

УДК 553.411.071:550.4

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

Шифр специальности ВАК: 1.6.6, 1.6.10

Структурные и геофизические критерии золотого оруденения Таборнинского золоторудного поля (юго-западная Якутия)

А.В. Ярчук^{1,2✉}, Ю.С. Ананьев¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² ООО «Нерюнгри-Металик», Россия, г. Нерюнгри (Хани)

✉avy29@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В юго-западной Якутии в южной части угуйского грабена выявлен ряд золоторудных месторождений (Таборное, Гросс, Темное и др.), которые были сформированы в период мезозойской тектономагматической активизации в связи с внедрением малых интрузий сиенитов, проявлением гумбеитизации и березитизации с сопряженным золотым оруденением. Эти большеобъемные объекты относят к новому угуйскому типу. Невысокая изученность подобных объектов, в совокупности с простой технологией разработки и переработки подобного минерального сырья, определяет актуальность выявления критериев оруденения золоторудных месторождений подобного типа на примере Таборнинского рудного поля. **Цель.** Разработка структурно-вещественных и геофизических разноранговых критериев золотого оруденения угуйского типа. **Методы.** Для выполнения поставленной цели использовалось структурно-вещественное дешифрирование современных спектральных снимков Landsat, Aster, Sentinel и цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), обработка и интерпретация физических полей по данным аэромагнитометрической и аэрогаммаспектрометрической съемок с построением структурно-вещественной схемы рудного поля и уточнением его геологического строения. **Выводы.** Золотое оруденение в структурном отношении контролируется взбросо-надвиговым структурным парагенезисом в надинтрузивных участках, выявленных при дешифрировании космических снимков. Установлено, что вещественными критериями протекания рудно-метасоматических процессов можно считать как результаты спектрального анализа космических снимков, так и аэромагнитные и аэрогаммаспектрометрические поля.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, угуйский тип, Таборнинское рудное поле, поисковые критерии, дешифрирование космических снимков, аэрогеофизика

Для цитирования: Ярчук А.В., Ананьев Ю. С. Структурные и геофизические критерии золотого оруденения Таборнинского золоторудного поля (юго-западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 202–211. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

UDC 553.411.071:550.4

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

Structural and geophysical criteria of gold minerality of the Taborninsky gold field (Southwestern Yakutia)

A.V. Yarchuk^{1,2✉}, Yu.S. Ananyev¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² LLC «Neryungri-Metalik», Neryungri (Khani), Russian Federation

✉avy29@tpu.ru

Abstract. Relevance. In southwestern Yakutia, in the southern part of the Uguy graben, a number of gold deposits (Tabornoe, Gross, Temnoe, etc.) have been identified. They were formed during the period of Mesozoic tectono-magmatic activation in relation to the introduction of small intrusions of syenites, manifestation of gumbeitization and beresitization with associated gold mineralization. These large-volume objects are classified as new Uguy type. The low level of knowledge of such objects,

combined with the simple technology of development and processing of such mineral raw materials, determines the relevance of identifying criteria for the mineralization of gold ore deposits of this type using the example of the Taborninsky ore field. **Aim.** To develop structural, material and geophysical criteria for gold mineralization of the Ugui type of the rank of ore field and deposit. **Methods.** To achieve this goal the authors used structural and material interpretation of modern spectro-zonal images from Landsat, Aster, Sentinel and a digital relief model SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), processing and interpretation of physical fields based on aeromagnetic and airborne gamma spectrometric surveys with the construction of a structural and material diagram of the ore field and clarification of its geological structure. **Conclusions.** Gold mineralization is structurally controlled by reverse-thrust structural paragenesis in supra-intrusive areas identified by interpretation of satellite images. It was established that both the results of spectral analysis of space images and aeromagnetic and aerial gamma spectrometric fields can be considered as material criteria for the occurrence of ore-metasomatic processes.

Keywords: ore gold deposit, Ugui type, Taborninsky ore field, search criteria, interpretation of satellite images, airborne geophysics

For citation: Yarchuk A.V., Ananyev Yu.S. Structural and geophysical criteria of gold minerality of the Taborninsky gold field (Southwestern Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 202–211. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

Введение

Таборнинское золоторудное поле расположено в пределах западного склона Алдано-Станового щита Сибирской платформы. В металлогеническом отношении рудное поле является составной частью Угуйского медно-ураново-золоторудного района и Верхнетоккинской уран-золотоносной минерагенической зоны [1–5].

Таборнинское рудное поле вмещает месторождения (Таборное, Темное-Таборное, Гросс), рудопроявления золота (Высокое, Рудное, Токкинское, Южное, Усинское) и россыпи ручьев Тёмный, Таборный, Гросс, Усу и др. (рис. 1). Разрабатываемые в настоящее время месторождения рудного поля относятся к так называемому «угуйскому» геолого-промышленному типу большеобъемных месторождений с невысоким содержанием полезного компонента. Эти объекты были сформированы в период мезозойской тектономагматической активизации в связи с внедрением малых интрузий сиенитов калиевой серии по зонам чешуйчатых взбросо-надвиговых структур, сопровождавшимся гумбеитизацией и березитизацией вмещающих пород с сопряженной золоторудной минерализацией с последующими гипергенными преобразованиями с образованием линейных кор выветривания неполного профиля [3, 6–8].

