

УДК 553.411.071:550.4

СТРУКТУРНЫЕ, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ЭПИТЕРМАЛЬНОГО КИСЛОТНО-СУЛЬФАТНОГО ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РУДНОГО ПОЛЯ СВЕТЛОЕ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

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

Ананьев Юрий Сергеевич¹,
AnanyevYS@tpu.ru

Гаврилов Роман Юрьевич¹,
GavrilovRY@tpu.ru

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

² Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК»,
Россия, 680000, Хабаровск, ул. Муравьева-Амурского, 18.

Актуальность. Слабая изученность и экономическая привлекательность формируют актуальность проблемы прогнозирования и поисков эпитермальных кислотно-сульфатных золото-серебряных месторождений в пределах вулканогенных поясов Российской Федерации.

Основная цель исследования заключалась в разработке критериев прогноза и поисков эпитермального кислотно-сульфатного золотого оруденения в пределах Ульинского прогиба Охотско-Чукотского вулканического пояса.

Методы: дешифрирование космоматериалов ASTER, Landsat ETM+, Sentinel и цифровой модели рельефа по данным Shuttle radar topographic mission, интерпретация аэрогеофизических данных магнитометрической и гаммаспектроскопической съемок с построением структурно-геологических схем; моделирование геохимических полей с применением методов многомерной статистики по литохимическим данным, включая ранговую корреляцию, факторный и кластерный анализ.

В результате проведенного исследования получены следующие основные выводы. Рудное поле Светлое обладает типичными для эпитермальных месторождений кислотно-сульфатного золотого оруденения характеристиками: расположено в вулканическом поясе, приурочено к вулканическим аппаратам центральной типа, контролируемыми разрывными нарушениями; золотое оруденение сопровождается рудоносными метасоматитами – вторичными кварцитами зонального строения. Характеристики структурного контроля и метасоматической зональности определяются при дешифрировании и интерпретации данных дистанционных съемок, аэромагниторазведки и гаммаспектрометрии. Распределение химических элементов во вторичном поле рассеяния позволило установить концентрически-зональную структуру, характерную для гидротермальных месторождений золота, с пространственно-временной сменой геохимических ассоциаций от центральной зоны рудообразования к периферии на локальном уровне генерализации: Au, Mo→Au, Ag, Pb→K, Na, Al→V, Zr, (Co, Ni, Cr, Mn, P). В пределах минерализованных зон устанавливается следующая последовательность формирования геохимических ассоциаций (от центральной части к периферии): Au-Ag→Ag, Pb, Sb→As, Mo, Ba→Co, Cr, Mn, V, Zr, P.

Ключевые слова:

Золото рудное, эпитермальные месторождения, кислотно-сульфатные, поисковые признаки и критерии, дистанционные методы, аэрогеофизика, литохимическая зональность.

Введение

Эпитермальные Au-Ag месторождения формируются в близповерхностных условиях на глубинах, как правило, до 1 км в гидротермальных системах. Особенности изученных эпитермальных месторождений благородных металлов и современное понимание процессов их формирования, основанные на интерпретациях геохимических характеристик, геологических и структурных факторов и др., позволяют концептуально типизировать обстановки образования, выделяя кислотно-сульфатные (высоко-сульфатные, high-sulfidation (HS), acid-sulfate), субнейтральные (intermediate sulfidation, subneutral) и восстановительные щелочные (низко-сульфатные, адулярового типа, low-sulfidation, adularia type) [1–9].

Большая часть открытых эпитермальных месторождений, равно как и большинство геотермальных

систем, относится к восстановительно-щелочному или низко-сульфатному типу и, как следствие, эти системы являются относительно хорошо изученными. И наоборот, менее изучены системы кислотно-сульфатного или высоко-сульфатного типа в виду их менее частой проявленности.

На территории России месторождения кислотно-сульфатного типа единичны. Это месторождения Малейвойам-Ветроваямской группы [10] и Озерновского рудного поля [11] на Камчатке и рудного поля Светлое в пределах Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) в Хабаровском крае [12]. Известнейшими зарубежными примерами высоко-сульфатных месторождений являются Саммитвилль (США), Нансацу (Япония), Эль-Индио (Чили), Пуэбло-Вьехо (Доминиканская Республика), Родалькиларе (Испания), Кочбулак (Узбекистан), Лепанто (Филиппины).

Одной из отличительных особенностей месторождений кислотно-сульфатного типа является наличие переотложенного, свободного [13, 14] и легкоизвлекаемого золота в относительно хорошо проницаемых породах, что позволяет экономически эффективно использовать технологию кучного выщелачивания в условиях труднодоступных территорий. Возможность реализации технологии кучного выщелачивания в условиях низких температур Крайнего севера успешно подтверждена на месторождении Светлое (Хабаровский край, компания Полиметалл).

Слабая изученность, подчеркнутая редким нахождением на территории России, в совокупности с экономической привлекательностью технологии разработки и переработки определяет актуальность проблемы прогнозирования и поисков золоторудных месторождений кислотно-сульфатного типа.

Краткий геологический очерк рудного поля Светлое

Рудное поле Светлое размещено в юго-западной части позднемиоценовой Секчинской вулканотектонической депрессии Ульяновского прогиба западного сектора ОЧВП. Строение Ульяновского прогиба и его составляющих осложнено широко проявленной разрывной тектоникой. Юго-восточную границу Секчинской депрессии контролирует региональный, продольный по отношению к ОЧВП, Дюльбакинский разлом, проходящий через рудное поле Светлое. Разнонаправленные разломы среднего и низкого порядков ограничивают и осложняют кольцевые вулканоструктуры, к которым тяготеют субвулканические и интрузивные тела, а также поля вторичных кварцитов и аргиллизитов. Образование элементов Ульяновского прогиба было связано с многостадийным оседанием игнибрито-лавовых полей над периферическими магматическими очагами [12, 13, 15, 16].

Рудное поле Светлое расположено в узле сопряжения Дюльбакинского и Онёмнинского разломов северо-восточного и северо-западного простирания соответственно (рис. 1). В месте сочленения этих разломов проявлены выходы штоков гранит-порфиров, поля метасоматитов и радиально-концентрические разломы, определяющие положение палеовулканических построек и их элементов.

Стратиграфия представлена меловыми вулканитами амкинской, хетанинской, уракской свит и слабо распространёнными рыхлыми четвертичными аллювиальными отложениями. Амкинская свита (K_{1am}) картируется локально в юго-восточной части поля в эрозионном окне и сложена лавами, туфами и туффитами риолитов. Хетанинская свита (K_{2ht}) слагает нижние части склонов лавами андезитов и андезибазальтов с редкими прослоями туфов. Уракская свита (K_{2ur}) субгоризонтально и слабонаклонно залегает на вулканитах хетанинской свиты и представлена лавами, туфами и игнибритами дацитов.

Субвулканические тела образованы штоками и дайками гранодиорит-порфиров, дацитов, риолитов уракского и андезибазальтов хакаринского комплексов и распространены в полосе влияния Онёмненско-

го и Алалиндейского разломов, и совпадают с полями распространения метасоматитов.

Гидротермально-метасоматические образования развиваются по вулканогенным породам преимущественно кислого и, реже, средне-основного состава. В метасоматических образованиях поля выделяются: вторичные кварциты (моно-, алунитовые, диккитовые, алунит-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 слагают разобщенные в плане многослойные залежи неправильной вытянутой формы, имеющие наклонное залегание [12, 17]. Метасоматическая зональность золоторудного поля Светлое имеет достаточно универсальную схему, наблюдаемую во многих известных эпitherмальных месторождениях: монокварциты, представленные тремя структурно-текстурными типами (массивные, пористые, брекчированные), обрамляются алунитовыми 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, Эми. 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 [18], Кимсакоча в Эквадоре [19], Лепанто на Филиппинах [20] 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 Эми 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 также частично переотложилась в гипергенной стадии [13].

