinel, цифровые модели рельефа SRTM и AsterGDEM; аналитические данные, полученные по результатам литохимических работ по вторичным ореолам рассеяния в масштабах 1:50000 и 1:10000, проведённые в разные года на площади рудного поля Светлое (2001, 2003, 2004, 2006, 2007, 2009 гг.). В качестве справочных данных использованы материалы геологической съемки 1:200000 листов О-54-VIII (Ивлев А.Н., 1977, 1986), О-54-IX (Умитбаев Р.Б., 1967), О-54-XIV (Шпак Н.С., 1974, 1979), поисковых работ в юго-западной части Охотского района (Ульинская площадь; Бутвин В.Н., 1987), поисковых работ и оценке месторождений золота бассейнов ручьев Алалинды, Онемна (Литвинов, 2012), результаты аэрогеофизических работ разных лет съемки (1978-1985 гг.), переработанные и увязанные ООО Геопарт в 2019 г.

Обработка и дешифрирование космоматериалов выполнялись для построения структурно-геологических схем уровней рудного района, рудного узла, рудного поля с целью выявления закономерностей проявления разноранговых вулканоструктур, разрывных нарушений, субвулканических тел, интрузий, метасоматитов в различных элементах дешифрирования.

Подтверждение наличия рудных процессов обеспечивается выявлением в геохимическом поле ассоциации элементов, связанной с рудообразованием, и прямых признаков золотого оруденения. Обработка и интерпретация геохимических данных выполнялась с целью создания обобщённой модели аномального геохимического поля Светлого по полученным в ходе анализа данных закономерностям распределения элементов во вторичном ореоле рассеяния. При обработке данных использованы методы многомерной статистики: ранговая корреляция, факторный и кластерный анализы. Построены схемы распределения элементов и комплексных показателей (КП). Выполнены: расчет фоновых и минимально-аномальных содержаний элементов; моделирование геохимических полей методами многомерной статистики; расшифровка структуры аномального геохимического поля.

Основные защищаемые положения.

1. Основными элементами структурно-геологического строения при выделении потенциальных золоторудных объектов являются: вулканотектонические депрессии I и II порядка, остатки палеовулканических построек центрального типа, в том числе с проявленной кальдерой проседания, разрывные нарушения, тела секущих интрузивных, субвулканических и

жерловых образований, вторичные кварциты и аргиллизиты, которые могут быть выявлены дистанционными методами.

2. В масштабах рудного тела распределение ассоциаций элементов первичного геохимического поля имеет концентрически-зональное строение, выражающееся в последовательной смене геохимических ассоциаций (от тыловой зоны к фронтальной): Au-Ag-Se-Sb → V-As-P-Fe-Mo-Pb-Sr-Sb-Cu → K-Na-Al-Co-Zn-Ba → Cr-Ni-Mn.

На уровне месторождений в кислых породах устанавливается последовательность формирования геохимических ассоциаций (от центральной части к периферии): Au, Ag, Bi, Te → Ni, Cr, Co, Ti, V, Zn, Mn → As, Sb, Hg, Pb, Cu (Mo, W) → P, La, Mg, Sc, Mn, Zn, Sr, Co, Si.

Рудное поле фиксируется концентрически-зональной структурой с пространственной сменой геохимических ассоциаций (от центральной зоны рудообразования к периферии): Au (Mo) → Au, Ag, Pb → K, Na, Al → V, Zn, (Co, Ni, Cr, Mn, P).

3. Разработаны основные региональные и локальные критерии поиска и оценки золотого эпитермального оруденения, характеризующиеся комплексом геохимических, геофизических и геолого-структурных факторов, которые отражают особенности размещения оруденения в структурах региона.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в инициации проведения исследований по тематике диссертации, организации и участии в полевых работах и отборе проб, участии в обработке, систематизации и интерпретации полученных результатов дешифрирования космоматериалов и результатов геохимического опробования.

Апробация работы и публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базу данных Scopus. Результаты обсуждались на Международных симпозиумах имени академика М. А. Усова (2021, 2022). Часть диссертационных исследований выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0010).

Структура работы. Текст диссертации изложен на 197 страницах, включающих введение, заключение, шесть глав и текстовые приложения. В первой главе даны общие сведения о геологическом строении рудного поля Светлое, включая состояние проблемы, обзор ранее выполненных работ и сопоставление объекта исследований с отечественными и зарубежными месторождениями-аналогами. Во второй главе «Методы...» описаны исходные материалы, аналитические и расчетные методы, использованные в работе. В третьей главе описана геолого-структурная позиция рудного района, рудного узла, рудного поля на основании результатов дешифрирования спектральных космоснимков и обработки геофизических данных с использованием материалов геолого-съёмочных работ разных лет. Четвертая глава «Геохимическая модель рудного поля Светлое» посвящена результатам обработки и интерпретации данных литохимического опробования, на основании которых представлены геохимические модели уровней рудного поля, месторождения и рудного тела, а в заключение главы дана обобщенная модель золоторудного поля. В пятой главе приведены результаты геолого-структурного и геохимического анализа участков Дюльбаки, Алядакан, Большая Холи, которые были использованы при формировании прогнозно-поискового комплекса и геолого-поисковой модели, отраженных в заключительной шестой главе «Критерии и признаки эпитермального оруденения. поисковая модель», объединяющей результаты исследования геолого-структурной позиции золоторудных таксонов и особенностей геохимических полей на различных уровнях.

Благодарности. Автор работы искренне благодарен за понимание, помощь и поддержку в разработке темы диссертации своему научному руководителю доктору геол.-мин. наук А.К. Мазурову. Автор глубоко признателен доктору геол.-мин. наук Ю.С. Ананьеву, кандидату геол.-мин. наук М.А. Рудмину, кандидату геол.-мин. наук Р.Ю. Гаврилову, кандидату геол.-мин. наук А.Н. Орехову за советы и помощь в написании некоторых разделов данной работы.

Автор благодарит сотрудников НИ ТПУ: кандидата геол.-мин. наук А.С. Рубана, кандидата геол.-мин. наук Т.Ю. Якич, кандидата геол.-мин. наук О.В. Савинову за полезные советы и консультации при создании данной работы. Автор выражает признательность сотрудникам группы компаний АО «Полиметалл УК» С.И. Трушину и Д.В. Левочской за поддержку, ценные советы и предоставленные материалы.

Краткий геологический очерк рудного поля Светлое

Рудное поле Светлое расположено в Ульяновском прогибе Охотской ветви Охотско-Чукотского вулканического пояса, выполненном меловыми вулканогенными образованиями амкинской, хетанинской, уракской, хакаринской свит и незначительно распространёнными рыхлыми четвертичными образованиями.

Ульянский прогиб осложнен позднемеловыми вулканическими структурами, к числу которых принадлежит Секчинская вулcano-тектоническая депрессия (50x28 км), в юго-западной части которой расположено рудное поле Светлое.

В районе широко проявлена разрывная тектоника. Выделяются региональные разломы северо-восточного простирания (продольные по отношению к Охотско-Чукотскому поясу), к числу которых принадлежит Дюльбакинский разлом, проходящий по площади месторождения. Синвулканические разломы, ограничивают и осложняют кольцевые вулканоструктуры. К последним тяготеют субвулканические и интрузивные тела, поля гидротермально-измененных пород. Их заложение происходило в позднемеловое время и связано с многостадийным оседанием игнимбрито-лавовых полей над периферическими магматическими очагами. Дуговой Онёмнинский разлом северо-западного простирания контролирует выходы штокообразных тел гранит-порфиров и размещение полей вторичных кварцитов. С Онёмнинским разломом сопряжены «радиальные» разломы меридионального и северо-восточного простирания, с которыми связывается локализация золотой минерализации.

Субвулканические образования представлены мелкими штоками и дайками гранодиорит-порфиров, дацитов, риолитов уракского комплекса и андезибазальтов хакаринского комплекса. Субвулканические тела в пределах рудного поля наиболее широко распространены в полосе широтного-северо-западного простирания, протянувшейся с левобережья верхнего течения руч. Онёмна до истоков руч. Алалиньдя, пространственно совпадающей с полями распространения вторичных кварцитов и рудных объектов Светлого рудного поля.

Породы, вмещающие оруденение, разделены на два комплекса. Нижнюю часть разреза составляют лавы и туфы андезитов и андезидацитов хетанинской свиты (K_2ht); верхнюю часть разреза мощностью более 300 м, судя по сохранившимся структурам и фрагментам минералов, образуют лавы, кластолавы дацитового состава с прослоями туфов, туфогенно-осадочных пород и игнимбритов. Часть дацитов имеет субвулканическую природу. Судя по выходам пород на поверхности и немногочисленным замерам слоистости, вулканические породы образуют вытянутую в субширотном-северо-западном направлении куполовидную структуру с пологим периклинальным залеганием пород относительно осевой ее части.

Гидротермально-метасоматические образования развиваются по вулканогенным породам преимущественно кислого и, реже, средне-основного состава. В метасоматических образованиях поля выделяются: вторичные кварциты (моно-, алунитовые, диккитовые, алуни-диккитовые, гидрослюдистые), кварц-карбонатные метасоматиты, иллит-хлоритовые и кальцит-лептохлоритовые аргиллизиты. Неизменные породы обнаруживаются редко. В пределах рудного поля вторичные кварциты на современной поверхности представляют собой разобщенные поля обширной, фрагментарно эродированной залежи, наследующие первичный структурный план вулканогенных пород, и составляют разобщенные в плане многослойные залежи неправильной вытянутой формы, имеющие наклонное залегание (Мишин, 2011; Левочская и др., 2021). Метасоматическая зональность золоторудного поля Светлое имеет достаточно универсальную схему, наблюдаемую во многих известных эпитеpmальных месторождениях: монокварциты, представленные тремя структурно-текстурными типами (массивные, пористые,

брекчированные), обрамляются алуниновыми кварцитами, которые постепенно переходят в диккитовые кварциты, слагающие прикровельную и приподошвенную зоны залежи вторичных кварцитов. Вторичные кварциты подстилаются кварц-гидрослюдистыми аргиллизитами, плавно сменяющимися низкотемпературными пропилитами.