Геологическое строение рудного поля Таборное

Таборнинское рудное поле (рис. 1) располагается в южной части Угуйского грабена, который был заложен в рифее на архейском основании, метаморфизованном в условиях амфиболитовой фации (олекминская и борсалинская серии верхнего архея) [8]. На метаморфическом основании грабена несогласно залегают пестроцветные вулканогенно-карбонатно-терригенные образования нижнего протерозоя (тоустайская, правдинская, амнунинская свиты) мощностью от 400 до 800 м. Страти-

графически выше с разрывом залегают карбонатно-терригенные образования телиэрской свиты мощностью от 70 до 150 м. Основную часть угуйского грабена выполняют терригенные породы олонноконской свиты, которые с базальными конгломератами в основании (5–10 м) залегают на различных горизонтах подстилающих нижнепротерозойских стратиграфических подразделений вплоть до пород кристаллического фундамента архея. Свита разделяется на две подсвиты – нижнюю и верхнюю. Нижнеолонноконская подсвита сложена монотонной толщей красноцветных песчаников мелко-крупнозернистых с параллельной и косой слоистостью. В нижней части – прослои темно-коричневых алевролитов мощностью до 1 м, в основании – базальные конгломераты и конглобрекции с обломками и галькой пород кристаллического фундамента. Мощность подсвиты 250–1200 м. Верхнеолонноконская подсвита представлена песчаниками красноцветными, мелкозернистыми, кварцполевошпатовыми, редко кварцевыми, слоистость пород горизонтальная и косослоистая, отмечаются редкие прослои темно-коричневых алевролитов, линзы гравелитов, конгломератов и серых медистых песчаников. Мощность подсвиты лежит в пределах от 150 до 550 м.

В пределах Таборнинского рудного поля, на современной дневной поверхности, обнажаются только образования нижнеолонноконской подсвиты нижнего протерозоя.

В исследуемом районе проявилось несколько тектономагматических этапов, которые сформировали позднеархейские, рифейский и мезозойской магматические комплексы. В пределах рудного поля позднеархейские комплексы представлены палингенно-метасоматическими ханинским (граниты и гранитогнейсы) и чародоканским (граниты, субщелочные граниты, кварцевые сиениты). Рифейский магматизм проявлен торским комплексом

метадолеритовых даек преимущественно северо-восточного простирания. И, наконец, мезозойский магматизм этапа тектономагматической активизации проявился в виде даек, силлов и небольших штоков эгириновых сиенитов, тенсбергит-порфиров, сельвсбергитов, бостонит-порфиров, нордмаркитов, субщелочных и щелочных сиенит-порфиров.

Главной тектонической структурой рудного поля является юго-западное окончание угуйского грабена, который ограничен с запада Токкинской зоной глубинного разлома, а с юга – Кондинской (рис. 1).

Пликативная структура рудного поля представлена южным крылом брахисинклинали с осью северо-восточного простирания и небольшими углами падения крыла (10–25°), осложненная флексурными перегибами.

С мезозойским этапом тектономагматической активизации связано формирование метасоматитов калиевого профиля – гумбеитов и березитов. Метасоматиты этих типов контролируются субширотной Кондинской зоной разломов, протягивающейся вдоль южной границы Угуйского грабена. Также они тяготеют к зонам разрывных нарушений различной кинематики, как секущих по отношению к слоистости вмещающих осадочных пород нижнеолонноконской подсвиты, так и субогласных со слоистостью. Золотое оруденение приурочено к зонам гидротермальной проработки песчаников нижнеолонноконской подсвиты кебектинской серии. Рудные тела тяготеют к разрывной тектонике и по морфологии представляют собой минерализованные зоны с невысокими выдержанными содержаниями золота и развитым по ним линейным кограм выветривания.