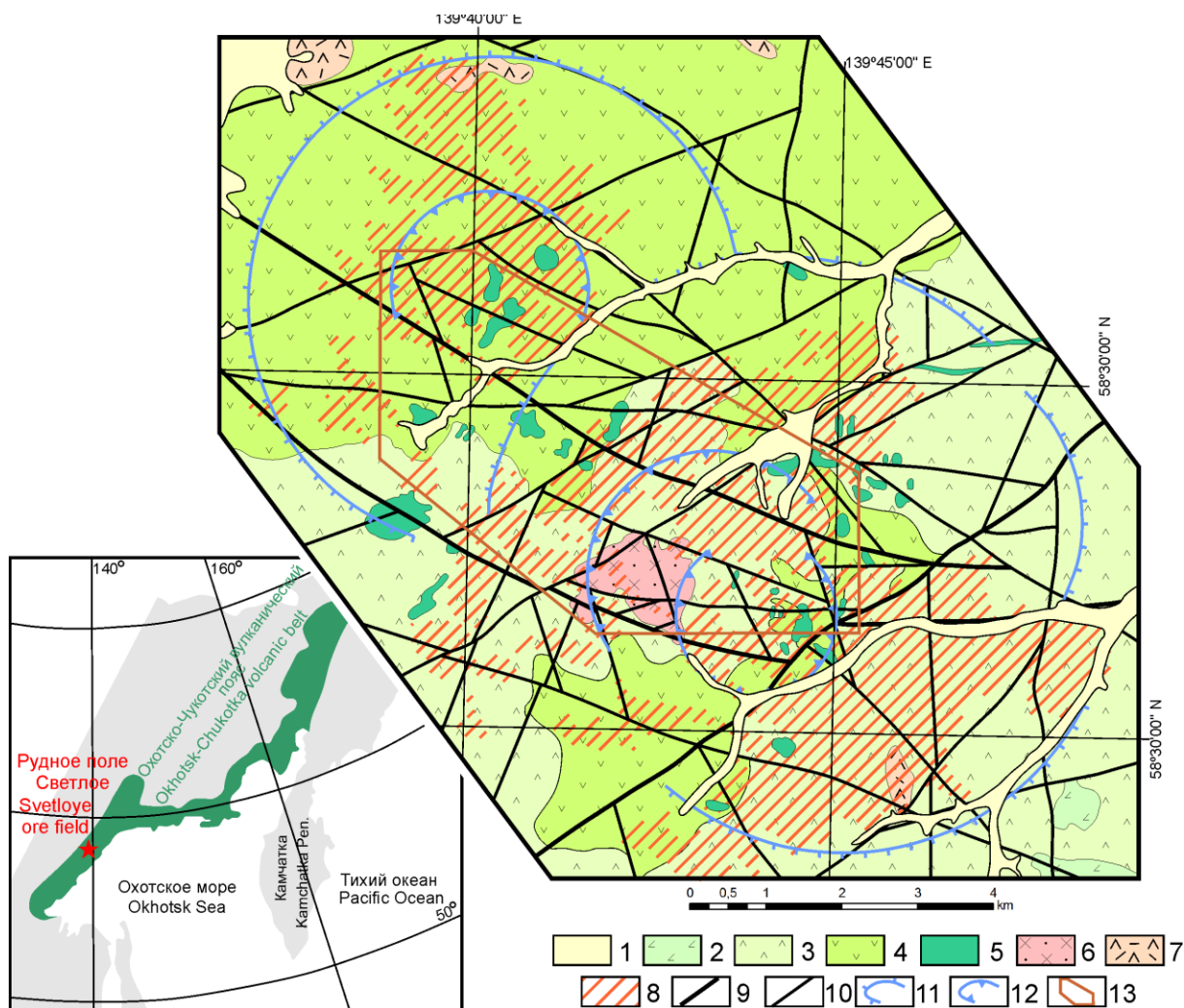


Рис. 1. Положение и схематическая геологическая карта рудного поля Светлое: 1 – аллювиальные отложения (Q_{IV}); 2 – андезибазальты хакаринской свиты (K_2); 3 – лавы, туфы, игнимбриты дацитов уракской свиты (K_2); 4 – лавы андезитов андезибазальтов, туфы андезитов хетанинской свиты (K_2); 5 – штоки и дайки андезибазальтов хакаринского базальтоидного комплекса (K_2); 6, 7 – уракский дацит-риодитовый комплекс (K_2); 6 – гранодиорит-порфиры, 7 – риодациты и дациты; 8 – площади развития вторичных кварцитов и аргиллизитов; 9, 10 – разломы: 9 – региональные, 10 – прочие; 11 – стратовулканы центрального типа; 12 – кальдеры проседания; 13 – контур рудного поля Светлое

Fig. 1. Location and schematic geological map of the Svetloye ore field: 1 – alluvial sediments (Q_{IV}); 2 – basaltic andesite (Khakar suite (K_2)); 3 – lavas, tuffs, ignimbrites dacites (Urak suite (K_2)); 4 – lavas of andesites, basaltic andesites, andesites tuffs (Khetanian suite (K_2)); 5 – stocks and dikes of basaltic andesites (Khakarinsk basalt complex (K_2)); 6, 7 – Urak dacite-rhyolite complex (K_2); 6 – granodioritic porphyry, 7 – rhyodacite and dacite; 8 – areas of residual quartz and clay alteration; 9, 10 – faults: 9 – regional, 10 – others; 11 – volcanic centers; 12 – subsidence zones; 13 – Svetloye ore field location

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

Методика исследования

Представленные выше закономерности геологического строения и пространственного положения оруденения могут быть выявлены дистанционными,

аэрогеофизическими методами и дополнены наземными разномасштабными геохимическими данными. Применение этого комплекса анализа геологической информации позволяет разработать разномасштабные критерии прогнозирования и поиска месторождений кислотно-сульфатного типа как в пределах Ульинского прогиба ОЧВП, так и в подобных вулканогенных поясах. В основу проведенного исследования были положены материалы дистанционных, аэрогеофизических и литохимических (по вторичным ореолам рассеяния) съемок.

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. Общая методика дистанционных работ [21] включала в себя:

- подбор исходных космических данных ASTER, Landsat ETM+ и SRTM;
- улучшение, классификацию растровых изображений и их дешифрирование;
- создание спектрзональных изображений из мноканальных растров и их обработку;
- дешифрирование всего комплекса синтезированных изображений с выделением линейных и кольцевых (дуговых) структур и других особенностей геологического строения;
- расчет спектральных индексов по материалам ASTER: каолиновый индекс $KL I = (\text{band}4/\text{band}5) \times (\text{band}8/\text{band}6)$, который указывает на участки развития глинистых минералов [22], и мафический индекс $MI^3 = (\text{band}12 \times \text{band}14 \times \text{band}14 \times \text{band}14) / (\text{band}13 \times \text{band}13 \times \text{band}13 \times \text{band}13)$, значение которого менее 0,87 указывает на возможное наличие вторичных кварцитов [23];
- корреляционный анализ SWIR диапазона ASTER методом главных компонент;
- спектральный анализ SWIR диапазона материалов ASTER;
- интерпретацию полученных материалов с привлечением геологической, геофизической и геохимической информации и составление геолого-структурных схем. Определение уровней заложения разрывных нарушений проведено с учетом данных [24, 25].

Для построения структурно-геологической схемы Среднеульинского рудного района масштаба 1:500000 использованы космические снимки Landsat и цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM.

Для построения структурно-тектонической схемы Уенминского рудного узла и рудного поля Светлое масштабов 1:100000 и 1:25000 использованы космические снимки ASTER и Sentinel, а также ЦМР ASTERGDDEM.

Кроме перечисленных космоматериалов, для построения структурно-геологических схем использованы результаты геолого-съёмочных работ масштаба 1:200000 по листам О-54-VIII, О-54-IX, О-54-XIV, О-54-XV, О-54-XVI, О-54-XXI, результаты обработки аэрогеофизических данных по площади исследований, результаты переинтерпретации аэрогеофизических данных и результаты обработки литогеохимических съёмок по вторичным ореолам рассеяния.

