

УДК 553.041(571.620)

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ Au-Ag МЕСТОРОЖДЕНИЙ КИСЛОТНО-СУЛЬФАТНОГО ТИПА ПО ДАННЫМ ДЕШИФРИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ (НА ПРИМЕРЕ РУДНОГО ПОЛЯ СВЕТЛОЕ, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

Ананьев Юрий Сергеевич¹,
AnanyevYS@tpu.ru

Житков Владимир Георгиевич¹,
vlgitkov@yandex.ru

Поцелуев Анатолий Алексеевич²,
poceluevaa52@mail.ru

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

² ООО «КосмоГеоПро»,
Россия, 634012, г. Томск, ул. Елизаровых, 41, оф. 1.

Актуальность. Расширение минерально-сырьевой базы действующих горнодобывающих предприятий требует современных подходов в изучении сопредельных площадей. Одним из таких современных методов в изучении площадей является использование современных спектроскопических снимков в целях выделения потенциально рудоносных площадей на основе структурно-вещественного дешифрирования.

Основная цель исследования заключалась в разработке критериев эпитермального золото-серебряного оруденения в пределах Охотско-Чукотского вулканического пояса на основе материалов дистанционных съемок.

Объектами исследования послужили известные рудные таксоны юго-восточного фланга Ульинской минерогенической зоны Охотско-Чукотского вулканического пояса.

Методы: обработка, спектральный анализ и дешифрирование современных спектроскопических снимков Landsat, Aster и снимков высокого пространственного разрешения Ikonos, WorldView, QuickBird.

Результаты. Разработаны региональные, локальные и детальные критерии Au-Ag оруденения на примере одного из участков Ульинской минерогенической зоны. Структурными критериями регионального уровня являются участки пересечения разнонаправленных разрывных нарушений во вложенных соподчиненных кольцевых структурах диаметром от 20 до 90 км. Структурно-вещественные критерии локального уровня – области сопряжения систем вложенных соподчиненных кольцевых структур размером от 1 до 10 км с зонами развития Fe-окисных индексов. К структурно-вещественным критериям детального уровня отнесены малые кольцевые структуры, выполненные телами вторичных кварцитов различных минеральных ассоциаций, сопряженные с зонами развития Fe-окисных индексов, внутри участков пропилитового типа изменений. На основе выявленных особенностей строения рудного поля Светлое, дан прогноз о перспективности южного и юго-восточного фланга на выявление золото-серебряного эпитермального оруденения. Предложена иерархическая дистанционная прогнозно-поисковая модель эпитермальных Au-Ag месторождений.

Ключевые слова:

Охотско-Чукотский вулканический пояс, космоматериалы, космоструктурные модели, вторичные кварциты, эпитермальные золото-серебряные месторождения.

Введение

Последнее десятилетие в практике геолого-разведочных работ стали широко применяться материалы мультиспектральных космических снимков. Их использование весьма актуально как на малоизученных площадях, так и в пределах известных горно-рудных районов. Анализ мультиспектральных снимков Aster и Landsat позволяет не только выявлять структурные особенности территорий, но и картировать метасоматически измененные горные породы различного минерального состава [1–12].

В минерогеническом отношении рудное поле Светлое размещается в юго-западной части Ульинского прогиба Охотской части ОЧВП и приурочено к участку пересечения Дюльбакинского дизъюнктива с Алалиндинским и Онемнинским. В структурном плане рудное поле приурочено к кальдере проседания размером около 30 км, которая выпол-

нена андезибазальтами, андезитами, туфами и лавами среднего состава, риолитами, дацитами, игнимбритами. Стратифицированный вулканогенный материал прорван штоками и дайками андезибазальтов и гранодиорит-порфиров. В составе рудного поля выделяется четыре рудных участка: Людмила, Тамара, Елена, Лариса. Au-Ag оруденение пространственно ассоциировано с телами вторичных кварцитов, в составе которых различают монокварцевые, кварц-алунитовые и кварц-гидрослюдисто-глинистые минеральные фации [13, 14]. В пострудную стадию в зоне гипергенеза под действием метеорных вод происходило интенсивное окисление первичных сульфидов и новообразование лимонита и ярозита [13, 14]. Такой тип месторождений в отечественной литературе называют «кислотно-сульфатным» [14–17], а в англоязычной – «high sulfidation» [18–20].

Методика

В основу исследований положены материалы мультиспектральных космических съемок низкого и среднего пространственного разрешения (Modis, Landsat, Aster), а также высокого пространственного разрешения (Ikonos, WorldView-1, WorldView-2, QuickBird). С целью создания цифровых моделей рельефа использованы материалы радарных съемок – SRTM и AsterGDEM.

Общая методика исследований космоматериалов включала в себя последовательно следующие этапы: подготовка, обработка, анализ и дешифрирование [21, 22]. При этом решались следующие задачи:

- подбор исходных космических данных различных систем;
- улучшение, классификация растровых изображений и их дешифрирование;
- создание спектрального изображения из моноканальных растров и его обработка;
- дешифрирование всего комплекса синтезированных изображений с выделением линейных и кольцевых (дуговых) структур и других особенностей геологического строения;
- расчет спектральных индексов по материалам Landsat и Aster;
- корреляционный анализ многоканальных изображений методом главных компонент;
- спектральный анализ многозонального изображения материалов Aster;
- интерпретация полученных материалов и составление схем дешифрирования.