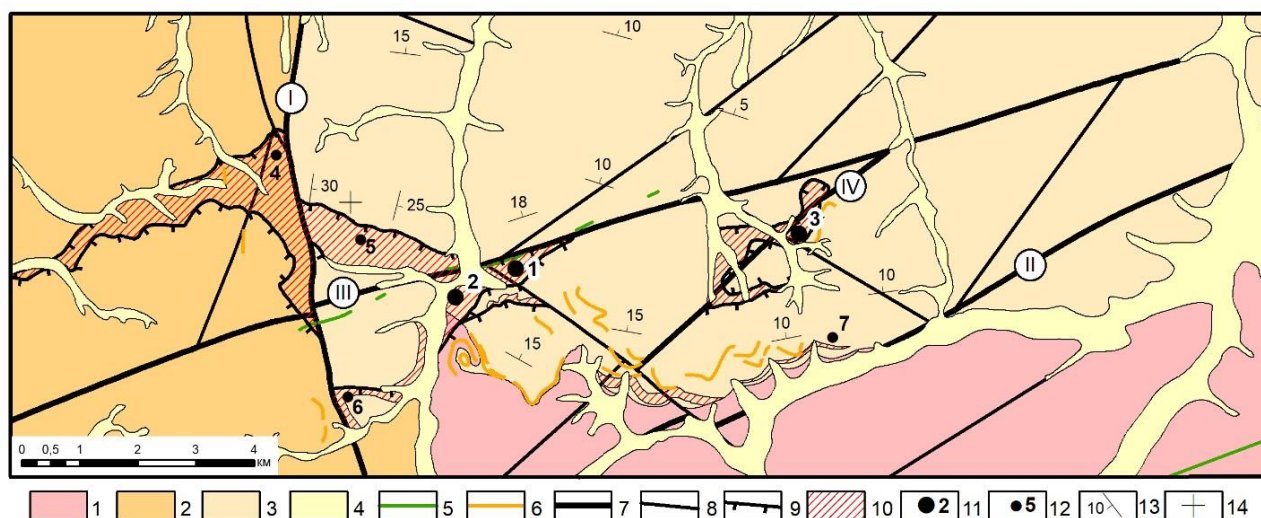


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Таборнинского рудного поля (по [8] с дополнениями авторов): 1 – граниты и гранитогнейсы ханинского комплекса позднего архея; 2 – граниты, субщелочные граниты, кварцевые сиениты чародоканского комплекса позднего архея; 3 – красноцветные кварц-полевошпатовые песчаники нижней олонноконской подсвиты нижнего протерозоя; 4 – аллювиальные, флювиогляциальные, пролювиальные отложения плейстоцена-голоцена; 5 – дайки метадолеритов торского комплекса позднего рифея; 6 – силлы и дайки сиенитов и бостонитов алданского интрузивного комплекса раннего мела; 7–9 – разрывные нарушения: 7 – главные (I – Токкинский, II – Кондинский, III – Таборнинский, IV – Гроссовский); 8 – прочие; 9 – надвиги и взбросы; 10 – рудовмещающие коры выветривания по метасоматически измененным породам; 11, 12 – месторождения и рудопроявления Таборнинского рудного поля: 11 – месторождения (1 – Таборное, 2 – Темное-Таборное, 3 – Гросс); 12 – рудопроявления (4 – Токкинское, 5 – Рудное, 6 – Высокое, 7 – Южное); 13, 14 – элементы залегания слоистости: 13 – наклонное залегание; 14 – горизонтальное залегание

Fig. 1. Schematic geological map of the Taborninsky ore field (according to [8] with additions by the authors): 1 – granites and granite gneisses of the Khaninsky complex of the late Archean; 2 – granites, subalkaline granites, quartz syenites of the Charodokan complex of the Late Archean; 3 – red-colored quartz-feldspathic sandstones of the lower Olonnok subformation of the Lower Proterozoic; 4 – alluvial, fluvio-glacial, proluvial sediments of the Pleistocene-Holocene; 5 – metadolerite dikes of the Late Riphean Tor complex; 6 – sills and dikes of syenites and bostonites of the Aldan intrusive complex of the Early Cretaceous; 7–9 – discontinuous faults: 7 – main (I – Tokkinsky, II – Kondinsky, III – Taborninsky, IV – Grossovsky); 8 – other; 9 – thrusts and reverse faults; 10 – ore-bearing weathering crusts on metasomatically altered rocks; 11, 12 – deposits and ore occurrences of the Taborninsky ore field: 11 – deposits (1 – Tabornoe, 2 – Temnoe-Tabornoe, 3 – Gross); 12 – ore occurrences (4 – Tokkinskoe, 5 – Rudnoe, 6 – Vysokoe, 7 – Yuzhnoe); 13, 14 – elements of bedding: 13 – inclined bedding; 14 – horizontal position

Методика исследования

В основу исследования положены материалы космических съемок Landsat, Aster и цифровая модель рельефа SRTM, полученные из библиотеки космических снимков американского геологического общества [9]. Результаты съемок Sentinel получены с портала Европейского космического агентства [10]. Методика обработки материалов космических съемок в литературе обсуждалась достаточно широко [11–24] и сводилась к следующему:

- подбор материалов космических съемок Landsat, Sentinel, Aster и SRTM;
- первичная обработка, улучшение, радиометрическая калибровка, классификация исходных растровых изображений и их структурное дешифрирование;
- создание мультиспектральных изображений из моноканальных растров и их структурное дешифрирование;
- расчет спектральных индексов по материалам Aster и их дешифрирование: филлитовый и $(\text{Fillit} = (\text{Band5} + \text{Band7}) / \text{Band6})$ глинистый $(\text{Clay} = (\text{Band5} * \text{Band7}) / (\text{Band6} * \text{Band6}))$ минеральные индексы указывают на участки преимущественного развития гидрослюдистых и глинистых минералов; мафический индекс [18] $(\text{Mi}^3 = (\text{band12} * \text{band14} * \text{band14} * \text{band14}) / (\text{band13} * \text{band13} * \text{band13} * \text{band13}))$, значения которого менее 0,87, указывает на участки распространения кислых пород и окварцевания; индекс трехвалентного железа $(\text{Fe}^{3+} = \text{Band2} / \text{Band1})$ фиксирует участки с окисленными сульфидами и карбонатами железа;
- корреляционный анализ SWIR диапазона съемок Aster методом главных компонент и их дешифрирование. В исследованиях был применен метод селективных главных компонент [21–23]. Эта разновидность традиционного метода заключается в том, что для расчетов используются не все 6 каналов SWIR диапазона Aster, а 5 или 4, но обязательно те, в которых отражаются характеристические полосы поглощения картируемых минералов и минеральных ассоциаций;
- геологическая интерпретация всего комплекса полученных материалов с созданием структурно-вещественной схемы Таборнинского рудного поля с привлечением геологических, геохимической и аэрогеофизической информации;
- обоснование структурных и вещественных критериев золотого оруденения по результатам структурно-вещественного дешифрирования.