Интерпретация геофизических полей и их трансформант проводилась с целью выявления глубинных неоднородностей, установления и подтверждения положения разрывных нарушений, элементов разномасштабных вулканоструктур, секущих интрузивных и субвулканических образований и тел метасоматически измененных пород. В исследованиях использованы результаты аэрогеофизических работ разных лет съёмки (1978–1985 гг.).

Общая методика работы с геофизическими данными заключалась в следующем:

- оценка качества имеющегося материала;
- расчет статистических, дифференциальных, корреляционных и градиентных характеристик по каждому наблюдаемому геофизическому параметру;
- интерпретация наблюдаемых полей и их трансформант с выделением элементов геологического строения, потенциально рудоконтролирующих структур различных порядков;
- сопоставление структурных схем с физическими полями и их трансформантами для обоснования корректности выделения отдельных элементов по геофизическим данным;
- составление геофизической модели масштабов рудного района и рудного узла.

Подтверждение протекания рудных процессов обеспечивается выявлением в геохимическом поле ассоциации элементов, связанных 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. В основу работы легли аналитические данные, полученные по результатам литогеохимических работ по вторичным ореолам рассеяния в масштабе 1:50000 (сеть 500×100 м) и 1:10000 (сеть 100×40 м), проведенных в разные годы на площади золоторудного поля Светлое. Площадь работ составила 67 и 16,1 км² соответственно.

При обработке данных использованы методы многомерной статистики: ранговая корреляция, факторный и кластерный анализы.

Полученные результаты

Дешифрирование спектрзональных снимков Landsat ETM+ и ASTER позволило построить геолого-структурные схемы различных масштабных уровней – рудного района, рудного узла и рудного поля.

Основными элементами структурно-геологических схем являются:

- вулcano-тектонические депрессии как структуры I порядка (проявляются в материалах дистанционных съёмок как кольцевые структуры диаметрами 45...60 км), вулcano-тектонические структуры оседания – структуры II порядка (в материалах дешифрирования космических съёмок ограничиваются совокупностью дуговых и линейных структур и подчеркнуты характерными для кислых вулканических спектральными характеристиками), остатки палеовулканических построек центрального типа (отражаются в материалах космических съёмок как системы телескопированных кольцевых структур диаметрами от 1 до 14 км), тела секущих изверженных горных пород (проявленные в виде площадных тел со специфическими яркостными характеристиками), разрывные нару-

шения (проявляются в виде линейных структур, проявленных также в аэрогеофизических материалах) – для масштаба Среднеульинского рудного района;

- 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 (выделены на основе рассчитанных спек-

тральных индексов) – для масштаба Уенминского рудного узла (рис. 2);

- палеовулканические постройки с кальдерами проседания, разрывные нарушения, ореолы метасоматически измененных горных пород различного состава (по результатам спектрального анализа материалов ASTER), стратифицированные образования и секущие интрузивные и субвулканические тела – для масштаба рудного поля Светлое (рис. 3).

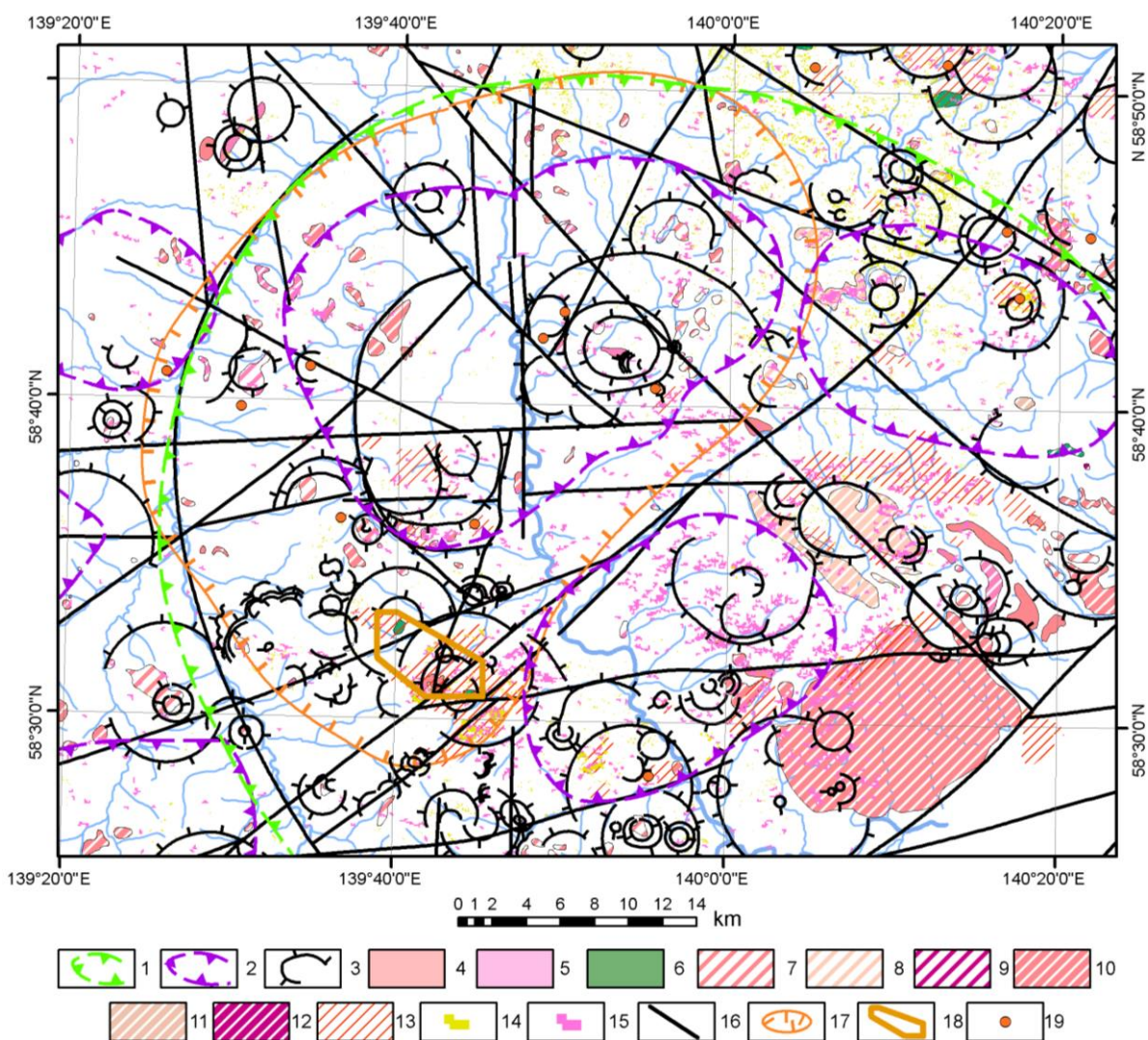


Рис. 2. Фрагмент космоструктурной схемы Уенминского рудного узла: 1 – Секчинская вулканотектоническая депрессия I порядка; 2 – вулканотектонические структуры оседания II порядка; 3 – остатки палеовулканических построек центрального типа; 4–6 – тела интрузивных горных пород различного состава: 4 – кислого, 5 – среднего, 6 – основного; 7–9 – жерловая фация изверженных пород: 7 – дациты, риолиты, 8 – трахириолиты, трахиты, 9 – андезиты, андезибазальты; 10–12 – субвулканические тела изверженных пород: 10 – дациты, риолиты, 11 – трахириолиты, трахиты, 12 – андезиты, андезибазальты; 13 – тела метасоматитов; 14 – значимые величины каолинитового индекса; 15 – значимые величины мафического индекса; 16 – главные разрывные нарушения; 17 – контур Уенминского рудного узла; 18 – контур рудного поля Светлое; 19 – рудопроявления