Рудные тела месторождений рудного поля Светлое представлены плащеобразными и линейными залежами килевидного (в разрезе) строения, унаследованного от форм залежей вторичных кварцитов и осложненного рудоподводящими каналами и грибовидными раздувами, согласными с проницаемыми толщами вмещающих вулканических пород. В рудном поле определяются четыре залежи, вмещающие в себя промышленно значимые запасы золота – это Елена, Тамара, Людмила, Эмми. Одна из самых крупных залежей, Елена, имеет протяженность до 650 м, включая 330 м промышленного оруденения, ширину 240 м и среднюю мощность 26 м, увеличивающуюся к центральной части до 110 м, тем самым образуя килевидный профиль, характерный не только для других рудных залежей поля, но и для многих месторождений кислотно-сульфатного типа – например, Саммитвилль в Калифорнии (Gray et al., 1994), Кимсакоча в Эквадоре (Silitoe et al., 2015), Лепанто на Филиппинах (Chang et al., 2011) и др.

Золотая минерализация на участках Елена, Людмила, Тамара развивалась в рудную стадию образования гидротермальных изменений в составе кварц-пиритового минерального комплекса с единичными полиметаллическими сульфидами и гипергенную стадию с частичным переотложением свободного золота. Для участка Эмми золоторудная минерализация развивалась в гидротермальных процессах несколько иначе и принимала участие во второй рудной стадии в теллуридном комплексе с золотом и серебром, но в завершении так же частично переотложилась в гипергенной стадии (Yakich et al., 2021).

Описанная выше характеристика свидетельствует, что рудное поле Светлое представляет собой типичное эпitherмальное золото-серебряное месторождение кислотно-сульфатного типа – располагается в вулканических поясах, в кальдерах и на склонах отдельных вулканических аппаратов центрального типа, контролируемые разрывными нарушениями. Рудные скопления сопровождается рудоносными метасоматитами – вторичными кварцитами зонального строения.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Основными элементами структурно-геологического строения при выделении потенциальных золоторудных объектов являются: вулканотектонические депрессии I и II порядка, остатки палеовулканических построек центрального типа, в том числе с проявленной кальдерой проседания, разрывные нарушения, тела текущих интрузивных, субвулканических и жерловых образований, вторичные кварциты и аргиллизиты, которые могут быть выявлены дистанционными методами

На основе дешифрирования данных космических съемок с привлечением результатов интерпретации и переинтерпретации аэрогеофизических съемок и обобщения результатов геологосъемочных работ построены структурно-геологические схемы Среднеульинского рудного района, Уенминского рудного узла и рудного поля Светлое и определены факторы рудоконтроля, которые могут быть выявлены дистанционными методами.

Положение Уенминского золоторудного узла полностью контролируется Секчинской вулканотектонической депрессией, а рудное поле Светлое и проявления золота на изученной площади контролируются остатками палеовулканических построек. В свою очередь, палеовулканические постройки тяготеют к краевым частям вулканотектонических депрессий. Признаками выделения представленных элементов геологического строения послужили хорошо дешифрируемые системы кольцевых структур I и II порядков, эпицентры которых пространственно тяготеют к узлам сопряжения продольных северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений. Для ряда построек отмечаются системы радиальных разломов. Частные вулканические постройки пространственно тяготеют к краевым частям вулканотектонических депрессий. При этом, некоторые дешифрируемые структуры повторяют контуры вулканических построек, закартированных по результатам геологосъемочных работ, а

другие выделены по аналогии с выше приведенными структурами. Секущие тела изверженных горных пород разделены на два класса – интрузивные и субвулканические (субвулканические и жерловые). Основой для их выделения послужили результаты геологосъемочных работ. Контуры отдельных тел уточнялись дешифрированием. Разрывные нарушения выделяются по комплексу признаков – по линейным формам различных неоднородностей и уступам в материалах дистанционных съемок. Все проявленные разрывные нарушения разделяются на четыре группы: северо-восточные, северо-западные, субмеридиональные и субширотные. Самыми крупными разрывными нарушениями на площади являются продольные (по отношению к простиранию Охотско-Чукотского вулканического пояса) северо-восточные Ульяновский и Дюльбакинский разломы. Сопряженными с северо-восточными структурами являются северо-западные, такие как Мати-Уенминский разлом. Кинематику этой системы разломов установить не удалось. Субмеридиональные и сопряженные с ними субширотные разломы образуют достаточно плотную сеть и, вероятно, являются наиболее молодыми структурами (Иволга и др., 2016, 2017).

В пределах Уенминского рудного узла рудное поле Светлое контролируется остатком палеовулканической постройки с кальдерой проседания. Положение самой палеовулканической постройки контролируется узлом сопряжения Дюльбакинского разлома северо-восточного простирания с разломами северо-западного простирания. Метасоматический ореол, который сопровождает рудные тела, имеет значительную площадь – более 30 км². Тела метасоматически измененных пород выделяются на основе специфических спектральных характеристик космических снимков. По характеру проявления тела метасоматитов разделяются на полнопроявленные и неполнопроявленные. К полнопроявленным разностям относятся тела метасоматитов, выделенные по космическим снимкам и показанные на геологических картах предшественников. К неполнопроявленным отнесены тела, выделенные только по спектральным характеристикам космических снимков. По составу метасоматиты разделены на кварц-гидрослюдистые аргиллизиты, вторичные кварциты и нерасчлененные. Так же к метасоматическим изменениям можно отнести показанные на схеме значимые величины каолинитового индекса (KLI). Проявления этого спектрального индекса можно рассматривать в качестве наиболее информативного показателя «кислотно-сульфатного» (High Sulfidation) типа оруденения. В пределах рудного поля Светлое индекс проявляется в виде локальных площадных аномалий, тогда как за пределами рудного поля – в виде одиночных пиксельных выделений. Другим информативным можно считать мафический минеральный индекс (MI₃). Низкие (менее 0,87) величины этого показателя обычно подчеркивают монокварцевые тела значительных размеров. В целом, рудное поле Светлое отчетливо проявлено в этом показателе в виде кольцевой структуры. В материалах дистанционных съемок строение рудного поля проявлено достаточно отчетливо. Оно приурочено к двум палеовулканическим постройкам. Месторождения размещаются в кальдерах проседания вулканических аппаратов на площадях с проявленными монокварцевыми, кварц-алунитовыми и кварц-гидрослюдистыми метасоматитами. В северо-западной постройке (более ранней), диаметром 6,5 км, расположен участок Эмми, в юго-восточной (диаметром 8,3 км) – участки Елена, Тамара, Людмила, Лариса. Обе вулканические постройки с явно проявленными кальдерами проседания (рис.1). Спектральный анализ многозональных космических снимков позволяет выделить и закартировать в пределах рудного поля тела метасоматитов – вторичных кварцитов и пропицитов. Среди вторичных кварцитов различаются монокварцевые, преимущественно кварц-алунитовые и существенно кварц-гидрослюдистые разности. Рудные тела участков Елена, Эмми, Тамара тяготеют к монокварцевым метасоматитам. В составе пропицитов выделяются хлоритовые разновидности.

Для рудоносных и потенциально рудоносных структур характерно спокойное выположенное или слабо дифференцированное аэромагнитное поле с невысокой дисперсией. В масштабе рудного поля области резко дифференцированного аэромагнитного поля могут находиться как в эпицентре этих структур (жерловая фация), так и на их периферии. В полях

распределения естественных радиоактивных элементов потенциально рудоносные структуры выделяются аномальным поведением К/Th отношения (Копылов и др., 2011). Если вмещающий субстрат имел преимущественно натровый состав, то отношение будет смещаться в сторону тория (непосредственно тип Светлого), в противном случае – в сторону калия. Кроме этого, показатель KU/ThTh еще лучше фиксирует площади развития вторичных кварцитов, так как К и U в суперкислых гидротермальных растворах весьма подвижны, тогда как Th – относительно устойчив. Месторождениям должны соответствовать области аномального изменения калий-ториевого отношения с формированием зональности распределения естественных радиоактивных элементов относительно рудных тел.

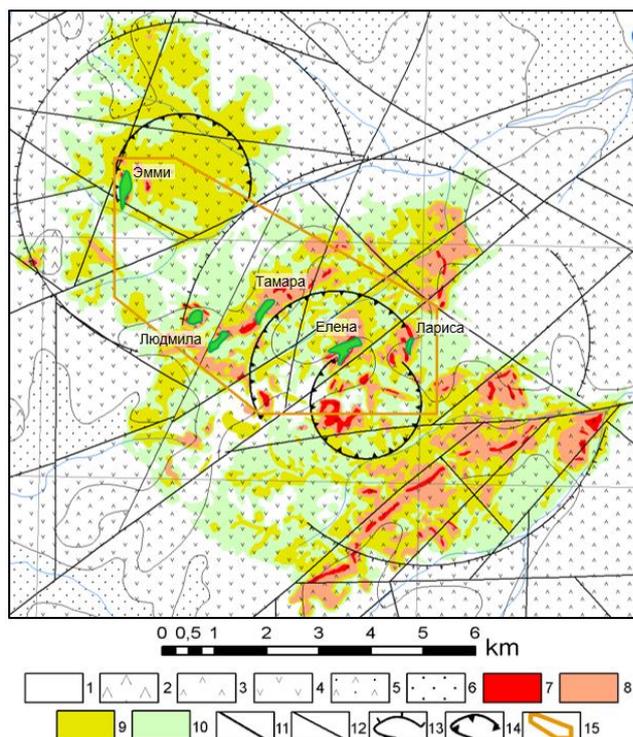


Рис. 1. Космоструктурная схема рудного поля Светлое. 1 – современные аллювиальные отложения; 2 – штоки и дайки урацкого дацит-риолитового комплекса; 3 – лавы, туфы, игнимбриты дацитов уракской свиты; 4 – лавы андезитов и андезибазальтов, туфы андезитов хетанинской свиты; 5 – туфопесчаники, туфоалевролиты, туфы дацитов амкинской свиты; 6 – дациты и их туфы, игнимбриты, андезиты и их туфы магейской свиты; 7 – 9 – вторичные кварциты: 7 – монокварцевые, 8 – кварц-алунитовые, 9 – кварц-гидрослюдистые; 10 – хлоритовые пропилиты; 11 – 12 – разрывные нарушения: 11 – главные, 12 – прочие; 13 – 14 – палеовулканические аппараты центрального типа: 13 – конус, 14 – кальдеры проседания; 15 – контур рудного поля Светлое

Месторождения расположены в пределах спокойного выположенного магнитного поля на периферии кольцевых структур сравнительно высокого порядка. Интенсивность магнитного поля в этих областях может быть разной. Однако, чем выше интенсивность поля, тем хуже перспективы. Причина этого заключается в эффекте «просвечивания» магнитоактивных подстилающих образований через кварциты. Чем ближе к поверхности подстилающие образования, тем поле сильнее, но и мощность потенциально вмещающей рудные тела толщи меньше.