В исследованиях использованы результаты аэрогеофизических съемок, выполненных компанией ФГУ НПП «Геологоразведка» в 2009 г. Обработка и интерпретация физических полей и их про-

изводных выполнялись с целью выделения неоднородностей верхней части земной коры, выделения и подтверждения положения дизъюнктивных нарушений, возможных участков протекания метасоматических процессов, развития кор выветривания и других элементов геологического строения.

Методика работы с аэрогеофизическими данными была следующей:

- интерпретация наблюдаемых полей с выделением элементов геологического строения;
- расчет градиентных, корреляционных и статистических показателей по наблюдаемым полям и их последующая интерпретация;
- сопоставление физических полей и их дериватов с элементами структурного геологического дешифрирования для подтверждения корректности их выделения;
- выделение возможных участков протекания метасоматических процессов и их сопоставление с результатами вещественного дешифрирования;
- интерпретация всего комплекса полученной информации с привлечением геологических, геохимических данных с целью обоснования геофизических критериев золотого оруденения.

Полученные результаты

Обработка и дешифрирование современных спектральных снимков Landsat, Sentinel, Aster позволили составить структурно-вещественную схему Таборнинского рудного поля (рис. 2). Основными элементами схемы являются стратифицированные образования, магматические комплексы, кольцевые структуры, разрывные нарушения, коры выветривания, участки окварцевания и лимонитизации.

Стратифицированные красноцветные кварц-полевошпатовые песчаники нижней олонноконской подсистемы нижнего протерозоя уверенно распознаются на космических снимках по линейно-полосчатому рисунку растрового изображения космоматериалов, отражающего слоистость стратифицированных комплексов.

Интрузивные породы ханинского и чародоканского комплексов позднего архея в материалах дистанционных съемок фиксируются относительно однородными тонами растрового изображения, слабо проявленной решетчатой системой протектонических трещин, бугристым рельефом и разреженным растительным покровом. Между собой породы разных комплексов различаются значениями мафического индекса третьей степени – граниты ханинского комплекса проявляют более низкие значения этого индекса в сравнении с породами чародоканского комплекса.

Дайки метадолеритов Торского комплекса позднего рифея выделяются хорошо выраженными гребнями рельефа северо-восточного простирания.

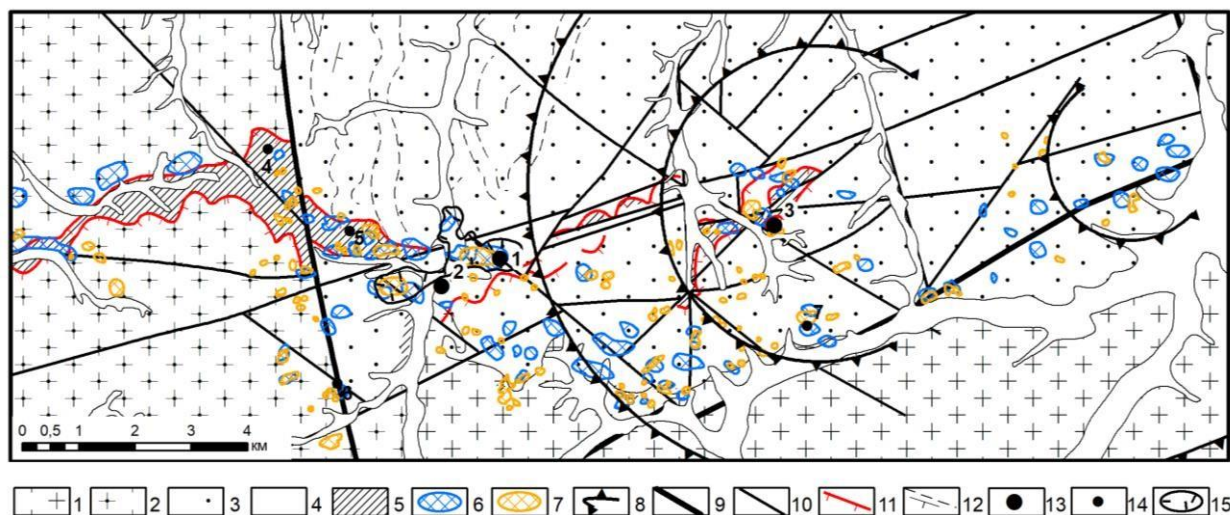


Рис. 2. Структурно-вещественная схема Таборнинского рудного поля по результатам дешифрирования космических снимков: 1 – граниты и гранитоиды ханинского комплекса; 2 – субщелочные граниты чародоканского комплекса; 3 – песчаники оллонокской свиты; 4 – аллювиальные, пролювиальные и флювиогляциальные отложения; 5 – коры выветривания; 6 – участки окварцевания; 7 – участки интенсивной лимонитизации; 8 – кольцевые структуры; 9, 10 – разрывные нарушения: 9 – главные; 10 – прочие; 11 – взбросы и надвиги; 12 – элементы линейности (слоистости ?) в стратифицированных породах и направления их падения; 13, 14 – месторождения и рудопоявления Таборнинского рудного поля: 13 – месторождения (1 – Таборное, 2 – Темное, 3 – Гросс); 14 – рудопоявления (4 – Токкинское, 5 – Рудное, 6 – Высокое, 7 – Южное); 15 – карьер месторождений Таборное и Темное