Полученные результаты и их обсуждение

Получены разноуровневые иерархические структурно-вещественные модели регионального (фрагмент Ульяновской минерагенической зоны ОЧВП), локального (Уенминский рудно-россыпной узел) и детального (рудное поле Светлое) плана.

Космоструктурная модель регионального уровня генерализации (рис. 1) построена на основе структурного дешифрирования материалов Landsat, Modis и определяется системами вложенных (телескопированного типа) кольцевых структур диаметром от 20 до 90 км, приуроченных к участкам пересечения разноориентированных региональных разрывных нарушений. Подобные системы вложенных концентрических структур отражают пульсационное развитие глубинных энергетических очагов, которые проявляются в земной коре в виде мантийных диапиров, внутрикоровых магматических камер, многоуровневых вулканоплутонических комплексов, а также ареалы их развития и влияния [23–25].

Созданная модель регионального уровня генерализации юго-восточного фланга Ульяновской минерагенической зоны показывает, что все известные в ее пределах рудно-россыпные районы и рудные узлы выделяются совокупностью кольцевых (дуговых) и линейных структур, что дает основа-

ние рассматривать их в качестве структурных критериев соответствующих рудных таксонов. Следует подчеркнуть, что в Уенминском рудно-россыпном узле, включающем рудное поле Светлое, данные структуры проявлены в наибольшей степени (рис. 1). В связи с этим данная система телескопированных кольцевых структур была изучена в более детальном масштабе на локальном уровне.

Для построения модели рудного поля Светлое локального уровня использовано структурно-вещественное дешифрирование материалов мультиспектральных космических съемок Landsat ETM+, Landsat 8 и созданной по материалам радарных съемок SRTM и AsterGDEM цифровой модели рельефа (рис. 2).

Основными элементами этой модели, имеющими важное прогнозно-поисковое значение, являются: кольцевые и дуговые структуры второго порядка диаметром от 1 до 10 км, отражающие в первую очередь особенности морфологии и внутреннее строение палеовулканических аппаратов; линейменты, трассирующие отдельные тектонические нарушения; северо-западная зона, проявленная контрастными изменениями индексов оксидов железа, фиксирующихся в материалах Landsat. Низкими концентрациями индексов оксидов железа выделяются участки преобладающего распространения кислых вулканических пород урагской свиты, затронутых процессами аргиллизации. А повышенные показатели этих индексов связаны с зонами гипергенной лимонитизации. Представляется, что наиболее перспективными на выявление Au-Ag оруденения будут участки, находящиеся в пределах северо-западной зоны, внутри кольцевых структур 2-го порядка, сочетающихся с узлами пересечения разноориентированных линейментов и зонами повышенных значений индексов оксидов железа.

Данным критериям соответствуют несколько уже известных рудоносных участков – Светлое (1), Ягодка (2), Колка (3), Колорадо (4). Среди них по масштабам и интенсивности развития оксидов железа выделяется Светлинская площадь, что и определило ее выбор в качестве объекта более детального исследования.

Установленные закономерности проявления определившихся рудных полей в материалах мультиспектральных и радарных космических исследований этого уровня генерализации следует использовать в качестве локальных структурно-вещественных критериев Au-Ag рудных полей.

В результате выполненных исследований мультиспектральных материалов космических систем Aster и детальных материалов систем Ikonos, WorldView, QuickBird получена детальная схема рудного поля Светлое (рис. 3). Главными ее элементами являются: кольцевые структуры второго и третьего порядков, разнонаправленные линейменты, различные по составу метасоматиты, зоны развития лимонитизации.