2. В масштабах рудного тела распределение ассоциаций элементов первичного геохимического поля имеет концентрически-зональное строение, выражающееся в последовательной смене геохимических ассоциаций (от тыловой зоны к фронтальной): $Au-Ag-Se-Sb \rightarrow V-As-P-Fe-Mo-Pb-Sr-Sb-Cu \rightarrow K-Na-Al-Co-Zn-Ba \rightarrow Cr-Ni-Mn$.

На уровне месторождений в кислых породах устанавливается последовательность формирования геохимических ассоциаций (от центральной части к периферии): $Au, Ag, Bi, Te \rightarrow Ni, Cr, Co, Ti, V, Zn, Mn \rightarrow As, Sb, Hg, Pb, Cu (Mo, W) \rightarrow P, La, Mg, Sc, Mn, Zn, Sr, Co, Si$.

Рудное поле фиксируется концентрически-зональной структурой с пространственной сменой геохимических ассоциаций (от центральной зоны рудообразования к периферии): $Au (Mo) \rightarrow Au, Ag, Pb \rightarrow K, Na, Al \rightarrow V, Zn, (Co, Ni, Cr, Mn, P)$.

Золотая минерализация Елены, Людмилы, Тамары представлена кварц-пиритовым минеральным комплексом с единичными полиметаллическими сульфидами. Для участка Эмми

золоторудная минерализация связана с теллуридным комплексом. В обоих случаях золото частично переотложено в гипергенную стадию. Преобладающим сульфидом геогенной гидротермальной стадии является пирит, а также сульфиды полиметаллов – галенит, сфалерит и халькопирит. На Эмми широкое распространение получили блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрит и теллуриды, такие как голдфилдит, хемусит, меллонит, алтаит, теллуировисмутин и др., включая теллурид ртути – колорадоит (Yakich et al., 2021).

Представленная характеристика позволяет выделять два типа эпитептермального золотого оруденения: собственно золото-серебряный и золото-серебряно-теллуридный. Петрографическая и минералогическая характеристика рудного поля Светлое определяет его геохимический профиль.

Геохимическая зональность вторичного ореола рассеяния и концентрации локального уровня

С целью оценки уровня взаимосвязи между элементами был проведен ранговый корреляционный анализ. В результате установлено, что золото имеет значимую положительную связь с *серебром, молибденом, фосфором, свинцом*. Значимую отрицательную связь с *ванадием* и *цинком*. Практически все рудные элементы характеризуются значимой связью между собой. Исключение составляют пары *золото-медь, серебро-ванадий, фосфор-ванадий* и *фосфор-цинк*, между распределением содержаний которых связь не установлена.

С целью установления групп элементов, ведущих себя синхронно в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования, был проведен факторный анализ. Выделены ассоциации элементов, оказывающие нагрузки на соответствующие факторы: **Фактор 1** – *Au, Mo и Zn, V*; **Фактор 2** – *Au, Ag, Pb*; **Фактор 3** – *P, Cu*.

Вклад *первого фактора* в общую дисперсию составляет 21 %. Положительные значения фактора, связанные с *Au-Mo* ассоциацией, приурочены ко всем ранее выявленным участкам, что, очевидно, обусловлено участием данных элементов в процессе рудообразования (рис. 2). Отрицательные значения фактора образуют ореол, окаймляющий зоны минерализации. Очевидно, *Zn-V* ассоциация связана с процессом ее выноса за пределы минерализованных зон на их периферию. Значения *второго фактора*, с дисперсией 20 %, тяготеют к аномалиям золота. Ореол повышенных значений фактора приурочен к кольцевым структурам и разно ориентированным разрывным нарушениям на участках Людмила, Тамара, Елена и Лариса. На участке Эмми значения фактора образуют высококонтрастный ореол, который также контролируется линейными и кольцевыми структурами. Таким образом, *Au-Ag-Pb* ассоциация характеризует одну из стадий процесса рудообразования. *Третий фактор* вносит 14 % вклад в общую дисперсию. Крупный ореол с повышенными значениями фактора приурочен к известным участкам Эмми, Людмила и Тамара. Площадные ореолы различных размеров и интенсивности эпизодически встречаются на всей изучаемой территории, в том числе и на участках Елена и Лариса. Фактор 3 может быть связан как с перераспределением *P* и *Cu* в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования, так и с отличием в концентрации элементов в породах хитанинской и уракской свит. Анализируя распределение геохимических ассоциаций, выделенных на основе факторного анализа, можно сделать вывод о привносе рудных элементов к центру рудоносных зон *Au-Mo* и *Au-Ag-Pb* ассоциации и выносе на периферию *V-Zn* ассоциации.

Разделение геохимических проб на группы проведено методом К-средних. Предварительно содержания 8-ми элементов нормировались на их фоновые значения. Выборка из 1602 проб была разбита на 6 кластеров. Доминирующее положение в 1 кластере занимает *Au (1046)*, *Ag (42)*, *Mo (9,7)*. Все четыре пробы данного кластера расположены на участке Елена. 8 из 10 проб 3-го кластера, приурочены к золоторудным участкам Людмила и Елена, которые характеризуются тем же набором элементов с высокими концентрациями – *Au (105)*, *Ag (19)*, *Mo (5,4)*, но отличаются уровнем их накопления. Кластеры 2 и 5 характеризуются следующими геохимическими параметрами: *Au (45)*, *Ag (13)*, *Mo (4,1)* и *Au (12)*, *Ag (8,6)*, *Mo (6,5)*, соответственно и приурочены к известным рудным участкам и их периферии. В кластер 4

основной вклад вносят *Ag* (97), *Au* (15), *Pb* (6,5) соответственно, а его пробы приурочены исключительно к участку Эми. Субфоновые содержания проб из 6 кластера присутствуют за пределами минерализованных зон, занимая около 90 % площади рудного поля. Таким образом, методом К-средних проведено разделение проб на «рудные» – 1–5 кластеры и «породные» – 6 кластер.

На основании обработки и интерпретации данных литохимической съемки 1 : 50 000 масштаба установлено, что золото и его элементы-спутники, а также комплексные показатели, рассчитанные с использованием методов многомерной статистики, в пределах золоторудного поля Светлое являются надежными прогнозно-поисковыми критериями и признаками оруденения и подтверждают перспективы выделенных ранее золоторудных объектов.

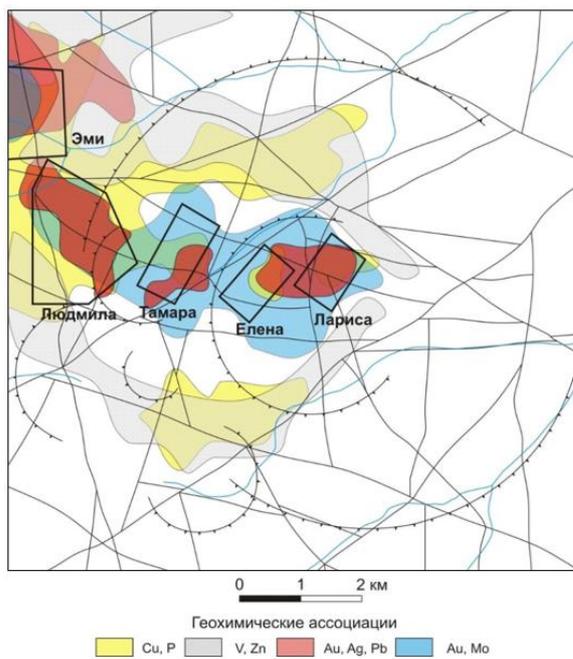


Рис. 2. Карта распределения геохимических ассоциаций по результатам факторного анализа (масштаб 1 : 50 000)

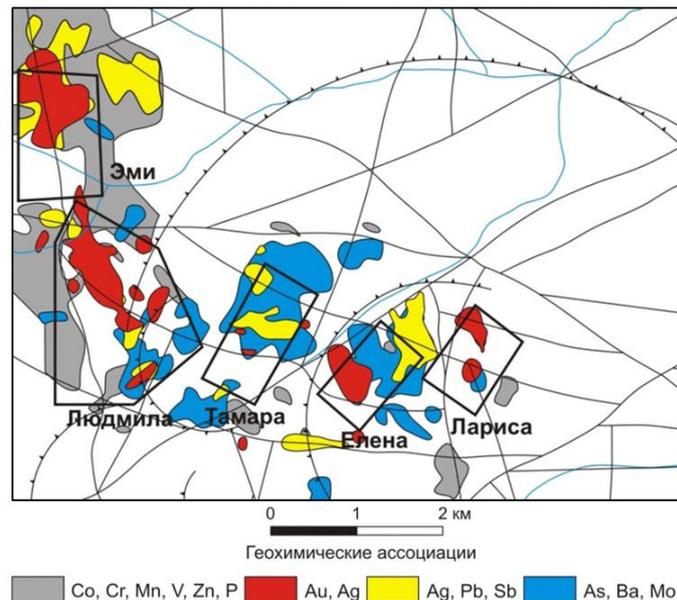


Рис. 3. Карта распределения геохимических ассоциаций по результатам факторного анализа (масштаб 1 : 10 000)

Геохимическая зональность вторичного ореола рассеяния и концентрации детального уровня

Оценка уровня взаимосвязи между распределением содержаний элементов проведена с помощью рангового корреляционного анализа. Значимой положительной корреляционной связью с золотом характеризуются *серебро, мышьяк, свинец, молибден, сурьма, медь, барий, хром*, отрицательной – *марганец, фосфор, цинк, кобальт*. Распределение концентраций *ванадия* не проявляет взаимосвязи с концентрациями золота.