Fig. 2. Fragment of the cosmostructural scheme of the Uenma ore cluster: 1 – Sekchinskaya volcanotectonic depression of the first order; 2 – volcanotectonic subsidence structures of the second order; 3 – remains of paleovolcanic structures of the central type; 4–6 – bodies of intrusive rocks of various compositions: 4 – acidic, 5 – medium, 6 – basic; 7–9 – vent facies of igneous rocks: 7 – dacites, rhyolites, 8 – trachyrhyolites, trachytes, 9 – andesites, basaltic andesites; 10–12 – subvolcanic bodies of igneous rocks: 10 – dacites, rhyolites, 11 – trachyrhyolites, trachytes, 12 – andesites, basaltic andesites; 13 – bodies of metasomatites; 14 – significant values of the kaolinite index; 15 – significant values of the mafic index; 16 – main faults; 17 – contour of the Uenma ore cluster; 18 – outline of the Svetloe ore field; 19 – ore occurrences

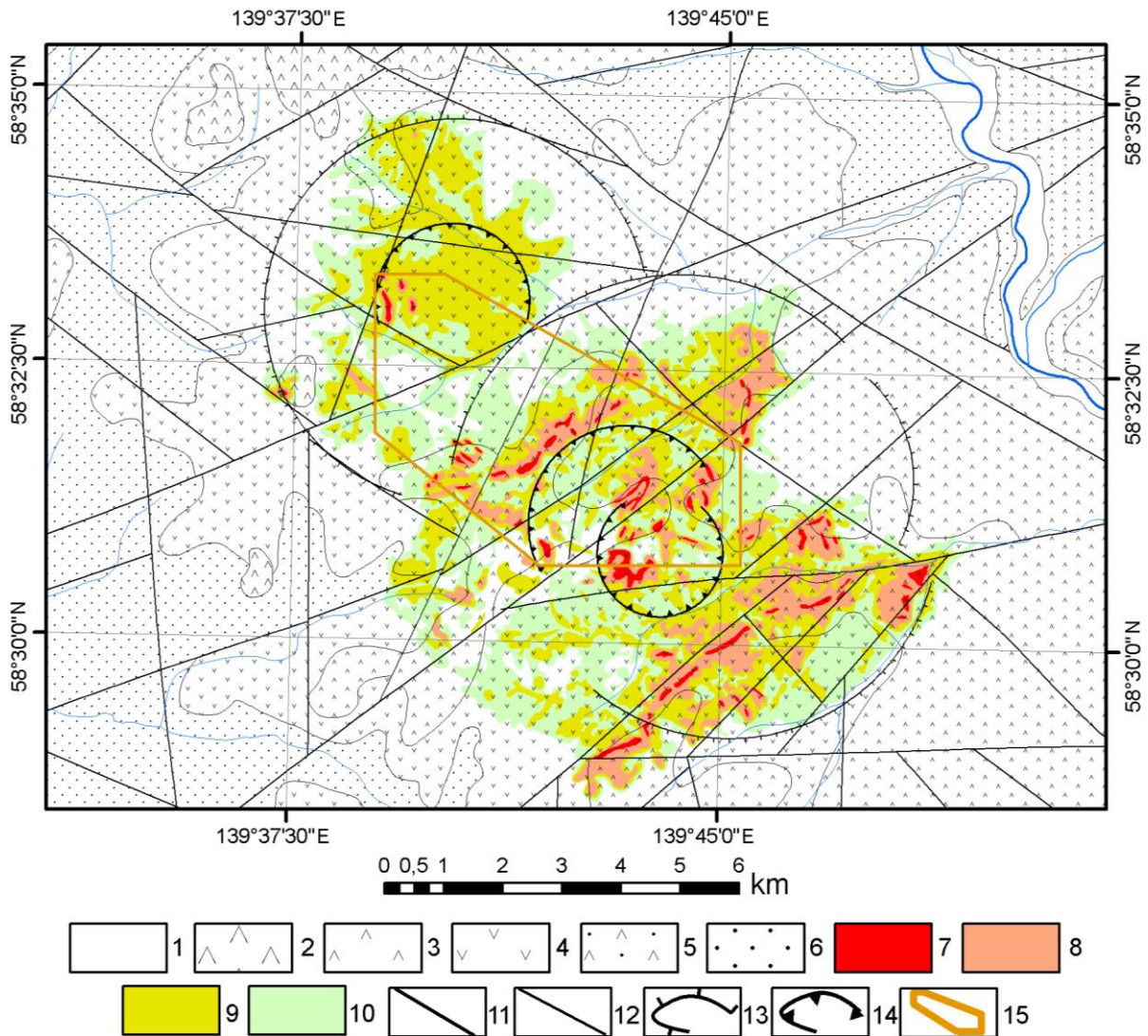


Рис. 3. Космоструктурная схема рудного поля Светлое: 1 – современные аллювиальные отложения; 2 – штоки и дайки уракского дацит-риолитового комплекса; 3 – лавы, туфы, игнимбриты дацитов уракской свиты; 4 – лавы андезитов и андезибазальтов, туфы андезитов хетанинской свиты; 5 – туфопесчаники, туфоалевролиты, 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

Fig. 3. Cosmostructural scheme of the Svetloe ore field: 1 – modern alluvial deposits; 2 – stocks and dikes of the Urak dacite-rhyolite complex; 3 – lavas, tuffs, ignimbrites of dacites of the Urak Formation; 4 – andesite and basaltic andesite lavas, andesite tuffs of the Khetan Formation; 5 – tuff sandstones, tuff siltstones, dacite tuffs of the Amka Formation; 6 – dacites and their tuffs, ignimbrites, andesites and their tuffs of the Magey Formation; 7–9 – secondary quartzites: 7 – monoquartz, 8 – quartz-alunite, 9 – quartz-hydromicaceous; 10 – chlorite propylites; 11, 12 – discontinuous violations: 11 – main, 12 – other; 13, 14 – paleovolcanic apparatuses of the central type: 13 – cone, 14 – subsidence calderas; 15 – contour of the ore field Svetloe

Проведенные исследования по дешифрированию показывают, что известные золоторудные таксоны (рудные районы, узлы, поля) пространственно сопряжены с различными вулканотектоническими структурами:

- рудные узлы размещаются в пределах дешифрируемых систем кольцевых структур диаметром 45...60 км. Эти структуры интерпретируются как вулканотектонические депрессии, развитые над внутрикоровыми магматическими камерами, вул-

кано-плутоническими комплексами и ареалами их влияния;

- рудные поля тяготеют к краевым частям вулканотектонических 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 экранящего слоя менее проницаемых вулканических пород [17, 18]). Другими признаками потенциальной рудоносности частных вулканических построек могут служить особенности проявления значимых величин каолинового (KLI) и мафического (M³) спектральных индексов. На рудоносных площадях каолиновый 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 (рис. 3).

В основу исследований и интерпретации аэрогеофизических данных легла модель геологического строения, описанная выше. Кроме того, были использованы результаты исследования ФГУП «Дальгеофизика» [26]. Имеющиеся данные определяют, что типоморфными признаками выделения рудных полей в физических полях является сопряжение в пространстве областей пониженного магнитного поля и повышенных значений Th/K отношения.

Результаты интерпретации геофизических исследований подтверждаются результатами дешифрирования космоснимков. Также выделяются кольцевые структуры, эпицентры которых контролируются разнонаправленными тектоническими нарушениями. Эти структуры и разрывные нарушения отражаются в магнитном поле, кроме нарушений северо-восточного простирания, которые, по-видимому, являются наиболее древними и в значительной мере заретушированы наложенными процессами (рис. 4).