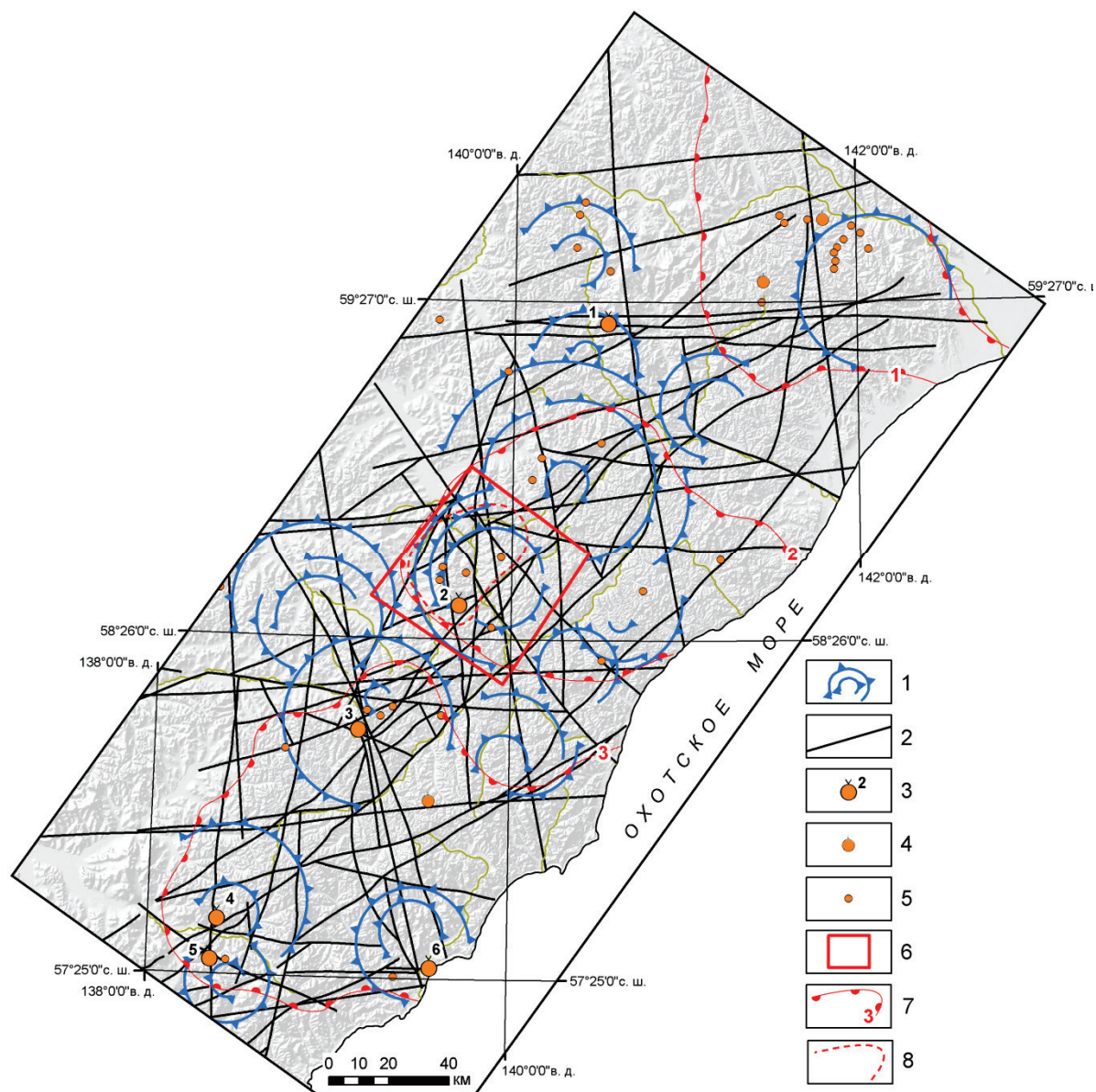


Рис. 1. Юго-восточный фланг Ульинской минерагенической зоны Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП). Основные космогеологические структуры: 1 – кольцевые структуры первого порядка; 2 – разрывные нарушения; 3–8 – рудные таксоны (по «Карта минерагенического районирования Хабаровского края», А.Ф. Васкин и др., 2006); 3 – средние месторождения (1 – Красивое, 2 – Светлое, 3 – Антыкит, 4 – Дар, 5 – Одары, 6 – Прибрежное); 4 – малые месторождения; 5 – рудопроявления; 6 – участок локального дешифрирования космоматериалов; 7 – рудно-россыпные районы (1 – Юровский, 2 – Среднеульинский, 3 – Верхнеульинский); 8 – Уенминский рудно-россыпной узел

Fig. 1. Southeastern flank of the Ulinsk mineragenic zone of Okhotsk-Chukotka volcanic belt (OCVB). The main cosmological structures: 1 are the first order ring structures; 2 are the faults; 3–8 are the ore taxa (according to the «Map of mineragenic zoning of the Khabarovsk kray», A.F. Vaskin et al., 2006); 3 are the medium deposits (1 – Krasivoe, 2 – Svetloe, 3 – Antykit, 4 – Dar, 5 – Odari, 6 – Pribrezhnoe); 4 are the small deposits; 5 are the occurrences; 6 is the area of local work on the interpretation data of remote sensing; 7 is the ore-placer district (1 – Yurovsky, 2 – Sredneulinsky, 3 – Verkhneulinsky); 8 are the Uenmink ore-placer clusters

Элементы геологического строения рудного поля явно выражены в материалах космических съемок. Так, положение палеовулканических построек и их отдельных элементов – кальдер проседания и жерловых каналов, проявляется дугowymi и кольцевыми элементами дешифрирования (рис. 3). Кольцевая структура второго порядка диаметром 9,5 км отражает пространственное разме-

щение палеовулканической постройки сложного строения, а структуры меньшего диаметра указывают на размещение пород жерловой фации.

Разноориентированные разрывные нарушения отчетливо проявляются в материалах космических съемок. Среди этих тектонических элементов преобладают северо-восточные (продольные к осевой части ОЧВП), северо-западные, субмидио-