Для установления геохимических ассоциаций элементов по близости поведения в процессе рудообразования был проведен факторный анализ. В результате выделено четыре ассоциации элементов: **фактор 1** – *Co, Cr, Mn, V, Zn, P*; **фактор 2** – *Pb, Sb, Ag*; **фактор 3** – *As, Mo, Ba*; **фактор 4** – *Au, Ag*. Наибольшую нагрузку на первый фактор, с вкладом в общую дисперсию 30 %, оказывают *Co, Cr, Mn, V, Zn, P*. Значения фактора образуют ограниченные по площади ореолы, тяготеющие преимущественно к периферии рудных зон (рис. 3). Данная ассоциация элементов, с возможными вариациями, является типичной для фронтальной зоны гидротермально-метасоматического ореола и более отчетливо наблюдается в мелком масштабе (ранг рудного поля). Ассоциация элементов *Ag, Pb, Sb* вносит наибольший вклад во 2 фактор. Ореолы повышенных значений фактора приурочены к известным рудным участкам, а за их пределами связаны с зонами гидротермально-метасоматического преобразования пород.

Вероятно, выявленная ассоциация элементов связана со второй, кварц-золото-висмутовой с теллуридами и сульфидами меди стадией рудообразования. Основные элементы, формирующие третий фактор – *As, Mo, Ba*, с вкладом в общую дисперсию 9,9 %. Повышенные значения фактора в пределах изучаемой площади распределены неравномерно, образуют крупные площадные ореолы, приуроченные к центральным и периферийным частям участков Тамара и Елена. Незначительные ореолы наблюдаются на участках Эмми, Людмила и Лариса. Данная ассоциация может быть связана как с третьей, кварц-прожилковой с убогой золотой минерализацией, пиритом и баритом стадией оруденения, так и обусловлена подвижностью *молибдена* и *мышьяка* в процессе гипергенеза. Четвертый фактор характеризуется наименьшим вкладом в общую дисперсию в размере 8,6 %. Повышенные значения фактора образуют ореолы на всех ранее выявленных участках. Наиболее крупные площадные ореолы расположены в пределах участков Эмми и Людмила. Таким образом, *Au-Ag* ассоциация, вероятно, характеризует кварц-пирит с сульфидами серебра и мелким золотом стадию рудообразования.

В результате проведения факторного анализа, с использованием минералогопетрографических данных (Литвинов, 2012ф), установлена геохимическая зональность гидротермально-метасоматического ореола, выразившаяся в смене ассоциаций элементов от периферии к ядерной зоне: *Co, Cr, Mn, V, Zn, P* → *Au-Ag* → *Ag, Pb, Sb* → *As, Mo, Ba*.

На основе кластерного анализа построена иерархическая структура корреляционных связей между химическими элементами. Установлены следующие пять групп элементов: **1.** *V, Cr, Zn, Mn, Co*; **2.** *Pb, Sb*; **3.** *Ba, Mo, As*; **4.** *Au, Ag*; **5.** *Cu, P*.

Методом К-средних проведено разделение массива проб на 8 кластеров. Предварительно истинные содержания элементов нормировались на их фоновые концентрации. 1, 2 и 4 кластерам свойственны высококонтрастные содержания золота во вторичном геохимическом ореоле золоторудного поля Светлое. Кроме аномальных концентраций золота кластеры отличаются геохимическими спектрами с высоким уровнем накопления: *Au (5335), Ag (247), Mo (24), Sb (12), As (5,8)* – 1 кластер, *Au (3205), Ag (93), Mo (15), Sb (12), Pb (5,2)* – 2 кластер, *Au (1165), Ag (54), Mo (11), Sb (4,9), Ba (4,8)* – 4 кластер. В то же время, количество проб, входящих в данные кластеры – незначительно (n=15), все они, за исключением одной пробы, приурочены к участку Елена. Пробы 5 кластера также немногочисленны (n=18), преимущественно расположены в пределах участков Елена, Людмила и Эмми и характеризуются высокими содержаниями *Au (494), Ag (66), Sb (9,6), Mo (6,4)*. Основной вклад в 8 кластер вносят *Au (196), Ag (30), Mo (16), As (7,4)*, а в кластер 6 – *Au (51), Ag (21), Mo (5,7), Sb (5,1)*. Пробы с данными геохимическими характеристиками присутствуют на всех ранее выделенных участках. За исключением двух проб, к участку Эми приурочены геохимические пробы 3 кластера, характеризующиеся следующей специализацией: *Ag (243), Au (30), Sb (7,6), Pb (6,8)*. Кластер 7 имеет повсеместное распространение в пределах изучаемых участков и характеризуется повышенными содержаниями *Au (4,4)* и *Ag (3,9)*. Очевидно, пробы данного кластера характеризуют наименее измененные в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования породы.

Таким образом, на основе кластер-анализа установлена геохимическая специализация кластеров, характеризующих различные стадии процесса рудообразования, а также геометризованы области их распространения – «рудные» кластеры 1–6, 8, а также кластер 7, отражающий внешнюю зону гидротермально-метасоматического ореола – «породный» кластер.

В результате обработки геохимических данных детальной литохимической съемки ранговым корреляционным анализом определена взаимосвязь в поведении элементов. На основе факторного анализа, установлены рудные ассоциации элементов. С помощью кластер-анализа также выделены ассоциации элементов и «рудные» пробы, характеризующиеся различной геохимической специализацией и, за редким исключением, приуроченные к известным рудным участкам.

В распределении геохимических ассоциаций факторного анализа, отображенного на рис.3, обращает на себя внимание разобщённость ассоциации *Co, Cr, Mn, V, Zn, P* и *As, Ba, Mo*,

что может быть вызвано породным фактором: первая ассоциация сосредоточена на средних вулканических породах хетаны (участок Эмми и запад-северо-запад участка Людмила), вторая же – в кислых вулканитах уракской свиты (участки Елена, Тамара, Лариса, Юго-восток участка Людмила).

Факторный анализ участка Елена выделяет четыре ассоциации элементов: фактор 1 – P, La, Mg, Sc, Mn, Zn, Sr, Co, Si; фактор 2 – As, Sb, Hg, Pb, Cu, U, (Mo, W); фактор 3 – Ni, Cr, Co, Ti, V, Zn, Mn; фактор 4 – Ag, Au, Bi. Ассоциация фактора 4 – Ag, Au, Bi – точно фиксирует положение промышленной рудной залежи участка. Ассоциация элементов фактора 3 – Ni, Cr, Co, Ti, V, Zn, Mn – образует фронтальную зону участка, вмещающего оруденение. Ассоциация Ф2 – As, Sb, Hg, Pb, Cu, U, (Mo, W) – приурочена к зонам максимального гидротермально-метасоматического преобразования пород и образуется совместно с так называемым литокапом, вмещающим оруденение. А геохимическая ассоциация фактора 1 – P, La, Mg, Sc, Mn, Zn, Sr, Co, Si – фиксирует в фронтальную зону концентрирования в наименее изменённых породах (рис. 4).

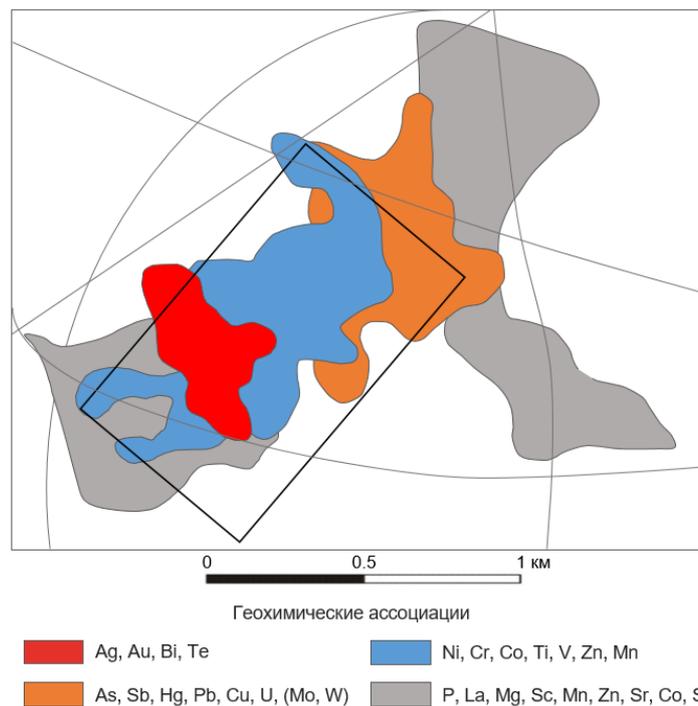


Рис. 4. Карта распределения геохимических ассоциаций по результатам факторного анализа участка Елена (масштаб 1 : 10 000)

Геохимическая зональность первичного ореола рассеяния и концентрации локального уровня

С целью оценки уровня взаимосвязи между элементами был проведен ранговый корреляционный анализ, по результатам которого установлено, что значимую положительную связь с распределением золота имеют *серебро, хром, никель, сурьма, марганец, барий, молибден, медь, селен, железо, кобальт*. Отрицательной взаимосвязью характеризуются *алюминий, цинк, калий, фосфор, натрий, сера, свинец*. Для определения ассоциаций элементов, ведущих себя идентично в первичных ореолах рассеяния участка Елена, был проведен факторный анализ. Установлено 4 ассоциации элементов: 1) V, As, P, Fe, Mo, Pb, Sr, Sb, Cu; 2) Cr, Ni, Mn; 3) K, Na, Al, Co, Zn и Ba; 4) Au, Ag, Se, Sb, вносящих 49 % вклад в общую дисперсию факторов. Повышенные значения 1 фактора распространены в центральной и краевой части минерализованной зоны (рис.5). Данная ассоциация характеризует наиболее раннюю рудную стадию гидротермально-метасоматического процесса. Ассоциация элементов 2 фактора ограничено распространена по периферии минерализованной зоны. Она, очевидно, отражает наличие слабо измененных пород – породный фактор. Ассоциация элементов 3 фактора связана с процессами аргиллизации пород уракской свиты (K₂ur), а также, вероятно, с

ее переотложением на периферию минерализованной зоны. 4 фактор оказывает нагрузку на основные рудные элементы – золото и серебро, а также селен и сурьму, отложившиеся в более позднюю стадию рудного процесса. Повышенные значения фактора приурочены к центральной зоне рудообразования и характеризуют наиболее богатые золотые руды.