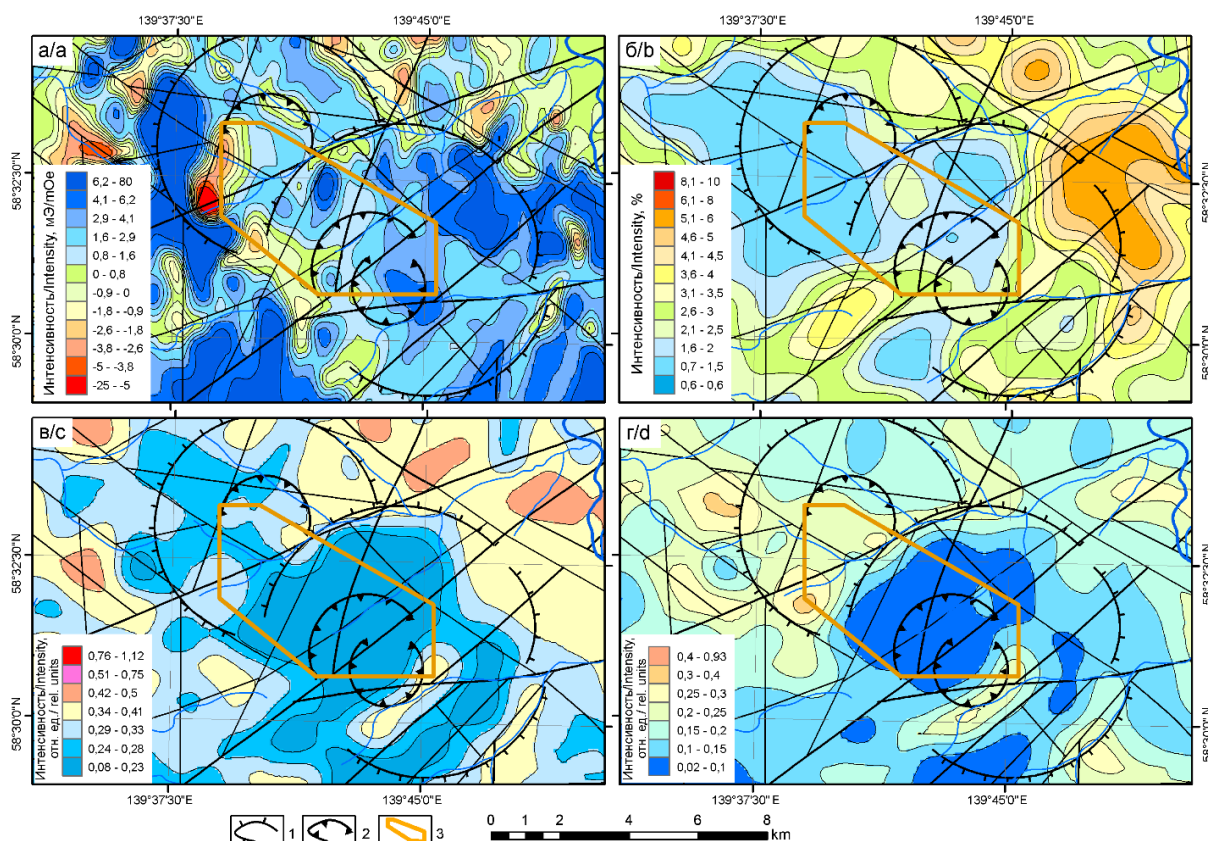


Рис. 4. Положение рудного поля Светлое в физических полях: а) магнитное поле; б) поле K; в) Th/K отношение; г) KU/ThTh отношение; 1, 2 – палеовулканические аппараты центрального типа: 1 – конус, 2 – кальдеры проседания; 3 – контур рудного поля Светлое

Fig. 4. Position of the Svetloe ore field in physical fields: а) magnetic field; б) field K; в) Th/K ratio; д) KU/ThTh ratio; 1, 2 – paleovolcanic apparatuses of the central type: 1 – cone, 2 – calderas subsidence; 3 – contour of the Svetloe ore field

Потенциально рудоносные кольцевые структуры должны быть приурочены к кольцевой структуре среднего порядка, расположенной на периферии более крупной кольцевой структуры. Кольцевые структуры характеризуются однородным 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 К/Th отношения. Если субстрат имел преимущественно натровый состав, то отношение будет смещаться в сторону тория (непосредственно тип Светлого), в противном случае – в сторону калия [26]. Кроме этого, предлагается использовать отношение KU/ThTh. На наш взгляд, этот показатель еще лучше фиксирует площади развития вторичных кварцитов. К и U в суперкислых гидротермальных растворах весьма подвижны, тогда как Th относительно устойчив (рис. 4).

Проведенные исследования по интерпретации аэрогеофизических материалов показывают, что рудные поля вполне закономерно размещаются в магнитном поле и полях распределения естественных радиоактивных элементов. Они приурочены к кольцевым структурам среднего порядка, находящимся на периферии крупных кольцевых структур первого порядка, которые отчетливо проявлены в аэромагнитном поле. Для потенциально рудоносных кольцевых структур характерно спокойное выположенное аэромагнитное поле с невысокой дисперсией. В полях распределения естественных радиоактивных элементов потенциально рудоносные структуры выделяются аномальным поведением К/Th и KU/ThTh отношений.

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) (рис. 5) и детальной (1:10000) (рис. 6) литогеохимических съемок обоснованы следующие локальные и детальные геохимические критерии и признаки.

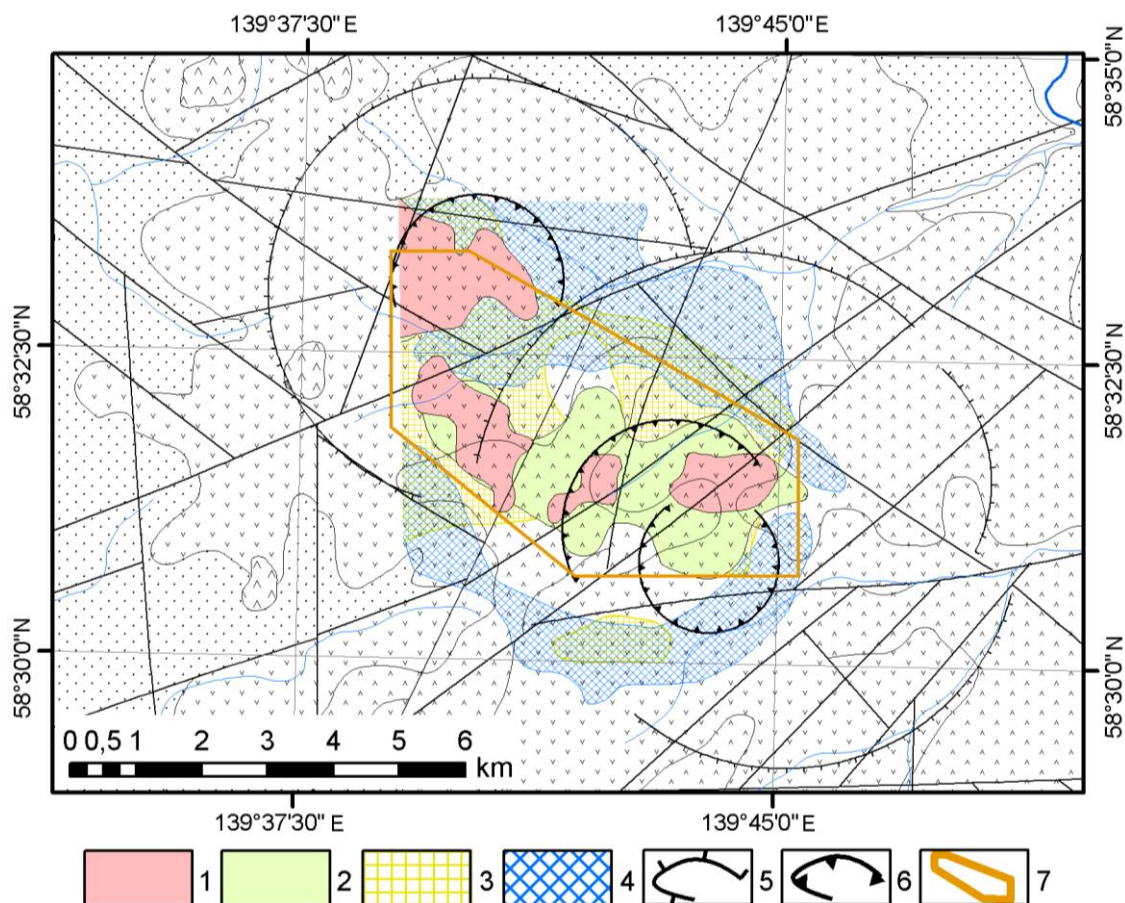


Рис. 5. Структура вторичного аномального геохимического поля рудного поля Светлое: 1–4 – ассоциации химических элементов: 1 – Au+Ag+Pb; 2 – Au+Mo; 3 – K+Al+Na; 4 – Co+Cr+Mn+V+Zn+P; 5, 6 – палеовулканические аппараты центрального типа: 5 – конус, 6 – кальдеры проседания; 7 – контур рудного поля Светлое. Остальные условные обозначения – на рис. 2