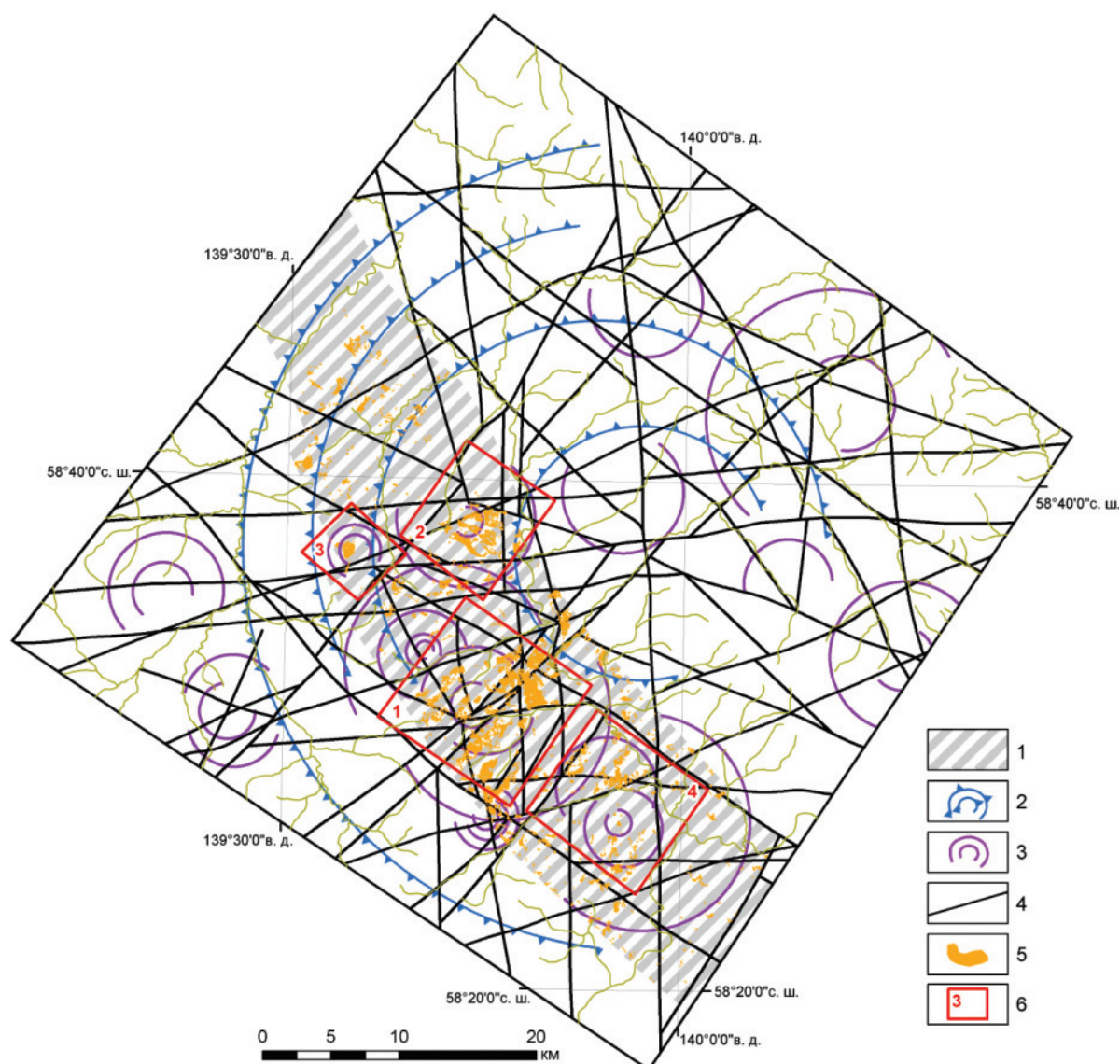


Рис. 2. Уенминский рудно-россыпной узел. Схема основных космогеологических структур: 1 – северо-западная зона; 2 – кольцевые структуры первого порядка; 3 – кольцевые структуры второго порядка; 4 – разрывные нарушения; 5 – участки высоких значений минерального индекса «Оксиды железа»; 6 – перспективные площади и их номера

Fig. 2. The Uenminsk ore-placer cluster. Local scheme of main cosmogeological structures: 1 is the northwest zone; 2 are the first order ring structures; 3 are the second order ring structures; 4 are the private faults; 5 are the sections of high values of the «Iron oxide» index; 6 are the forecast areas and their numbers

нальные и субширотные. Спектральный анализ многозональных космических снимков ASTER позволил выделить и закартировать в пределах площади тела метасоматитов – вторичных кварцитов и пропилитов. Среди вторичных кварцитов различаются монокварцевые, преимущественно кварц-алунит-глинистые и существенно кварц-гидрослюдистые. В составе пропилитов преобладают хлоритовые разновидности (рис. 3). Форма тел монокварцевых метасоматитов значительно отличается в центральной и краевых частях рудного поля. Тела неправильной и слабо вытянутой формы характерны для центральной части (месторождения Лариса, Елена), в то время как для краевых частей

более характерны объекты линейной морфологии (месторождения Людмила, Тамара). Сопоставление полученных результатов дешифрирования метасоматитов с результатами наземных съемок [14], выполненных в центральной и северной частях палеовулканической постройки, показало весьма высокую сходимость. Однако следует отметить, что видимые размеры тел монокварцевых метасоматитов, выделенных по результатам дешифрирования, оказываются завышенными, что объясняется низким и средним пространственным разрешением материалов ASTER.