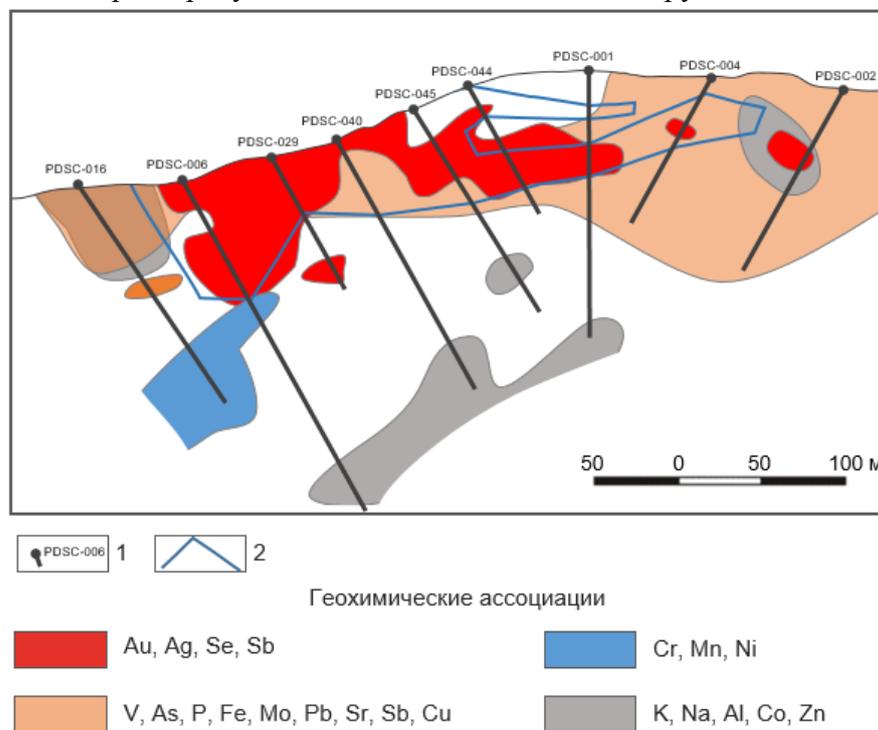


Рис. 5. Карта распределения геохимических ассоциаций по результатам факторного анализа по разведочной линии 7500 (масштаб 1:5 000).

1 – скважина и её номер; 2 – контур рудного блока по бортовому содержанию золота 0.5 г/т.

Таким образом, в распределении ассоциаций элементов наблюдается концентрически-зональное строение, выражающееся в последовательной пространственно-временной смене геохимических ассоциаций (от тыловой зоны к фронтальной): Au-Ag-Se-Sb → V-As-P-Fe-Mo-Pb-Sr-Sb-Cu → K-Na-Al-Co-Zn-Ba → Cr-Ni-Mn.

Кластер-анализ по переменным (элементам) был проведен по 22 элементам. Элементы образовали следующие ассоциации: 1. Ni, Cr, Mn; 2. Na, K, Zn, S; 3. Cu, Co; Pb, As, Sb, Mo, Ba; 4. V, Fe, P, Sr, Al; 5. Au, Ag, Se. Методом К-средних наблюдения (пробы) были разбиты на 8 кластеров. Предварительно содержание каждого элемента нормировалось на среднее геометрическое, рассчитанное по участку Елена. В разведочной линии 7500 кластер 1 пространственно совпадает с наиболее высокими содержаниями золота. Он имеет следующую геохимическую специализацию: Au (137), Ag (49), Sb (47), Ni (12), As (10), Se (8.1), Ba (5.7), Mo (5.4). Кластеры 2 и 8 характеризуются аномально высокими содержаниями золота и серебра, а кластер 3 – высоким содержанием серы. Все три кластера отсутствуют в пределах разведочной линии 7500, а количество проб в них входящих очень ограничено (n=20). Пробы 4 кластера присутствуют в пределах участка Елена в ограниченном объеме (чуть более 5 %), а в разрезе 7500 установлено 3 пробы в скважине PDSC-006. Кластер имеет специализацию на Ni (60), Au (12), Ag (8.2), Mo (7.8), Cr (7.8), Mn (7.4), Sb (6.1), Ba (5.8). Пробы 5 кластера входят в контур рудного тела, т.е. являются типичными рудными пробами, и характеризуются следующими концентрациями элементов: Ag (39), Au (37), Sb (23), Ni (9), Se (5.8), Ba (5.3), As (5.2), Mo (4.6), Cr (4.4). Пробы 7 кластера с субфоновыми содержаниями элементов имеют наибольшее распространение в зоне вторичных кварцитов за пределами промышленного оруденения. Геохимический спектр кластера 6, представленный повышенными содержаниями Zn (10), K (5.8), Na (4.4), Co (3.5), отражает зону аргиллизации по породам уракской свиты.

Методом К-средних в пределах разведочной линии 7500 установлены группы проб, характеризующие рудную зону – кластеры 1 и 5, зону субфоновых концентраций элементов (вторичных кварцитов) – кластер 6, зону аргиллизации – кластер 7, а также пробы с высоким содержанием никеля и ряда других элементов – кластер 4.

На основании обработки геохимических данных по первичным ореолам рассеяния участка Елена ранговым корреляционным анализом оценена взаимосвязь между проанализированными элементами. По результатам факторного анализа выявлены ассоциации элементов, связанные с предрудной и рудной стадиями гидротермально-метасоматического процесса. Кластер-анализ переменных позволил выделить группы элементов, а метод К-средних – «рудные» пробы, а также пробы, относящиеся к различным фациям метасоматитов: аргиллизитам и вторичным кварцитам.

Результаты геолого-структурного и геохимического анализа участка Дюльбаки

Для формирования и закрепления прогнозно-поискового комплекса и геолого-поисковой модели была проведена работа по прогнозированию и поиску аналогичных объектов в окрестностях рудного поля Светлое, включающая геолого-структурный анализ на данных дистанционного зондирования и анализ геохимических данных, полученных при полевых рекогносцировочных и систематических поисковых работах. Перспективными участками могут или могли (прошедшее время определено после полевых заверочных работ) выступать – Дюльбаки, Алядакан и Большая Холи. На всех выделенных участках проведены заверочные полевые работы различной детальности, среди которых Дюльбаки является самым изученным, а Большая Холи – наименее. Информация по участкам Алядакан и Большая Холи представлена в диссертационной работе.

Участок Дюльбаки. Участок Дюльбаки находится в 40 км к северо-востоку от месторождения Светлое и приурочен к Дюльбакинскому разлому мантийного заложения и одноимённой структуре оседания. Стратифицированные отложения участка представлены вулканическими породами верхнемеловых амкинской, хетанинской, уракской свит. В центральной части участка установлена субвулканическая интрузия дацит-риолитового состава.

Породы участка представляет изометричный в плане массив средне-низкотемпературных метасоматитов, равновесных с кислыми растворами – вторичными кварцитами, аргиллизитами. Наблюдается концентрически-зональное строение массива. Монокварциты развиты в наиболее эродированных участках, приуроченных к дизъюнктивам северо-западного и северо-восточного простирания и эрозионным окнам во врезях ручьев. Преобладают массивные разности, пористые встречаются значительно реже. Породы часто имеют тонкую неравномерную сульфидную вкрапленность, среди которой резко преобладает пирит. По монокварцитам интенсивно развиты гидроокислы железа – пятнами по массе и по трещинам отмечаются гематит, лимонит, гётит – вплоть до образования лимонитовых «сухарей». Кварциты алунитовые слагают основную часть массива. Количество сульфидной вкрапленности не превышает 2-3%. Широко развита лимонитизация как по массе, так и по трещинам. Диккит-каолинитовые кварциты развиты участками в центральной части участка, реже по его периферии. Аргиллизиты развиты в краевых частях и линзами в центральной части массива и представлены диккит-каолинитовыми метасоматитами (содержание вторичного кварца менее 50%). Пропилиты хлоритовой фации отмечаются на периферии массива, развиты по андезитам, трахиандезитам и туфам хетанинской свиты верхнего мела.

Участок Дюльбаки аналогично Светлому приурочен к площадям слабо дифференцированного магнитного поля, образующего кольцевые структуры среднего порядка. При этом на Дюльбакинской площади проявлена субвулканическая жерловая интрузия, выражающаяся резко дифференцированным магнитным полем.

Для площадей развития монокварцитов и алунитовых кварцитов характерны низкие значения поля К. Рудное поле Светлое лежит в области низких значений поля К. Участок Дюльбаки характеризуется низкими и средними значениями поля К.

Закономерности положения рудного поля Светлое и Дюльбакинской площади в поле K/Th отношения показано на рисунке 6. Приуроченность рудоносных площадей к аномалиям естественных радиоактивных элементов, а именно K/Th отношения, может быть объяснено с двух позиций. Если вмещающий субстрат имел преимущественно натровый состав, то отношение будет смещаться в сторону тория (непосредственно тип Светлого). В противном случае – в сторону калия. Поведения K и Th в суперкислых гидротермальных растворах различны – K выносится из зон метасоматоза, Th, как инертный элемент, устойчив.

Промышленные рудные объекты рудного поля Светлое тяготеют к краевым частям кальдер проседания диаметром 2.5-3.5 км. Метасоматиты участка Дюльбаки размещены в краевой части кальдеры проседания диаметром 1.7 км (рис. 7).

На обеих площадях, по данным дешифрирования космических снимков ASTER, проявлены монокварцевые, алунитовые вторичные кварциты, кварц-гидрослюдистые аргиллизиты и пропилиты (рис. 8, 9). Обе площади контролируются узлами сопряжения продольных северо-восточных и поперечных северо-западных разрывных нарушений.

Таким образом, по качественным характеристикам Дюльбакинский участок максимально схож с рудным полем Светлое. Однако площади проявления (км²) характерных аэрогеофизических и метасоматических признаков на Дюльбакинском участке значительно уступают таковым в пределах рудного поля Светлое.