Fig. 5. Structure of the secondary anomalous geochemical field of the Svetloe ore field. 1–4 – associations of chemical elements: 1 – Au+Ag+Pb; 2 – Au+Mo; 3 – K+Al+Na; 4 – Co+Cr+Mn+V+Zn+P; 5, 6 – paleovolcanic apparatuses of the central type: 5 – cone, 6 – subsidence calderas; 7 – outline of the Svetloe ore field. Other symbols are in Fig. 2

А) Локальные

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, As, Cu, Pb, Mo.
3. Аномально низкие концентрации K, Al, Na характеризуют зону выноса макроэлементов. В их пределах могут отлагаться рудные минеральные ассоциации.
4. В масштабе рудного поля V, Zn и, вероятно, ряд других (siderофильных) 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 про-

странство, а также выделение областей с «породной» составляющей.

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).

Б) Детальные

1. Прямым признаком золотого оруденения на стадии детальных работ являются аномальные концентрации Au и Ag во вторичных ореолах рассеяния.
2. Элементами-спутниками эпitherмального золотого оруденения, являются: Sb, Bi, Te, Se, As, Mo, Cu.
3. Геохимическая ассоциация V, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, P фиксируется во фронтальной зоне концентрирования. При этом она более отчетливо проявлена в метасоматитах, развитых по породам хетанинской свиты.
4. С использованием кластер-анализа (метод К-средних) может быть проведено разделение проб на «породные» и «рудные», а также установление геохимических специализаций выделенных участков с возможностью прогнозирования уровня эрозионного среза оруденения.

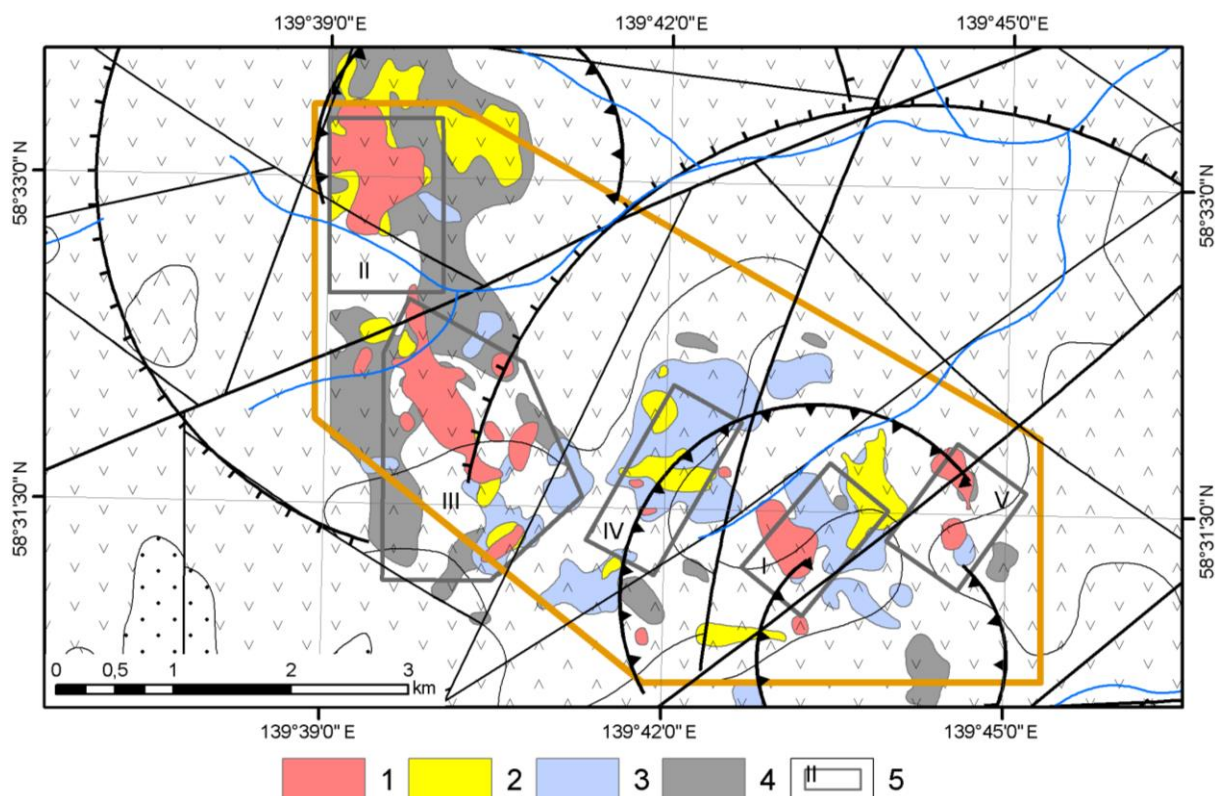


Рис. 6. Структура вторичного аномального геохимического поля месторождений рудного поля Светлое: 1–4 – ассоциации химических элементов: 1 – Au+Ag; 2 – Ag+Pb+Sb; 3 – As+Ba+Mo; 4 – Co+Cr+Mn+V+Zn+P; 5 – рудные участки (месторождения): I – Елена, II – Эми, III – Людмила, IV – Тамара, V – Лариса. Остальные условные обозначения – на рис. 2

Fig. 6. Structure of the secondary anomalous geochemical field of deposits in the Svetloe ore field. 1–4 – associations of chemical elements: 1 – Au+Ag; 2 – Ag+Pb+Sb; 3 – As+Ba+Mo; 4 – Co+Cr+Mn+V+Zn+P; 5 – ore areas (deposits): I – Elena, II – Emi, III – Lyudmila, IV – Tamara, V – Larisa. Other symbols are in Fig. 2

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 выражена следующими особенностями. 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.

Выводы

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 эпитермальным 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 эпитермального оруденения:

Региональные

Структурные

(по результатам дешифрирования космических снимков)

Рудные узлы размещаются в пределах дешифрируемых систем кольцевых структур диаметром 45...60 км. Эти структуры интерпретируются нами как вулканотектонические депрессии, развитые над внутрикоровыми магматическими камерами, вулканоплутоническими комплексами и ареалами их влияния. Положение самих вулканотектонических депрессий контролируется участками сопряжения продольных и поперечных разрывных нарушений мантийного уровня заложения.

Локальные

Структурно-вещественные

(по результатам дешифрирования космических снимков)

Рудные поля тяготеют к краевым частям вулканотектонических депрессий. Структурными критериями

для выделения потенциальных рудных полей являются системы кольцевых структур диаметром от 1 до 14 км, интерпретируемые как частные вулканические постройки. Положение таких построек контролируется узлами сопряжения продольных северо-восточных (мантийного заложения) и поперечных северо-западных (коровых) разрывных нарушений. В потенциально рудоносных с кислотно-сульфатным типом оруденения вулканических постройках должна быть проявлена кальдера проседания и метасоматический ореол значительной площади. На рудоносных площадях должны присутствовать локальные площадные аномалии каолинитового, мафического (значения менее 0,87) спектральных индексов и резко градиентные значения показателя оксидов железа.