Fig. 2. Structural and material diagram of the Taborninsky ore field based on the results of interpretation of satellite images: 1 – granites and granite gneisses of the Khaninsky complex; 2 – subalkaline granites of the Charodokan complex; 3 – sandstones of the Ollonok formation; 4 – alluvial, proluvial and fluvioglacial deposits; 5 – weathering crust; 6 – areas of silicification; 7 – areas of intense limonitization; 8 – ring structures; 9, 10 – discontinuous faults: 9 – main; 10 – other; 11 – reverse faults and thrusts; 12 – elements of linearity (layering?) in stratified rocks and direction of their dip; 13, 14 – deposits and ore occurrences of the Taborninsky ore field: 13 – deposits (1 – Tabornoe, 2 – Temnoe, 3 – Gross); 14 – ore occurrences (4 – Tokkinskoe, 5 – Rudnoe, 6 – Vysokoe, 7 – Yuzhnoe); 15 – quarry of the Tabornoe and Temnoe deposits

Силлы и дайки сиенитов алданского комплекса раннемелового возраста уверенно дешифрируются совокупностью структурных и вещественных признаков – пологими и крутыми линеamentами, подчеркнутыми более высокими значениями индекса кремнезема в сравнении с вмещающими породами.

Кольцевые структуры в материалах космических съемок фиксируются по дуго- и кольцеобразным формам рельефа, подчеркнутым контрастными спектрально-текстурными характеристиками ландшафтов. В складчатых поясах и зонах тектономагматической активизации кольцевые структуры указывают на площади формирования слепых интрузивных тел [25, 26]. Дополнительным доказательством наличия слепых интрузивных тел являются дайки и силлы сиенитов, которые обнаруживаются в областях влияния кольцевых структур.

Выделены две системы кольцевых структур диаметром от 3 до 12 км, пространственно тяготеющих к зоне разрывных нарушений северо-восточного простирания (рис. 2).

Известные месторождения в пределах рудного поля размещаются вполне закономерно относи-

тельно выделенных кольцевых структур: месторождение Гросс – в центральной части телескопированной кольцевой структуры, а месторождения Таборное и Темное – во фронтальной.

Разрывные нарушения выделялись по комплексу признаков: нарушению непрерывности дешифрируемых элементов линейности стратифицированных комплексов, смене текстуры растрового изображения по обе стороны разрывного нарушения, смещению русел речной сети первого и второго порядка, прямолинейным полосам растительности для крутых и вертикальных разрывов, линейному характеру речных долин. Зоны взбросо-надвигов отчетливо картируются по дугообразным формам рельефа в совокупности с вышеприведенным признакам.

Совокупность дешифрируемых взбросо-надвигов и разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простираний образуют единый «надвиговый» структурный парагенезис.

Анализ пространственного положения рудного поля и месторождений относительно разрывных

нарушений показывает, что рудное поле в целом контролируется надвиговым структурным парагенезисом северо-восточного простирания, а известные месторождения (Таборное, Темное, Гросс) размещаются в надвиговых структурах в участках сопряжения северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений.

Коры выветривания отчетливо выделяются высокими значениями минеральных индексов Clay и Fillit. Обработка SWIR-диапазона снимка ASTER методом селективных главных компонент [21–23] также позволила подчеркнуть коры выветривания. Они отчетливо проявляются во второй главной компоненте (таблица), что выражается низкими значениями собственных векторов в 6 спектральном диапазоне Aster и более высокими в 5 и 7. Такие значения собственных векторов характерны для глинистых и гидрослюдистых минералов, свойственных в том числе и корам выветривания.

Таблица. Матрица собственных векторов по результатам обработки SWIR-диапазона методом селективных главных компонент

Table. Matrix of eigenvectors based on the results of processing the SWIR range using the method of selective principal components

Каналы Aster Aster bands	Главные компоненты Main components				
	1	2	3	4	5
5	0,53558	-0,29487	-0,78404	0,09935	-0,0403
6	0,56269	-0,56971	-0,59888	0,00614	0,01036
7	0,47493	0,63875	-0,15425	0,58119	0,0698
8	0,35737	0,3826	-0,04425	-0,65974	-0,53731
9	0,20802	0,18465	0,02953	-0,4659	0,83946

Низкие значения мафического индекса и высокие показатели индекса трехвалентного железа, которые указывают на участки окварцевания и развития гидроокислов железа за счет разложения сульфидов, сидерита и анкерита рудоносных метасоматитов, укладываются в восток-северо-восточную зону вдоль южной тектонической границы угуйского грабена. В пределах этой зоны располагаются все известные месторождения и рудопроявления рудного поля.