Зоны гипергенной лимонитизации фиксируются в материалах спектрального анализа космиче-

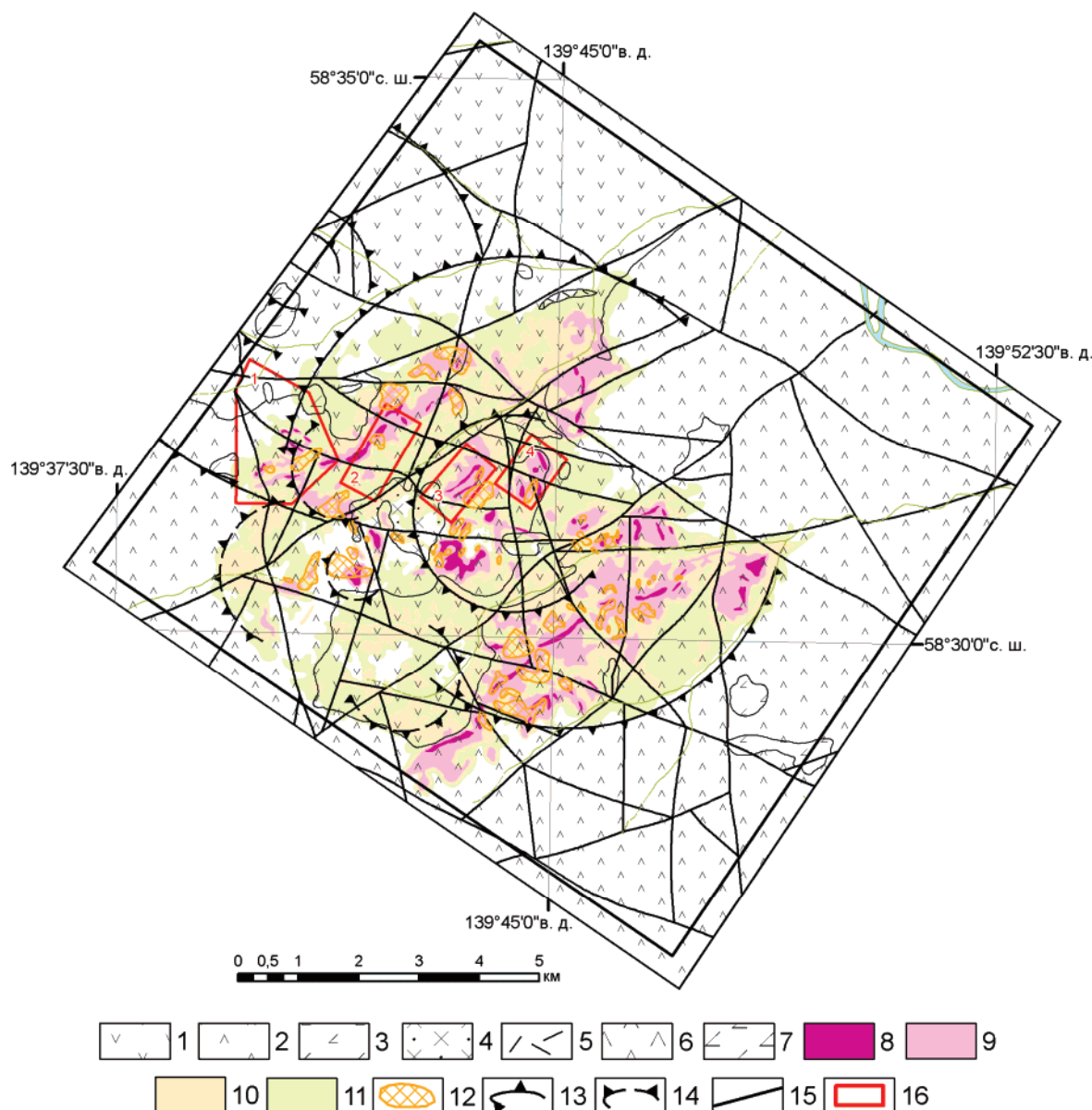


Рис. 3. Рудное поле Светлое. Детальная схема (по материалам дешифрирования Aster, Ikonos и др.): 1–2 – урагская свита: 1 – андезиты, андезибазальты, их лавы и туфы; 2 – игнимбриты дациты, туфы; 3 – андезибазальты хакаринской свиты; 4–6 – урагский дацит-риолитовый комплекс: 4 – гранодиорит-порфиры; 5 – риолиты; 6 – дациты; 7 – штоки андезибазальтов хакаринского комплекса; 8–10 – метасоматические кварциты: 8 – монокварцевые; 9 – преимущественно кварц-алунит-глинистые; 10 – кварц-гидрослюдистые; 11 – пропилиты; 12 – участки экзогенной лимонитизации; 13–14 кольцевые структуры: 13 – второго и 14 – третьего порядков; 15 – разрывные нарушения; 16 – участки детальных работ (1 – Людмила, 2 – Тамара, 3 – Елена, 4 – Лариса)

Fig. 3. The Svetloe ore field. Detailed cosmochemical scheme (based on the interpretation of Aster, Ikonos and others datas): 1–2 – Urakskaya suite: 1 – andesites, andesibasalts, their lavas and tuffs; 2 – ignimbrites dacites, tuffs; 3 – andesibasalts of the khakarinsk suite; 4–6 – Uraksky dacite-rhyolite complex: 4 – granodiorite-porphyr; 5 – rhyolites; 6 – dacites; 7 – stocks of andesibasalts of the khakarinsk complex; 8–10 – metasomatic silica: 8 – mono-quartz; 9 – quartz-alunite-clay; 10 – quartz-hydromica; 11 – propylites; 12 – areas of intensive limonization; 13 – ring structures of the second order; 14 – third-order ring structures; 15 – faults; 16 – areas of detailed work (1 – Lyudmila, 2 – Tamara, 3 – Elena, 4 – Larisa)

ских снимков Aster повышенными значениями параметров – «Железная шляпа» (Gossan) и «Трехвалентное железо» (Ferric Iron) и отражают участки возможного развития зоны окисления первичных сульфидсодержащих пород.