Геофизические

Рудные поля приурочены к кольцевым структурам среднего порядка, находящимся на периферии крупных кольцевых структур первого порядка, которые отчетливо проявлены в аэромагнитном поле.

Для потенциально рудоносных кольцевых структур характерно спокойное выположенное или слабо дифференцированное аэромагнитное поле с невысокой дисперсией. 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 K/Th отношения. Если вмещающий субстрат имел преимущественно натровый состав, то отношение будет смещаться в сторону тория (непосредственно тип Светлого), в противном случае – в сторону калия.

Геохимические

Прямым признаком эпитермального кислотно-сульфатного оруденения ранга рудного поля является наличие аномальных концентраций Au и Ag во вторичных ореолах рассеяния. Также элементами-спутниками оруденения, на основании имеющейся аналитической базы, следует считать Sb, As, Bi, Cu.

Рудные поля во вторичном геохимическом поле выделяются концентрически-зональным ореолом комплекса элементов – во фронтальной зоне проявлена ассоциация V-Zn, в тыловой зоне – ассоциации Au-Ag-Pb и Au-Mo.

Детальные

Структурно-вещественные

(по результатам дешифрирования космических снимков)

Месторождения кислотно-сульфатного типа размещаются в кальдерах проседания, тяготеют к узлам сопряжения коровых разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простирания, в участках развития монокварцевых, кварц-алунитовых и кварц-гидрослюдистых метасоматитов, которые могут быть закартированы по результатам специальной обработки снимков ASTER.

Геохимические

Прямым признаком золотого оруденения ранга месторождения являются аномальные концентрации Au и Ag во вторичных ореолах рассеяния, а также их элементы-спутники Sb, Bi, Te, Se, As, Mo, Cu.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types // *Economic Geology*. – 1987. – V. 82. – № 1. – P. 1–26.
2. Stoffregen R. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado // *Economic Geology*. – 1987. – V. 82. – P. 1575–1591.
3. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features // *Mineral Deposits Division, Special Paper*. – Saint John's: Geological Association of Canada, 1993. – P. 403–417.
4. Hedenquist J.W., Arribas A.R. Exploration for epithermal gold deposits // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 245–277.
5. Sillitoe R., Hedenquist J. linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // *Society of Economic Geologists Special Publication*. – 2003. – V. 10. – P. 315–343.
6. The Poopó polymetallic epithermal deposit, Bolivia: mineralogy, genetic constraints, and distribution of critical elements / B. Torres, J.-C. Melgarejo, L. Torro, A. Camprubi, M. Castillo-Oliver, D. Artiaga, M. Campeny, E. Tauler, A. Jiménez-Franco, P. Alfonso, O.R. Arce-Burgoa // *Minerals*. – 2019. – V. 9 (8). – P. 1–18.
7. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification / L. Wang, K.Z. Qin, G.X. Song, G.M. Li // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 107. – P. 434–456.
8. Кигаи И.Н. Условия формирования метасоматитов и оруденение эпitherмальных золото-серебряных месторождений // *Геология рудных месторождений*. – 2020. – Т. 62. – № 5. – С. 475–480.
9. Hedenquist J.W., Arribas A.R. Exploration implications of multiple formation environments of advanced argillic minerals // *Economic Geology*. – 2022. – V. 117. – № 3. – P. 609–643.
10. Mustard gold of the gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia) / N.D. Tolstykh, G.A. Palyanova, O.V. Bobrova, E.G. Sidorov // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – P. 1–18.
11. Наумова О.А., Альшева Э.И. Гидротермально измененные породы Озерновского золото-серебряного месторождения Камчатки // *Отечественная геология*. – 1995. – № 1. – С. 35–43.
12. Мишин Л.Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Россия) (Ульинский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // *Тихоокеанская геология*. – 2011. – Т. 30. – № 4. – С. 32–48.
13. 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. Levochkaia, O.V. Savinova, M.A. Rudmin // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 136. – 104257.
14. Taylor B.E. Epithermal gold deposits // *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods* / Ed. by W.D. Goodfellow. Mineral Deposits Division, Special Publication. – Saint John's, NL, Canada: Geological Association of Canada, 2007. – V. 5. – P. 113–139.
15. К условиям формирования редкометалльного рудопроявления Эмми (Ульинская структурно-металлогеническая зона) / А.Г. Колесников, И.А. Брызгалов, Т.Л. Рассказова, Н.Е. Савва //

Информация об авторах

Лесняк Д.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; директор дирекции геологоразведочных проектов Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК».

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

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

Месторождения во вторичном геохимическом поле, на основании имеющейся аналитической информации, выделяются концентрически-зональным ореолом комплекса элементов – во фронтальной зоне проявлена ассоциация Co-Cr-Mn-V-Zn-P; в тыловой зоне – ассоциации Au-Ag, Ag-Pb-Sb, As-Mo-Ba.

- Чтения памяти К.В. Симакова: Всероссийская научная конференция. Сборник материалов. – Магадан: СВКНИИ, 2007. – С. 90–91.
16. Порфириное золото-теллуридное оруденение high-sulfidation типа Северного Приохотья: минералогия, магматизм и геодинамика / В.В. Иванов, В.Ф. Полин, И.С. Неменман, В.В. Кононов, Л.Г. Колесова, А.А. Лотина // *Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Всероссийской конференции с международным участием*. – Владивосток, ДГИ ДВО РАН, 2011. – С. 356–359.
 17. Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпitherмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) / Д.В. Левочская, Т.Ю. Якич, Д.В. Лесняк, Ю.С. Ананьев. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 333. – № 10. – С. 17–34.
 18. Gray J.E., Coolbaugh M.F. Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // *Economic Geology*. – 1994. – V. 89. – P. 1906–1923.
 19. Sillitoe R.H. Epithermal paleosurfaces – Mineralium Deposita // *International Journal for Geology, Mineralogy and Geochemistry of Mineral Deposits*. – 2015 – V. 50. – P. 767–793.
 20. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines / Zh. Chang, J.W. Hedenquist et al. // *Economic Geology*. – 2011. – V. 106. – P. 1365–1398.
 21. Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А. Дистанционная прогнозно-поисковая модель эпitherмальных Au-Ag месторождений (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 84–92.
 22. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill–Curnamona province of Australia / R.D. Hewson, T.J. Cudahy, S. Mizuhiko, K. Ueda, A.J. Mauger // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – V. 99 (1–2). – P. 159–172.
 23. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radiance-at-sensor» data // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – V. 99. – P. 127–139.
 24. Петрофизические особенности тектонических структур Охотоморской зоны перехода континент-океан / Е.Г. Иволга, В.Г. Гурович, Н.П. Романовский, Ю.Ф. Манилов // *Тихоокеанская геология*. – 2016. – Т. 35. – № 5. – С. 39–53.
 25. Глубинные особенности размещения золоторудной минерализации Ульинской впадины / Е.Г. Иволга, Ю.Ф. Манилов, Н.П. Романовский, В.Г. Гурович // *Тихоокеанская геология*. – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 120–136.
 26. Копылов М.И., Пустовойтова И.В., Скрыбин И.Н. Перспективы выявления золоторудных месторождений в алунитах на юге Дальневосточного региона // *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. – 2011. – № 2. – С. 84–98.

Поступила 04.06.2022 г.

UDC 553.411.071:550.4

STRUCTURAL, GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL CRITERIA FOR EPITHERMAL HIGH-SULFIDATION GOLD MINERALIZATION ON THE EXAMPLE OF SVETLOE ORE FIELD (KHABAROVSKIY KRAY)

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

Yury S. Ananyev¹,
AnanyevYS@tpu.ru

Roman Yu. Gavrilov¹,
GavrilovRY@tpu.ru

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

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

The relevance of the research. Poor knowledge and economic attractiveness make the problem of forecasting and prospecting for epithermal high-sulfidation gold-silver deposits within the volcanogenic belts of the Russian Federation topical.