Сопоставление аномальных значений минеральных индексов с положением литохимических аномалий золота по первичным ореолам рассеяния показало их высокую сходимость, что позволяет использовать эти показатели в качестве критериев выделения потенциально рудоносных площадей ранга рудное поле.

Аллювиальные, флювиогляциальные, пролювиальные отложения плейстоцена-голоцена устанавливаются в речных долинах, у основания склонов, в сухих логах.

Обработка и интерпретация аэрогеофизических полей позволили выявить ряд закономерностей проявления элементов геологического строения и потенциальной рудоносности. Необходимо отметить, что сопоставление результатов дешифрирования и аэрогеофизических полей показало их весьма высокую сходимость, что дало основание использовать данные аэрогеофизических съемок для уточнения геологического строения рудного поля (рис. 1).

Таборнинское рудное поле характеризуется низким, спокойным магнитным полем с весьма низкой дисперсией (рис. 3, а). Его линейные отрицательные аномалии, как правило, подчеркивают зоны разрывных нарушений разного порядка, а положительные, северо-восточного простирания, фиксируют дайки метадолеритов торского комплекса за пределами рудного поля.

В полях распределения естественных радиоактивных элементов также отчетливо проявлены некоторые элементы геологического строения. Так, повышенными значениями поля К закономерно фиксируются коры выветривания (рис. 3, б), слабо повышенными значениями линейного поля Th отмечаются площади месторождений и рудопроявлений рудного поля (рис. 3, в). При этом аномалии калия и тория фиксируют площади распространения гранитоидов ханинского и чародоканского комплексов. Дополнительно предлагается использовать отношение нормированных концентраций KTh/UU (рис. 3, г). По нашему мнению, этот показатель более отчетливо фиксирует потенциально рудоносные коры выветривания, развитые по гумбеитам и березитам: повышенный К, с одной стороны, указывает на развитие кор выветривания, а с другой стороны, фиксирует площади протекания метасоматических процессов. U, в отличие от Th, как известно, подвижен при кислотном выщелачивании и выносится на фланги зон протекания метасоматических процессов (рис. 4, а), а потенциально рудоносные зоны отчетливо выявляются K/U отношением (рис. 4, б).

Выявленные геофизические закономерности можно использовать в качестве критерия рудных полей и рудных зон подобного типа.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование показали, что рудное поле, месторождения и рудопроявления золота находят свое отражение в материалах структурно-вещественного дешифрирования спектрально-вещественного дешифрирования спектральных снимков и в наблюдаемых физических полях. Это позволяет сформулировать структурные, вещественные и геофизические критерии золотого оруденения угуйского типа ранга рудное поле (локальные) и месторождение (детальные).