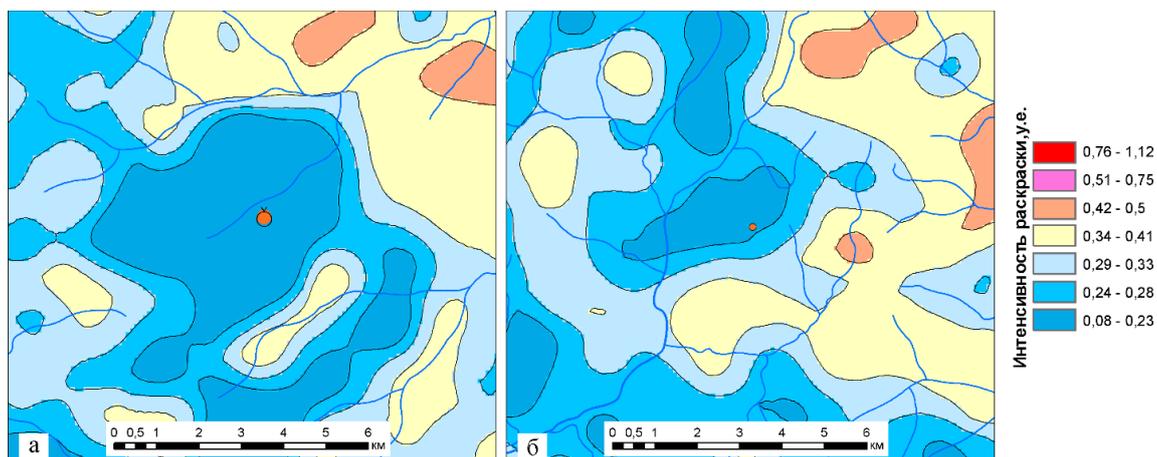


Рис. 6. Проявление рудного поля Светлое (а) и Дюльбакинской площади (б) в поле K/Th отношения

Показатель KU/ThTh еще лучше фиксирует площади развития вторичных кварцитов (рис.7). K и U в суперкислых гидротермальных растворах весьма подвижны, тогда как Th – относительно устойчив.

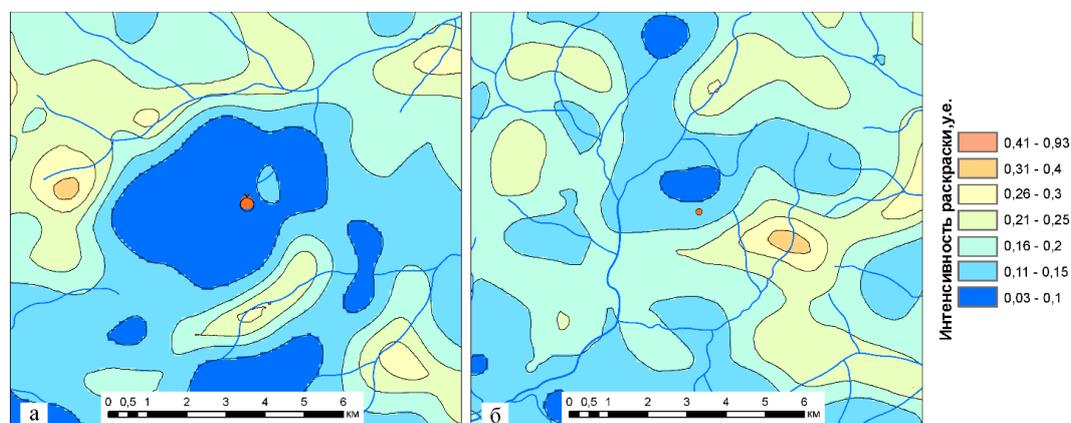


Рис. 7. Проявление рудного поля Светлое (а) и Дюльбакинской площади (б) в поле KU/ThTh отношения

Детальное дешифрирование космических снимков Aster и Sentinel на площадь участка Дюльбаки показало, что он располагается в узле сопряжения северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений и приурочен к кальдере проседания палеовулканического аппарата. В кальдере проседания и за ее пределами проявлены вторичные кварциты и аргиллизиты различного состава. На дешифрируемой площади проявлены продольные и поперечные (по отношению к осевой части Охотско-Чукотского вулканического пояса) разрывные нарушения. Наиболее крупной разрывной структурой является зона Дюльбакинского продольного разлома северо-восточного простирания. Поперечные разрывные нарушения участка представлены северо-западными субвертикальными разрывами.

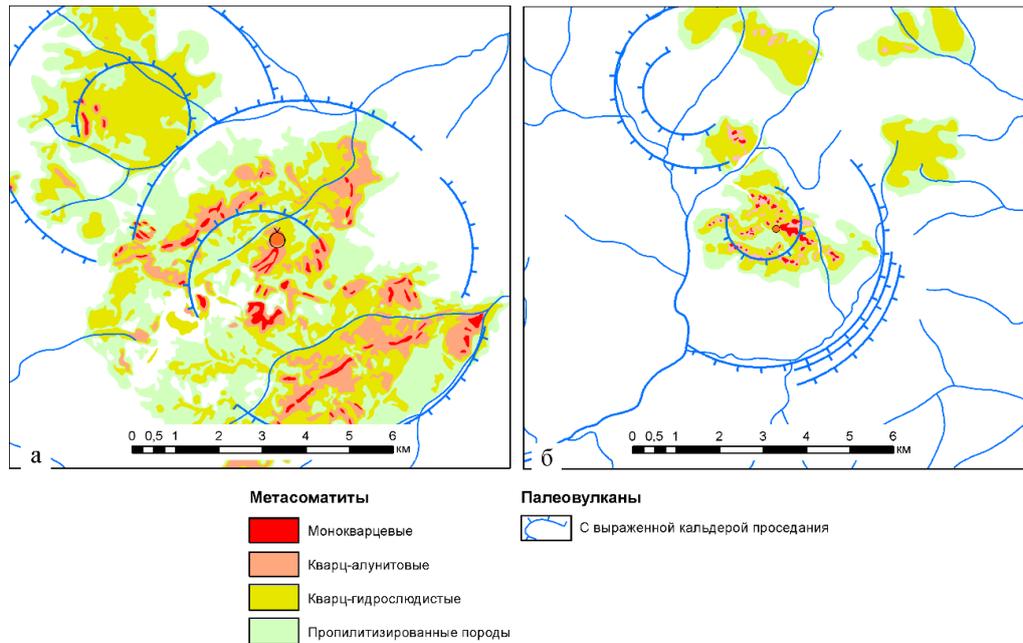


Рис. 8. Положение рудного поля Светлое (а) и Дюльбакинской площади (б) относительно кальдер проседания и дешифрируемых метасоматитов

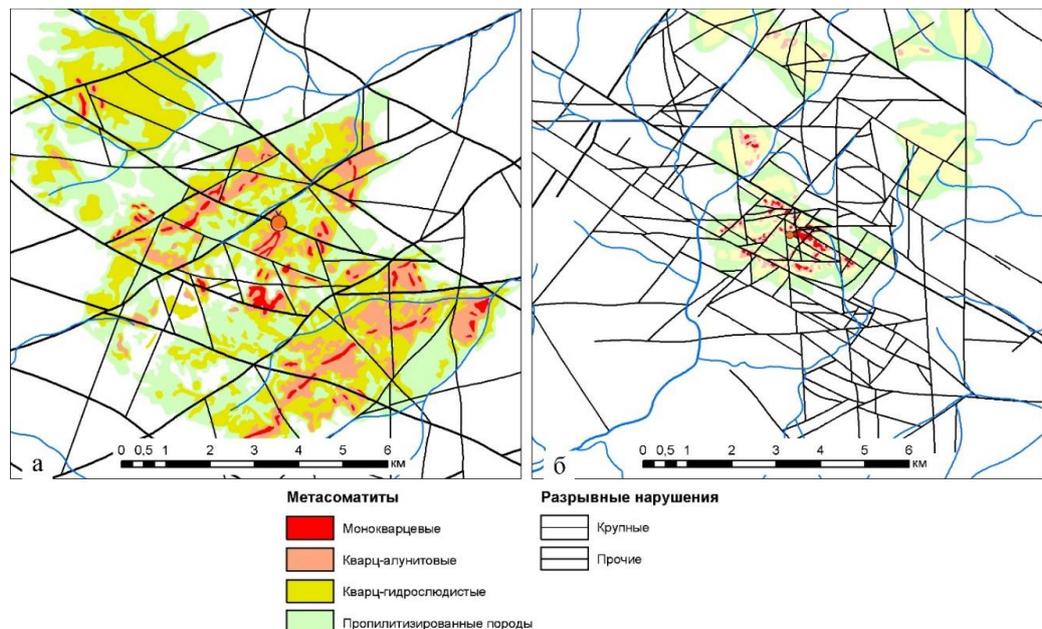


Рис. 9. Положение рудного поля Светлое (а) и Дюльбакинской площади (б) относительно разрывных нарушений и дешифрируемых метасоматитов

К узлам сопряжения продольных и поперечных разрывов приурочены палеовулканические постройки и субвулканические и жерловые интрузии кислого состава. Субвулканические и жерловые интрузии подчеркиваются кольцевыми структурами диаметрами от 0.4 до 3 км.

На площади закартировано две палеовулканические постройки – собственно Дюльбакинская и Тихая (названа по одноименному ручью в северо-восточной части площади), которые выражаются системами телескопированных кольцевых структур диаметрами 1.7-6 км. Обе постройки имеют кальдеры проседания. При этом, в слабо выраженной кальдере проседания палеовулканической постройки Тихая метасоматически измененные породы не фиксируются. Единичные тела слабо проявленных вторичных кварцитов и аргиллизитов вскрываются на склонах и у основания палеовулканической постройки. Как показывает мировой опыт, в метасоматитах склонов и оснований палеовулканических построек сколь угодно значимых золоторудных объектов не установлено – обычно это минерализованные точки и рудопроявления. Напротив, в Дюльбакинской палеовулканической структуре метасоматиты проявлены как на склонах, так и в кальдере проседания. Здесь, вторичные кварциты и аргиллизиты полно проявленные и контролируются поперечными разрывными нарушениями. При этом площадь метасоматического ореола на превышает 7 км².

С целью расшифровки структуры геохимического поля и выделения групп элементов по схожести поведения в геологических процессах, был проведен факторный анализ. Установлены факторы, оказывающие значимые нагрузки на соответствующие ассоциации элементов: Фактор 1 – Bi, Sb, V, Cu, Co, Zn, Sn, W; Фактор 2 – Mo, Ag, Pb, Sn; Фактор 3 – P, As и Co. Наибольший вклад в общую дисперсию вносит первый фактор – 25.5 %. Он оказывает максимальные нагрузки на Bi, Sb, V, Cu, Co, Zn, Sn, W. Повышенные значения фактора расположены, преимущественно, за пределами кальдеры проседания (рис. 10). Данная геохимическая ассоциация вынесена из зоны активного гидротермально-метасоматического рудообразования и локализована на ее периферии.