The main goal of the work was to develop criteria for forecasting and prospecting for epithermal acid-sulfate gold mineralization within the Ulinsky trough of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

Methods: interpretation of space materials ASTER, Landsat ETM+, Sentinel and digital elevation model according to Shuttle radar topographic mission data, interpretation of airborne geophysical data of magnetometric and gamma-ray spectroscopic surveys with the construction of structural geological schemes; modeling of geochemical fields using multivariate statistical methods based on lithochemical data, including rank correlation, factorial and cluster analysis.

The following main conclusions: the Svetloe ore field has characteristics typical of epithermal deposits of acid-sulfate gold mineralization: it is located in a volcanic belt, confined to central-type volcanic apparatuses controlled by faults; gold mineralization is accompanied by advanced argillic and quartz altered rocks: secondary quartzites of zonal structure, were drawn. The characteristics of structural control and metasomatic zoning are well defined in interpretation of data from remote sensing, airborne magnetic surveys, and gamma ray spectrometry. Furthermore, the distribution of chemical elements in the secondary stray field makes it possible to establish a concentric zonal structure characteristic of hydrothermal gold deposits, with a spatiotemporal change in geochemical associations from the central zone of ore formation to the periphery at the local level of generalization: Au, Mo→Au, Ag, Pb→K, Na, Al→V, Zn, (Co, Ni, Cr, Mn, P). Moreover, within the mineralized zones, the following sequence of formation of geochemical associations is established (from the central part to the periphery): Au-Ag→Ag, Pb, Sb→As, Mo, Ba→Co, Cr, Mn, V, Zn, P.

Key words:

Ore gold, epithermal deposits, acid-sulphate, prospecting features and criteria, remote sensing methods, airborne geophysics, lithochemical zoning.

REFERENCES

1. Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericitic types. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, no. 1, pp. 1–26.
2. Stoffregen R. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 1575–1591.
3. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features. Special Paper. Saint John's, *Geological Association of Canada*, 1993, pp. 403–417.
4. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 245–277.
5. Sillitoe R., Hedenquist J. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Public*, 2003, vol. 10, pp. 315–343.
6. Torres B., Melgarejo J.-C., Torro L., Camprubí A., Castillo-Oliver M., Artiaga D., Campeny M., Tauler E., Jiménez-Franco A., Alfonso P., Arce-Burgos O.R. The Poopó polymetallic epithermal deposit, Bolivia: mineralogy, genetic constraints, and distribution of critical elements. *Minerals*, 2019, vol. 9 (8), pp. 1–18.
7. Wang L., Qin K.Z., Song G.X., Li G. M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 434–456.
8. Kigay I.N. Conditions for the formation of metasomatites and mineralization of epithermal gold-silver deposits. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 475–480. In Rus.
9. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration Implications of Multiple Formation Environments of Advanced Argillic Minerals. *Economic Geology*, 2022, vol. 117, no. 3, pp. 609–643.
10. Tolstykh N.D., Palyanova G.A., Bobrova O.V., Sidorov E.G. Mustard gold of the gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia). *Minerals*, 2019, vol. 9, pp. 1–18.
11. Naumova O.A., Alysheva E.I. Hydrothermally altered rocks of the Ozernovsky gold-silver deposit in Kamchatka. *Otechstvennaya geologiya*, 1995, no. 1, pp. 35–43. In Rus.
12. Mishin L.F. Secondary quartzites and their relation to gold ore mineralization of the Svetloye deposit (Ulya trough, Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt). *Russian journal of pacific geology*, 2011, vol. 30, pp. 32–48. In Rus.
13. Yakich T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov R.Y., Lesnyak D.V., Levochskaia D.V., Savinova O.V., Rudmin M.A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration. *Ore Geol. Rev.*, 2021, vol. 136, 104257.
14. Taylor B.E. Epithermal gold deposits. Mineral. Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Ed. by W.D. Goodfellow. *Mineral Deposits Division, Special Publica-*

- tion. Saint John, NL, Canada, Geological Association of Canada, 2007. Vol. 5, pp. 113–139.
15. Kolesnikov A.G., Bryzgalov I.A., Rasskazova T.L., Savva N.E. K usloviyam formirovaniya redkometalnogo rudoproyavleniya Emmi (Ulinskaya strukturno-metallogenicheskaya zona) [On the formation conditions of the Emmy rare-metal ore occurrence (Ulyinsk structural-metallogenetic zone)]. *Chteniya pamyati K.V. Simakova. Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya. Sbornik materialov* [Readings in memory of K.V. Simakova: All-Russian scientific conference. Collection of materials]. Magadan, SVKNII Publ., 2007. pp. 90–91.
 16. Ivanov V.V., Polin V.F., Nemenman I.S., Kononov V.V., Kolesova L.G., Lotina A.A. Porfirovoe zloto-telluridnoe orudnenie high-sulfidation tipa Severnogo Priokhotya: mineralogiya, magmatizm i geodinamika [High-sulfidation porphyritic gold-telluride mineralization of the Northern Okhotsk type: mineralogy, magmatism and geodynamics]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Geologicheskie protsessy v obstanovkakh subdukcii, kollizii i skolzheniya litosfernykh plit* [Proc. of the All-Russian Conference with international participation. Geological processes in the environment of subduction, collision and sliding of lithospheric plates]. Vladivostok, DGI FEB RAS, 2011. pp. 356–359.
 17. Levochskaya D.V., Yakich T.Yu., Lesnyak D.V., Ananyev Yu.S. Hydrothermal-metasomatic zoning, fluid regime and types of gold mineralization in the Emi and Elena areas of the Svetloe epithermal ore field (Khabarovsk Territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 333, no. 10, pp. 17–34. In Rus.
 18. Gray J.E., Coolbaugh M.F. Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome. *Economic Geology*, 1994, vol. 89, pp. 1906–1923.
 19. Silitoe R.H. Epithermal paleosurfaces – Mineralium Deposita. *International Journal for Geology, Mineralogy and Geochemistry of Mineral Deposits*, 2015, vol. 50, pp. 767–793.
 20. Chang Z., Hedenquist J.W., White N.C., Cooke D.R., Roach M., Deyell C.L., Garcia J., Jr., Gemmill J.B., McKnight S., Cuison A.L. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 1365–1398.
 21. Ananyev Yu.S., Zhitkov V.G., Potseluev A.A. Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field svetloe, Khabarovskiy kray). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 84–92. In Rus.
 22. Hewson R.D., Cudahy T.J., Mizuhiko S., Ueda K., Mauger A.J. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill–Cumamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99 (1–2), pp. 159–172.
 23. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radiance-at-sensor» data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99, pp. 127–139.
 24. Ivolga E.G., Gurovich V.G., Romanovsky N.P., Manilov Yu.F., Petrophysical Features of Tectonic Structures in the Sea of Okhotsk Continent-Ocean Transition Zone. *Russian journal of pacific geology*, 2016, vol. 35, no. 5, pp. 39–53. In Rus.
 25. Ivolga E.G., Manilov Yu.F., Romanovsky N.P., Gurovich V.G. Deep features of the placement of gold mineralization in the Ulya depression. *Russian journal of pacific geology*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 120–136. In Rus.
 26. Kopylov M.I., Pustovoitova I.V., Skryabin I.N. Prospects for the discovery of gold deposits in alunites in the south of the Far East region. *Proceedings of the Siberian Branch of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*, 2011, no. 2, pp. 84–98. In Rus.

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Dmitry V. Lesnyak, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; director of Geological Exploration Projects Directorate, JSC Polymetal Management, Khabarovsk branch.

Yury S. Ananyev, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Roman Yu. Gavrillov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.