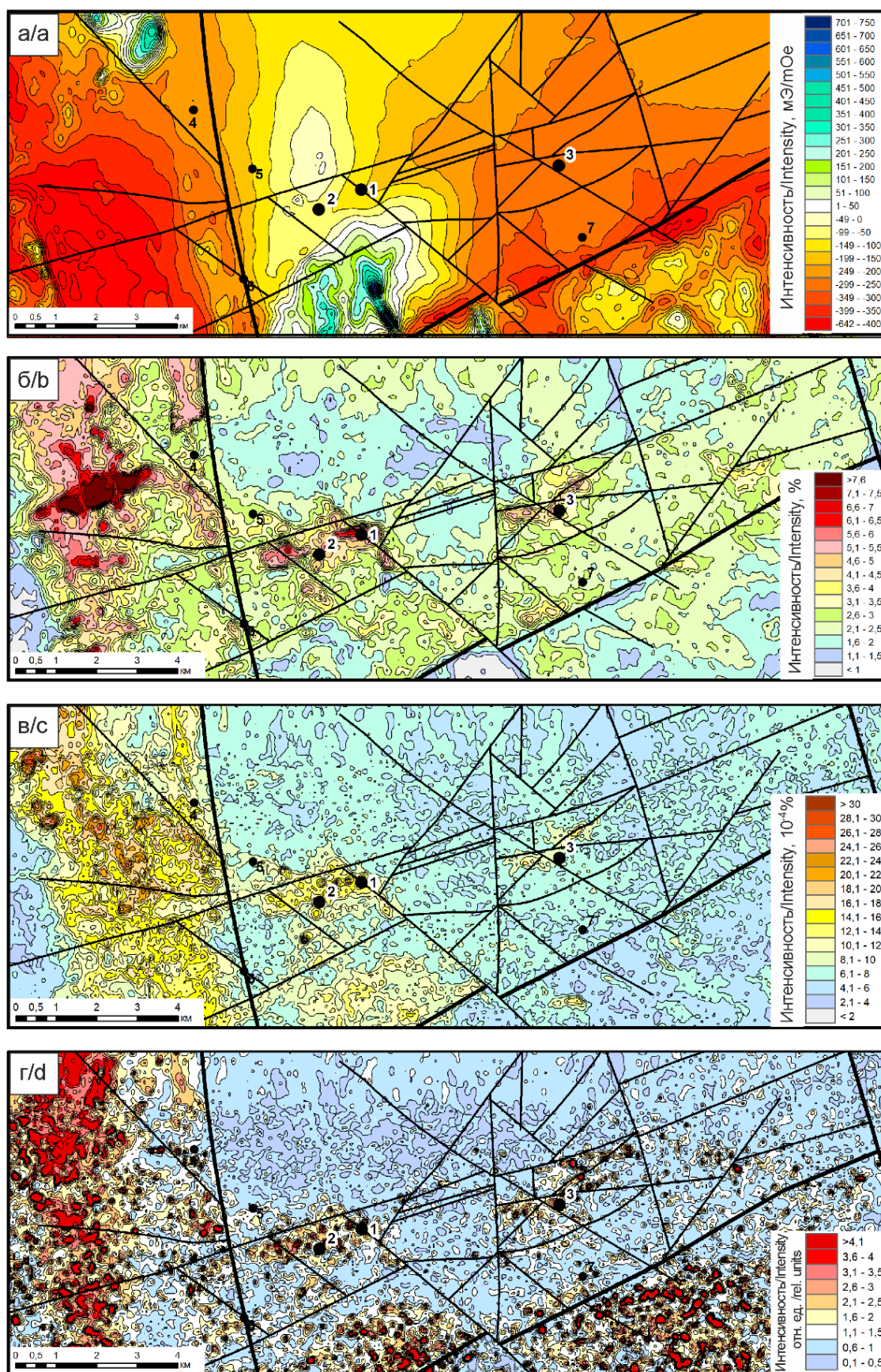


Рис. 3. Таборнинское рудное поле в физических полях: а) магнитное поле; б) поле К; в) поле Th; г) KTh/UU отношение. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 3. Taborninsky ore field in physical fields: a) magnetic field; б) field K; в) field Th; д) KTh/UU ratio. Legend is in Fig. 1

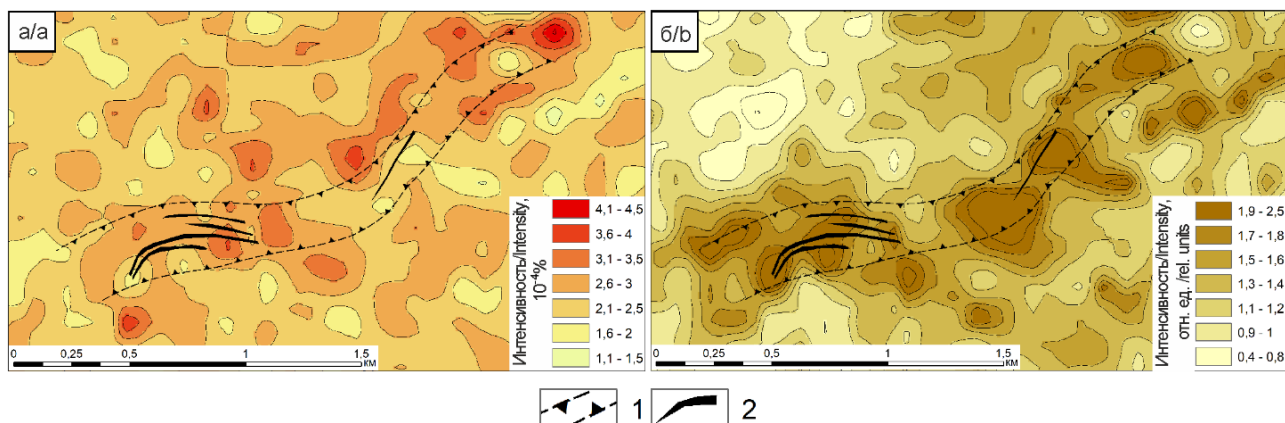


Рис. 4. Рудная зона месторождения Гросс в физических полях: а) поле U ; б) K/U отношение; 1 – рудная зона; 2 – рудные тела

Fig. 4. Ore zone of the Gross deposit in physical fields: а) field U ; б) K/U ratio; 1 – ore zone; 2 – ore bodies

Локальные критерии

- Структурно-вещественные (по результатам дешифрирования спектрозональных снимков): рудные поля размещаются в пределах проявления надвигового структурного парагенезиса в области влияния телескопированных кольцевых структур, которые интерпретируются нами как слепые интрузивные тела. Вещественным критерием протекания рудно-метасоматических процессов могут служить значения минеральных индексов – мафического и трехвалентного железа.
- Геофизические: потенциально рудоносные площади характеризуются слабым, спокойным маг-

нитным полем с низкой дисперсией. В полях естественных радиоактивных элементов отмечаются линейные аномалии калия и тория, сопряженные с надвиговым структурным парагенезисом.