Известные участки Людмила, Тамара, Елена, Лариса приурочены к центральной и северной ча-

стям палеовулканической структуры. На участках отчетливо проявлены тела метасоматитов кварцевого и кварц-алунит-глинистого составов в пространственной ассоциации с зонами интенсивного развития оксидов железа (рис. 3). Таким образом, выявленные структурно-вещественные характеристики эпитермальных Au-Ag месторождений ки-

Таблица. Многоуровневая прогнозно-поисковая модель эпитермальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край)

Table. Multilevel forecast and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits (on the example of the Svetloe ore field, Khabarovskiy Kray)

Уровень генерализации/масштабы Generalization level/scale	Рудные таксоны Ore taxa	Признаки выделения Signs of exposure	Геологическая интерпретация Geological interpretation
Региональный/1:1000000 Regional/1:1000000	Рудный район, рудный узел Ore-bearing district, ore cluster	Совокупность вложенных (телескопированных) кольцевых и дуговых структур диаметром от 20 до 90 км в участках пересечения разноориентированных разрывных нарушений Systems of telescoped ring structures with a diameter of 20–90 km at the junction of longitudinal, transverse and diagonal faults	Проявление мантийных диапиров, внутрикоровых магматических камер, многоуровневых вулcano-плутонических комплексов Mantle diapirs, intracrustal magmatic chambers, multilevel volcano-plutonic complexes and areas of their development and influence
Локальный/1:200000–1:100000 Local/1:200000–1:100000	Рудное поле Ore field	Совокупность вложенных (телескопированных) кольцевых и дуговых структур диаметром от 1 до 10 км в участках пересечения разноориентированных разрывных нарушений и их сопряжение с высокоградиентными зонами индексов оксидов железа Systems of telescoped ring structures with a diameter of 1–10 km at the junctions of the longitudinal, transverse and diagonal faults. Zones of intensive redistribution of Fe-oxide indices. Conjugation of telescopic circle structures with areas of high values of Fe-oxide indices	Палеовулканические постройки и элементы их строения. Участки интенсивного кислотного выщелачивания. Участки гипергенной лимонитизации Paleovolcanoes and their elements. Intense acid leaching zones. Areas of hypergene limonitization
Детальный/1:50000–1:25000 Detailed/1:50000–1:25000	Месторождение, продуктивная зона Deposit, productive zone	Дуговые и кольцевые структуры размером до 3 км. Тела сложенные различными минеральными ассоциациями формации вторичных кварцитов, внутри участков пропилитового типа изменений, сопряженные с зонами развития Fe-окисных индексов Ring structures with a diameter of not more than 3 km. Bodies of silica of mono-quartz, quartz-alunite-clay and quartz-hydromica compositions among fields of propylitized rocks associated with areas of high values of Fe-oxide indices	Вулканические структуры кальдерного и жерлового типа. Тела вторичных кварцитов различного состава. Зоны интенсивного развития лимонитизации и участки развития зоны окисления первичных сульфидсодержащих руд (пород) Calderas and ventral parts of the paleovolcanoes. The bodies of silica of different composition. Areas of intense hypergenic limonitization and vuggy silica

кислотно-сульфатного типа можно использовать в качестве поисковых критериев при анализе материалов детальных космических съемок.

Результаты комплексного анализа материалов космических съемок различного пространственного разрешения по западной части Ульинского прогиба положены в основу предлагаемой многоуровневой прогнозно-поисковой модели эпитермального Au-Ag оруденения кислотно-сульфатного типа (таблица).

Учитывая полученные по материалам космических съемок новые данные о геологическом строении рудного поля Светлое и особенностях локализации в его пределах рудных месторождений и выработанный на этой основе комплекс поисковых критериев, можно прогнозировать высокие перспективы обнаружения золото-серебряного оруденения в пределах юго-восточного и южного флангов золоторудного поля.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить региональную, локальную и детальную космоструктурные схемы эпитермального Au-Ag ору-