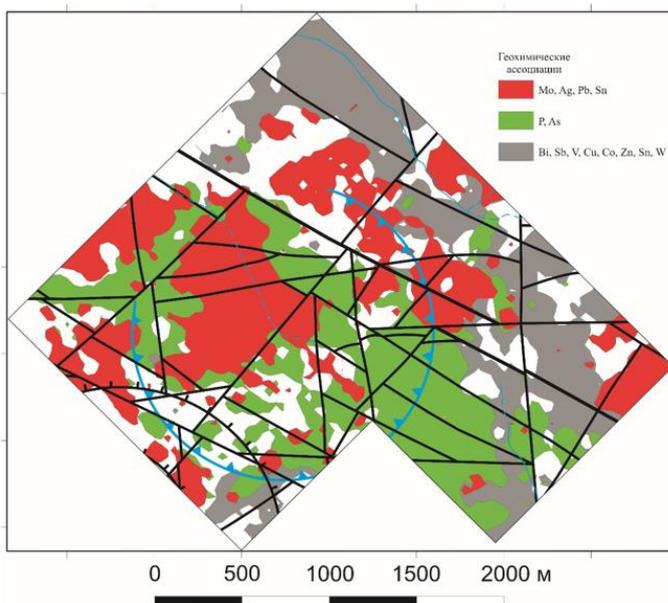


Рис. 10. Распределение геохимических ассоциаций на участке Дюльбаки по данным факторного анализа. Условные обозначения см. на рис. 8 и 9

Геохимическая ассоциация Mo, Ag, Pb, Sn проявляют наибольшую корреляцию со вторым фактором, вклад в общую дисперсию составляет 12.3 %. Аномальные концентрации золота, а также области распространения монокварцитов и алунитовых кварцитов, проявляют пространственную связь с повышенными значениями фактора и располагаются, преимущественно, по периферии кальдеры проседания и в ее центральной части. Данная геохимическая ассоциация связана с процессами отложения рудоносных растворов. Третий фактор значимо влияет на P, As и Co. Доля фактора в общей дисперсии составляет 11.6 %.

Положительные значения фактора (P, As), приуроченные к кальдере проседания и зоне интенсивных тектонических нарушений, образуют ореол, простирающийся в северо-западном направлении. Отрицательные значения фактора, связанные с распределением содержания кобальта, расположены по периферии кальдеры проседания, совпадая с геохимической ассоциацией первого фактора. В результате факторного анализа установлена последовательная смена геохимических ассоциаций от центральной части гидротермально-метасоматической системы к периферии: Mo, Ag, Pb, Sn → P, As → Bi, Sb, V, Cu, Co, Zn, Sn, W.

На основе кластерного анализа установлено четыре группы элементов: 1. V, Cu, Co, Cr; 2. Pb, Sb, Bi, Sn, Zn, W; 3. Pb, Mo, Ag; 4. P, As, Au.

Для выделения групп проб, характеризующихся идентичным химическим составом, был проведен кластер-анализ – метод К-средних. Предварительно содержание каждого элемента нормировалось на его среднее геометрическое. Было выделено 8 классов проб со средними коэффициентами концентрации (КК) элементов, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Элемент / Кластер	№ 1 (n=8)	№ 2 (n=34)	№ 3 (n=1457)	№ 4 (n=705)	№ 5 (n=112)	№ 6 (n=19)	№ 7 (n=227)	№ 8 (n=2)
Au	78*	34	1.1	0.9	14	4.5	4.1	209
Ag	1.1	1.2	1.1	1.4	1.2	2.7	1.6	0.6
Mo	4.2	4.7	1.3	0.9	3.4	22.2	4.7	2.1
Bi	1.1	1.0	0.9	1.4	1.1	1.0	1.1	1.2
Sn	1.2	1.1	1.0	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
Co	0.7	0.8	0.8	2.2	0.7	1.3	0.8	0.7
W	5.0	1.9	1.0	2.0	1.3	2.6	1.4	0.6
Cu	1.2	1.0	0.9	1.9	1.0	1.2	1.2	0.8
Pb	0.9	1.3	1.2	0.8	2.1	1.4	2.0	1.4
V	1.1	0.8	0.9	1.5	0.9	1.1	1.0	0.8
As	1.5	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.8
Sb	1.1	0.9	1.0	1.4	0.9	1.1	1.0	0.8
Cr	0.8	1.0	1.0	1.6	1.0	1.1	1.0	0.8
Zn	1.6	1.2	1.0	1.5	1.1	1.0	1.3	1.3
P	2.5	1.9	1.3	1.0	1.7	1.1	1.9	2.4

* – жирным шрифтом выделены концентрации элементов, вносящие основной вклад в кластеры (КК>3 ед.)

Кластеры 1 и 2 характеризуются высокими содержаниями Au, Mo и W. Практически все пробы, принадлежащие данным кластерам, совпадают с аномальными концентрациями золота. Наибольшим количеством проб в группах характеризуются 3 и 4 кластеры. Кластер 3 тяготеет к центральной части участка, а кластер 4 – к его периферии. Также отмечается более повышенное содержание отдельных элементов в 4 кластере (Co, W, Cu, Cr, Zn, V, Bi, Sb), что, очевидно, обусловлено отгонкой данных элементов на периферию гидротермально-метасоматического ореола. Преимущественно к периферийным частям ореолов золота тяготеют пробы 5 и 7 кластеров. Их геохимические спектры не имеют существенных отличий, за исключением более высокой концентрации золота в 5 кластере (КК=14 ед.). Пробы 6 кластера немногочисленны (n=19) и распределены по площади достаточно хаотично. Кластер 8 представлен двумя пробами, основной характеристикой которых является ураганное содержание золота (КК=209 ед.).

На основе результатов кластер-анализа установлено, что пробы с наиболее контрастным распределением химических элементов (кластеры 1 и 2) приурочены к немногочисленным площадным аномалиям золота. По их периферии расположены пробы с более низкими концентрациями золота – кластеры 5 и 7. Фоновые концентрации золота занимают основную часть площади участка и характеризуют гидротермально-метасоматические образования с субфоновыми (кластер 3) и более высокими (кластер 4) содержаниями большинства элементов. Пробы 2 и 8 кластеров характеризуются эпизодическим и незакономерным проявлением в пределах участка. Таким образом, в распределении кластеров в пределах участка прослеживается концентрически-зональная структура, выражающаяся в смене групп проб (от

центра к периферии): кластер 1 (Au (78), W (5), Mo (4,2)) → кластер 2 (Au (34), Mo (4,7)) → кластер 5 (Au (14), Mo (3,4)) → кластер 7 (Mo (4,7), (Au (4,1))) → кластер 3 (субфоновые концентрации элементов) → кластер 4 (КК элементов от 0.8 до 2.2).

Расшифровка строения аномального геохимического поля позволила установить концентрически-зональное строение вторичного ореола рассеяния, приуроченного к золото-серебряному оруденению. Зональность аномального геохимического поля проявлена в пространственной смене геохимических ассоциаций (от тыловой зоны к фронтальной): Mo, Ag, Pb, (Au) → P, As → V, Cu, Co, Zn, W.

Выявленные закономерности геологического строения участка Дюльбаки в целом близки к таковым рудного поля Светлое. Однако, оцененная площадь метасоматического ореола составляет всего 7 км² (против 30 км² на рудном поле Светлое). Установленные на участке Дюльбаки аномальные концентрации золота характеризуются низкой контрастностью и ограниченным площадным распространением. Модель аномального геохимического поля, составленная на основании результатов факторного анализа, характеризуется слабо проявленным концентрически зональным строением. Площадь распространения метасоматически измененных пород и их интенсивность значительно меньше, чем на месторождениях рудного поля Светлое. Оцененные прогнозные ресурсы по результатам поисковых работ 2018 года и работ предшественников (Федореев, 2010ф) составляют около 400–500 кг. Следующие критерии и признаки: комплексный ореол, уровень эрозионного среза по которому оценен как надрудный; увеличение количества монокварцитов аналогичных Светлому с понижением гипсометрического уровня в разрезах (по обнажению в рельефе); повышенная кислотность вод аналогично Светлому; штучные пробы со значимыми содержаниями золота, обнаруженные в нижних частях разреза – давали основание для предположения о наличии слепое оруденение, которое не подтвердилось по результатам 2 км поискового колонкового бурения. В центре участка выделен концентрически-зональный изометричный в плане массив метасоматически измененных пород – вторичных кварцитов, аргиллизитов. В нижних частях разреза по буровому профилю отмечена фация иллит-пиритовых метасоматитов, характеризующие периферийную часть вторичных кварцитов. Метасоматическая зональность аналогична зональности рудного поля Светлое, но изменения менее объёмны и проявлены значительно слабее. Промышленных рудных пересечений в скважинах получено не было.

3. *Разработаны основные региональные и локальные критерии поиска и оценки золотого эпитермального оруденения, характеризующиеся комплексом геохимических, геофизических и геолого-структурных факторов, которые отражают особенности размещения оруденения в структурах региона.*

Положение в крупных региональных и локальных тектонических и вулканоплутонических структурах, геологическое строение, метасоматическая и геохимическая зональность подтверждает принадлежность рудного поля Светлое к эпитермальным золото-серебряным месторождениям кислотно-сульфатного типа. В результате обобщения полученных материалов выявлены закономерности проявления рудных таксонов в материалах дешифрирования спектрозональных космических снимков и интерпретации геофизических данных, во вторичном и первичном геохимическом поле. На основании этих закономерностей сформулированы критерии и признаки золотого эпитермального оруденения.

Основными геолого-структурными элементами рудоконтроля для масштаба Среднеульинского рудного района являются вулканотектонические депрессии как структуры I порядка, вулканотектонические структуры оседания – структуры II порядка, остатки палеовулканических построек центрального типа, тела секущих изверженных горных пород, разрывные нарушения.

Для масштаба Уенминского рудного узла рудоконтролирующими геолого-структурными элементами являются разрывные нарушения, остатки палеовулканических построек в том числе

с проявленной кальдерой проседания, тела секущих интрузивных, субвулканических и жерловых образований, вторичные кварциты и аргиллизиты без разделения по фациям.

Для масштаба рудного поля Светлое – палеовулканические постройки с кальдерами проседания, разрывные нарушения, ореолы метасоматически измененных горных пород различного состава, стратифицированные образования и секущие интрузивные и субвулканические тела.