денения в пределах Ульинской минерагенической зоны ОЧВП. Предложена иерархическая прогнозно-поисковая модель эпитермальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа. Полученные закономерности локализации рудных таксонов позволяют рекомендовать их как дистанционные критерии Au-Ag оруденения. Дан прогноз перспективности южного и юго-восточного флангов рудного поля Светлое. Структурными критериями регионального уровня являются участки пересечения разнонаправленных разрывных нарушений во вложенных соподчиненных кольцевых структурах диаметром от 20 до 90 км. Структурно-вещественные критерии локального уровня – области сопряжения систем вложенных соподчиненных кольцевых структур размером от 1 до 10 км с зонами развития Fe-окисных минералов. К структурно-вещественным критериям детального уровня отнесены малые кольцевые структуры, выполненные телами, сложенными различными минеральными ассоциациями формации вторичных кварцитов, внутри участков пропилитового типа изменений, сопряженные с зонами развития Fe-окисных индексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms // *Geosphere*. – 2006. – V. 2 (3). – P. 161–186.
2. Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews*. – 2007. – V. 32. – P. 275–290.
3. Zhang X., Pazner M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2007. – V. 62 (4). – P. 271–282.
4. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran // *Journal of African Earth Sciences*. – 2007. – V. 30. – P. 238–252.
5. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // *Ore Geology Reviews*. – 2010. – V. 38 (1–2). – P. 59–69.
6. Azizi H., Tarverdi M.A., Akbarpour A. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran // *Advances in Space Research*. – 2010. – V. 46. – P. 99–109.
7. Pour B.A., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // *Ore Geology Reviews*. – 2012. – V. 44. – P. 1–9.
8. Detection of hydrothermal mineralized zones associated with listwaenites in Central Oman using ASTER data / S. Rajendran, S. Nasir, T.M. Kusky, A. Ghulam, S. Gabr, M.A.K. El-Ghali // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – V. 53. – P. 470–488.
9. Ayooobi I., Tangestani M. H. Evaluating the effect of spatial subsetting on subpixel unmixing methodology applied to ASTER over a hydrothermally altered terrain // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2017. – V. 62. – P. 1–7.
10. Rajendran S., Nasir S. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 88. – P. 317–335.
11. Fereydooni H., Mojeddifar S. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2017. – V. 61. – P. 1–13.
12. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran / T. Yousefi, F. Aliyari, A. Abedini, A. Asghar Calagari // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2018. – V. 11. – I. 17. – P. 1–19.
13. К условиям формирования редкометального рудопоявления Эмми (Ульинская структурно-металлогеническая зона) / А.Г. Колесников, И.А. Брызгалов, Т.Л. Рассказова, Н.Е. Савва // Чтения памяти К.В. Симакова: Всероссийская научная конференция. Сборник материалов. – Магадан: СВКНИИ, 2007. – С. 90–91.
14. 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.
15. Наумова О.А., Алышева Э.И. Гидротермально измененные породы Озерновского золото-серебряного месторождения Камчатка // *Отечественная геология*. – 1995. – № 1. – С. 35–43.
16. Мишин Л.Ф., Бердников Н.В. Вторичные кварциты и их рудоносность. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 160 с.
17. Глухов А.Н. Алунит-кварцевые эпitherмальные месторождения золота России и стран СНГ: открытия последних лет и перспективы выявления на северо-востоке Азии // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. – 2011. – № 3. – С. 7–17.
18. Sillitoe R.H. Gold metallogeny of Chile – an Introduction // *Economic Geology*. – 1991. – V. 86 (6). – P. 1187–1205.
19. Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E. Exploration for epithermal gold deposits // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 245–277.
20. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // *Economic Geology*. – 2010. – V. 105. – P. 3–41.
21. Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГИИ, 2000. – 316 с.
22. Дистанционные методы геологических исследований, прогноза и поиска полезных ископаемых (на примере Рудного Алтая) / А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов. – Томск: СТТ, 2007. – 228 с.
23. Томсон И.Н., Кочнева Н.Т., Кравцов В.С. Системы концентрических структур, их типы и рудоносность // *Геология рудных месторождений*. – 1982. – № 4. – С. 21–33.
24. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В. Дистанционная оценка золотоносного потенциала Северной Буриятии // *Руды и металлы*. – 2008. – № 1. – С. 45–51.
25. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Дистанционный прогноз кимберлитового магматизма. – М.: Триумф, 2017. – 312 с.

Поступила 14.01.2019 г.

Информация об авторах

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

Житков В.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Поцелуев А.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный геолог ООО «КосмоГеоПро».

UDC 553.041(571.620)

FORECASTING AND PROSPECTING MODEL OF EPITHERMAL HIGH SULFIDATION Au-Ag DEPOSITS USING MODERN SATELLITE DATA (ON THE EXAMPLE OF ORE FIELD SVETLOE, KHABAROVSKIY KRAY)

Yury S. Ananyev¹,
AnanyevYS@tpu.ru

Vladimir G. Zhitkov¹,
vlgitkov@yandex.ru

Anatoliy A. Potseluev²,
poceluevaa52@mail.ru

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

² «KosmoGeoPro» LLC,
41, Elizarovkyh street, Tomsk, 634012, Russia.

The relevance. The expansion of the mineral resource base of existing mining enterprises requires modern approaches to the study of adjacent areas. One of such modern methods in the study of areas is the use of modern spectral space imagery in order to isolate potentially ore-bearing areas based on structural and material interpretation.

The main aim of the work was to develop the criteria for epithermal gold-silver mineralization within the Okhotsk-Chukotka volcanic belt based on materials from remote surveys.

The objects of the research were the well-known ore taxa of the southeastern flank of the Ulinskaya mineragenic zone of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

Methods: processing, spectral analysis and interpretation of modern remote sensing Landsat, Aster and high resolution images Ikonos, WorldView, QuickBird.