Известные золоторудные таксоны (рудные районы, узлы, поля) пространственно сопряжены с различными вулcano-тектоническими структурами. Рудные узлы размещаются в пределах дешифрируемых в материалах дистанционного зондирования систем кольцевых структур диаметром 45-60 км. Эти структуры интерпретируются как вулcano-тектонические депрессии, развитые над внутрикоровыми магматическими камерами, вулcano-плутоническими комплексами и ареалами их влияния. Рудные поля тяготеют к краевым частям вулcano-тектонических депрессий. Дистанционными критериями для выделения потенциальных рудных полей являются системы кольцевых структур диаметром от 1 до 14 км. Такие структуры интерпретируются как частные вулканические постройки. Положение вулканических построек контролируется узлами сопряжения северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений. В потенциально рудоносных с кислотно-сульфатным типом оруденения вулканических постройках должна быть проявлена кальдера проседания и метасоматический ореол значительной площади (в рудном поле Светлое его площадь более 30 км², однако, не следует привязываться к этой величине при формировании поисковой модели, потому что существуют крупные месторождения кислотно-сульфатного типа, в рудном поле которых метасоматический ореол проявлен на площади до 10 км² в виду наличия перекрывающих толщ либо более поздних осадочных комплексов, либо экранирующего слоя менее проницаемых вулканических пород (Gray et al., 1994; Sillitoe, 2015). Другими признаками потенциальной рудоносности частных вулканических построек могут служить особенности проявления значимых величин каолинитового (KLI) и мафического (мафического (MI₃)) спектральных индексов) спектральных индексов. На рудоносных площадях каолинитовый индекс проявлен в виде локальных площадных аномалий, а мафический индекс (значения менее 0,87) указывает на возможное присутствие монокварцевых тел значительных размеров. Месторождения кислотно-сульфатного типа размещаются в кальдерах проседания в участках развития монокварцевых, кварц-алунитовых и кварц-гидрослюдистых метасоматитов, которые могут быть закартированы по результатам спектрального анализа снимков ASTER.

Результаты интерпретации геофизических исследований подтверждают результаты дешифрирования космоснимков. Достаточно чётко определяются кольцевидные структуры, эпицентры которых контролируются разнонаправленными тектоническими нарушениями. Эти структуры и разрывные нарушения отчётливо проявлены в магнитном поле, кроме нарушений северо-восточного простирания, которые, по-видимому, являются наиболее древними и в значительной мере заретушированы наложенными процессами. Потенциально рудоносные кольцевые структуры должны быть приурочены к кольцевой структуре среднего порядка, расположенной на периферии более крупной кольцевой структуры. Кольцевые структуры характеризуются спокойным выположенным магнитным полем. Знак поля значения не имеет, так как зависит от принятого уровня фона. Главным определяющим фактором является пониженная дисперсия. Области резко дифференцированного магнитного поля могут находиться как в эпицентре этих зон (жерловая фация), так и на их периферии. В полях распределения естественных радиоактивных элементов потенциально рудоносные структуры должны картироваться аномальным поведением K/Th отношения. Если субстрат имел преимущественно натровый состав, то отношение будет смещаться в сторону тория (непосредственно тип Светлого), в противном случае – в сторону калия (Копылов М.И. и др., 2011). Кроме этого, предлагается использовать отношение KU/ThTh.

Выявление прямых признаков золотого оруденения и определение парагенетических геохимических ассоциаций во вторичном поле рассеяния является достоверным индикатором

рудного процесса. В результате обработки данных крупномасштабной (1:50000) и детальной (1:10000) литохимических съемок обоснованы следующие геохимические критерии и признаки.

1. Прямым признаком золотого оруденения, хорошо проявленным в пределах рудного поля, является наличие концентраций Au и Ag во вторичных ореолах рассеяния, превышающих минимально-аномальные значения.

2. На основе имеющейся аналитической информации элементами-спутниками эпitherмального золотого оруденения, кроме Au и Ag, следует считать: Sb, Bi, Te, Se, As, Mo, Cu.

3. Аномально низкие концентрации K, Al, Na в масштабе рудного поля характеризуют зону выноса макроэлементов. В их пределах могут отлагаться рудные минеральные ассоциации. Геохимическая ассоциация V, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, P на детальном уровне фиксируется во фронтальной зоне концентрирования. При этом она более отчетливо проявлена в метасоматитах, развитых по породам хетанинской свиты.

4. В масштабе рудного поля V, Zn и, вероятно, ряд других (сидерофильных) элементов выносятся из центральной зоны рудообразования и накапливаются на ее периферии, что может служить дополнительным критерием выделения перспективных (зоны выноса) и «пустых» (зоны фронтального концентрирования) участков.

5. С использованием кластер-анализа наблюдений возможна геометризация площадей с ярко выраженной неоднородностью геохимического спектра, характеризующих рудное и околорудное пространство, выделение областей с «породной» составляющей, а также установление геохимических специализаций выделенных участков с возможностью прогнозирования уровней эрозионного среза оруденения.

6. Установлено, что во вторичном геохимическом поле ассоциации элементов образуют концентрически-зональную структуру с последовательной пространственно-временной сменой геохимических ассоциаций (от центральной зоны рудообразования к периферии): Au, Mo → Au, Ag, Pb → K, Na, Al → V, Zn, (Co, Ni, Cr, Mn, P).

В пределах минерализованных зон (с учетом стадийности рудообразования) устанавливается следующая последовательность формирования геохимических ассоциаций (от центральной части к периферии): Au-Ag → Ag, Pb, Sb → As, Mo, Ba → Co, Cr, Mn, V, Zn, P.

Обобщенная модель аномального геохимического поля Светлое отражается в следующих особенностях. Во вторичном геохимическом поле ассоциации элементов образуют концентрически-зональную структуру с последовательной пространственно-временной сменой геохимических ассоциаций (от центральной зоны рудообразования к периферии): Au, Ag, Pb, Sb → Au, As, Mo, Ba → K, Na, Al → Co, Cr, Mn, V, Zn, P.

Наиболее ранняя предрудная Co, Cr, Mn, V, Zn, P геохимическая ассоциация образована на начальной стадии метасоматического преобразования пород. Ассоциация макроэлементов – K, Na, Al связана с процессом образования вторичных кварцитов и ее вытеснением на периферию зон рудообразования. С ранней стадией процесса рудообразования связана Au, Ag, Pb, Sb геохимическая ассоциация, контролирующая зоны рудной минерализации. Au, As, Mo, Ba ассоциация приурочена к рудным зонам и характеризуется крупными площадными ореолами, что, очевидно, обусловлено особенностью поведения элементов в зоне гипергенеза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был выполнен комплекс работ: сравнение объекта исследования с описанными в отечественной и зарубежной литературе аналогами, обобщение полученных результатов, построение геолого-структурных и геохимических схем, разработка системы разноранговых прогнозно-поисковых критериев и факторов эпitherмального оруденения, разработка геолого-поисковой модели.

Положение в крупных региональных и локальных тектонических и вулканоплутонических структурах, геологическое строение, метасоматическая и геохимическая зональность, проявленность в геофизических полях подтверждает принадлежность рудного

поля Светлое к эпитегрмальным золото-серебряным месторождениям кислотно-сульфатного типа.

В результате проведенных исследований и обобщения геолого-геофизических данных были выявлены закономерности проявления рудных таксонов в материалах дешифрирования спектрозональных космических снимков, аэрогеофизических полях, во вторичном геохимическом поле. На основании этих закономерностей сформулированы критерии и признаки золотого эпитегрмального оруденения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Лесняк, Д. В.** Структурные, геофизические и геохимические критерии эпитегрмального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) / Д. В. Лесняк, Ю. С. Ананьев, Р. Ю. Гаврилов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2022. — Т. 333, № 8. — [С. 60-72].
2. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotkavolcanic belt, and its insights for exploration / T.Yu. Yakich, Y.S. Ananyev, A.S. Ruban, R.Y. Gavrilov, **D.V. Lesnyak**, D.V. Levochskaia, O.V. Savinova, M.A. Rudmin // Ore Geology Reviews. — 2021. — V. 136. — 104257.
3. 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 эпитегрмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 333. — № 10. — С. 17–34.
4. Левочская, Д. В. Этапы, стадии и минеральные ассоциации рудообразующего процесса эпитегрмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) / Д. В. Левочская, **Д. В. Лесняк**, Т. Ю. Якич; науч. рук. А. К. Мазуров // 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. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов ; гл. ред. А. С. Боев ; под ред. Е. Ю. Пасечник. — 2022. — Т. 1. — [С. 88-89].
5. Левочская, Д. В. Особенности химизма блеклых руд участка Эми Светлинского эпитегрмального рудного поля (Хабаровский край) / Д. В. Левочская, **Д. В. Лесняк**, Т. Ю. Якич; науч. рук. А. К. Мазуров // 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. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов ; гл. ред. Н. В. Гусева ; под ред. Е. Ю. Пасечник. — 2021. — Т. 1. — [С. 66-68].
6. Левочская, Д. В. Теллуридная минерализация эпитегрмального золоторудного поля Светлое (Хабаровский край) / Д. В. Левочская, **Д. В. Лесняк**, Т. Ю. Якич; науч. рук. А. К. Мазуров // 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. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов ; гл. ред. Н. В. Гусева ; под ред. Е. Ю. Пасечник. — 2021. — Т. 1. — [С. 98-100].
7. **Лесняк, Д. В.** Геохимические критерии и признаки эпитегрмального золотого оруденения кислотно-сульфатного типа Среднеульинского рудного района на основе площадных геохимических исследований / Д. В. Лесняк, Д. В. Левочская, Р. Ю. Гаврилов; науч. рук. А. К. Мазуров // 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. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов ; гл. ред. Н. В. Гусева ; под ред. Е. Ю. Пасечник. — 2021. — Т. 1. — [С. 101-102].

8. **Лесняк, Д. В.** Структурные критерии и признаки эпitherмального золотого оруденения кислотно-сульфатного типа Среднеульинского рудного района на основе данных дистанционного зондирования / Д. В. Лесняк, Д. В. Левочская, Ю. С. Ананьев; науч. рук. А. К. Мазуров // 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. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов ; гл. ред. Н. В. Гусева ; под ред. Е. Ю. Пасечник. — 2021. — Т. 1. — [С. 100-101].