Results. The authors have developed regional, local and detailed criteria for epithermal Au-Ag mineralization using the example of one of the sections of the Ulinsk mineragenic zone. Structural criteria for the regional level are systems of telescoped ring structures with a diameter of 20–90 km at the junction points of multidirectional faults. Structural and material criteria of the local level are the areas of conjugation of systems of nested coordinated ring structures with sizes from 1 to 10 km with zones of development of Fe-oxide indices. The structural-material criteria of the detailed level include small ring structures made by the bodies of silica of various mineral composition, associated with zones of development of Fe-oxide indices, within the sections of the propilitic type of alteration. On the basis of the identified features of the structure of the Svetloe ore field, a forecast was made of the prospects for the southern and southeastern flank to identify Au-Ag epithermal mineralization. A hierarchical remote sensing forecast and prospecting model of epithermal Au-Ag deposits is proposed.

Key words:

Okhotsk-Chukotka volcanic belt, remote sensing materials, cosmostructural models, silica, epithermal gold-silver deposits.

REFERENCES

1. Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2006, vol. 2 (3), pp. 161–186.
2. Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 2007, vol. 32, pp. 275–290.
3. Zhang X., Pazner M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, vol. 62 (4), pp. 271–282.
4. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, vol. 30, pp. 238–252.
5. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 2010, vol. 38 (1–2), pp. 59–69.
6. Azizi H., Tarverdi M.A., Akbarpour A. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research*, 2010, vol. 46, pp. 99–109.
7. Pour B.A., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 44, pp. 1–9.
8. Rajendran S., Nasir S., Kusky T.M., Ghulam A., Gabr S., El-Ghali M.A.K. Detection of hydrothermal mineralized zones associated with listwaenites in Central Oman using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 2013, vol. 53, pp. 470–488.
9. Ayoobi I., Tangestani M. H. Evaluating the effect of spatial subsetting on subpixel unmixing methodology applied to ASTER over a hydrothermally altered terrain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, vol. 62, pp. 1–7.
10. Rajendran S., Nasir S. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 88, pp. 317–335.
11. Fereydooni H., Mojeddifar S. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data. *International Journal of*

- Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, vol. 61, pp. 1–13.
12. Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Asghar Calagari A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, Iss. 17, pp. 1–19.
 13. Kolesnikov A.G. K usloviyam formirovaniya redkometalnogo rudoproyavleniya Emmi (Ulinskaya strukturno-metallogenicheskaya zona) [To the conditions of formation of the rare-metal ore occurrence Emmi (Ulinskaya structural metallogenic zone)]. *Chteniya pamyati K.V. Simakova. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Readings in memory of K.V. Simakov. Collection of materials of All-Russian Scientific Conference]. Magadan, NEIRI Publ., 2007. pp. 90–91.
 14. Mishin L.F. Secondary quartzites and their relation to gold ore mineralization of the Svetloe deposit (Ulya trough, Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt). *Tikhookeanskaya geologiya*, 2011, vol. 30 (4), pp. 32–48.
 15. Naumova O.A. Alysheva E.I. Gidrotermalno izmenennye porody Ozerovskogo zoloto-serebryanogo mestorozhdeniya Kamchatki [Altered rocks of the Ozerovskiy gold-silver deposit at Kamchatka]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, vol. 1, pp. 35–43.
 16. Mishin L.F., Berdnikov N.V. *Vtorichnye kvartsity i ikh rudonost* [Secondary quartzites and their ore content]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2003. 160 p.
 17. Glukhov A.N. Alunit-kvartsevye epitermalnye mestorozhdeniya zolota Rossii i stran SNG: otkrytiya poslednikh let i perspektivy vyyavleniya na severo-vostoche Azii [Alunite-quartz epithermal gold deposits in Russia and the CIS countries: discoveries of recent years and prospects for identification in northeast Asia]. *Vestnik SVNC DVO RAN*, 2011 (3), pp. 7–17.
 18. Sillitoe R.H. Gold metallogeny of Chile – an Introduction. *Economic Geology*, 1991, vol. 86 (6), pp. 1187–1205.
 19. Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 245–277.
 20. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–41.
 21. *Aerokosmicheskie metody geologicheskikh issledovaniy* [Aerospace geological research methods]. Ed. by A.V. Pertsov. St-Petersburg, SPb kartfabriki VSEGI Publ., 2000. 316 p.
 22. Potseluev A.A., Ananyev Yu.S., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. *Distantsionnye metody geologicheskikh issledovaniy, prognoza i poiska poleznykh iskopaemykh (na primere Rudnogo Altaya)* [Remote methods of geological studies, mineral deposit prognosis and prospecting (at the example of Rudny Altay)]. Tomsk, STT Publ., 2007. 228 p.
 23. Tomson I.N., Kochneva N.T., Kravtsov V.S. Sistemy kontsentricheskikh struktur, ikh tipy i rudonosnost [Systems of ring structures, their types and ore content]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1982, vol. 4, pp. 21–33.
 24. Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Gromtsev K.V. Remote assessment of the gold-bearing potential of Northern Buryatia. *Rudy i metally*, 2008, vol. 1, pp. 45–51. In Rus.
 25. Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Zuev V.M. *Distantsionnyy prognoz kimberlitovogo magmatizma* [Remote forecast of kimberlite magmatism]. Moscow, Triumf Publ., 2017. 312 p.

Received 14 January 2019.

Information about the authors

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

Vladimir G. Gitkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatoliy A. Potseluev, Dr. Sc., professor, chief geologist, «KosmoGeoPro» LLC.