Детальные критерии

Структурным критерием можно считать участки сопряжения отдельных разрывов надвигового структурного парагенезиса, а геофизическими – высокие значения отношения K/U , которые указывают на участки протекания метасоматических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлогения золота Алданской провинции / Н.В. Попов, М.Н. Шапорина, В.А. Амузинский, А.П. Смелов, А.Н. Зедгенизов // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40 – № 5. – С. 716–728.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 – Бодайбо. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. – 612с.
3. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, В.В. Шатов, О.В. Петров, К.А. Кукушкин, Д.С. Козлов, Н.В. Шатова // Металлогения. – 2017. – № 71. – С. 93–111.
4. Геологическое строение и рудоносность Олдонгсинской и Угуйской грабен-синклиналей / К.А. Кукушкин, А.В. Терехов, А.В. Молчанов, Д.С. Козлов, О.Л. Соловьев, Д.Ю. Титов, Е.И. Хорохорина // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 72. – С. 91–102.
5. Геология и рудоносность Угуйской и Олдонгсинской структур Чаро-Олёкминского блока Алданского щита (по материалам ГДП-200) / К.А. Кукушкин, А.В. Терехов, А.В. Молчанов, Д.С. Козлов, О.Л. Соловьев, Д.Ю. Титов, Е.И. Хорохорина // Руды и металлы. – 2018. – № 3. – С. 31–39.
6. Седенко С.В., Седенко Е.Г. Низкотемпературные лимонит-кварц-калийшпатовые метасоматиты – новый тип золотого оруденения западной части Алданского щита // Отечественная геология. – 1994. – № 9. – С. 11–18.
7. Двуреченская С.С., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности пород и руд месторождения Таборное, западная часть Алданского щита // Руды и металлы. – 2005. – № 2. – С. 28–36.
8. Зубков Ю.А., Сагир А.В., Чварова Н.В. «Угуйский» тип большеобъемных золоторудных месторождений, сформированных в линейной коре выветривания (юго-западная Якутия) // Отечественная геология. – 2020. – № 2. – С. 32–44.
9. EarthExplorer // USGS science for a changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 13.11.2023).
10. EO Browser // The European Space Agency. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения 13.11.2023).
11. Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГИИ, 2000. – 316 с.
12. 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. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.

13. 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. – Vol. 99 (1). – P. 159–172. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
14. Gad S., Kusky T. Aster spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt // *Gondwana Research*. – 2007. – Vol. 11. – P. 326–335. DOI: 10.1016/j.gr.2006.02.010.
15. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // *Ore Geology Reviews*. – 2010. – Vol. 38. – P. 59–69. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.007.
16. 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. – P. 99–109. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.014.
17. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Дистанционный прогноз кимберлитового магматизма. – М.: Триумф, 2017. – 312 с.
18. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – Vol. 108. – P. 54–72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
19. Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А. Прогнозно-поисковая модель эпitherмальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 84–92.
20. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud – Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran / L. Noori, A. Pour, G. Askari, N. Taghipour, B. Pradhan, C. Lee, M. Honarmand // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11 (5):495. DOI: 10.3390/rs11050495.
21. New insights into the Pulang porphyry copper deposit in Southwest China: indication of alteration minerals detected using ASTER and WorldView-3 Data / Q. Chen, Z. Zhao, J. Zhou, M. Zeng, J. Xia, T. Tao Sun, X. Zhao // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13:2798. DOI: 10.3390/rs11050495.
22. ASTER and GF-5 satellite data for mapping hydrothermal alteration minerals in the Longtoushan Pb-Zn deposit, SW China / Q. Chen, Z. Zhao, J. Zhou, R. Zhu, J. Xia, T. Sun, X. Zhao, J. Chao // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14:1253. DOI: 10.3390/rs14051253.
23. Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С., Гаврилов Р.Ю. Структурные, геофизические и геохимические критерии эпitherмального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 60–72.
24. Казанский В.И. Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46. – № 3. – С. 195–211.
25. Космоструктурная модель района Калгутинского редкометалльного месторождения (Горный Алтай) / А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, И.Ю. Анникова и др. // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 45–53.
26. Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г. Космоструктурные позиции золоторудных объектов Заангарской части Енисейского кряжа // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 38–47.

Информация об авторах

Александр Васильевич Ярчук, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; участковый геолог службы минеральных ресурсов ООО «НерюнгриМеталлик», Россия, 678976, г. Нерюнгри (Хани), ул. 70 лет Октября, 3. avy29@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7226-5321>

Юрий Сергеевич Ананьев, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Поступила в редакцию: 21.11.2023

Поступила после рецензирования: 06.03.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Popov N.V., Shaporina M.N., Amuzinsky V.A., Smelov A.P., Zedgenizov A.N. Metallogeny of gold in the Aldan region. *Geology and Geophysics*, 1999, vol. 40, no. 5, pp. 716–728. (In Russ.)
2. *State geological map of the Russian Federation, scale 1: 1,000,000 (third generation). AldanoZabaikalskaya series. Sheet O-50 – Bodaibo. Explanatory note*. St Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2010. 612 p. (In Russ.)
3. Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kukushkin K.A., Kozlov D.S., Shatova N.V. Gold mining areas and nodes of the Aldan-Stanovoy metallogenic province. *Metallogeniya*, 2017, no. 71, pp. 93–111. (In Russ.)
4. Kukushkin K.A., Terekhov A.V., Molchanov A.V., Kozlov D.S., Solovyov O.L., Titov D.Yu., Khorokhorina E.I. Geological structure and ore content of Oldongsinskaya and Uguiskaya graben-synclines. *Regional geology and metallogeny*, 2017, no. 72, pp. 91–102. (In Russ.)
5. Kukushkin K.A., Terekhov A.V., Molchanov A.V., Kozlov D.S., Solovyov O.L., Titov D.Yu., Khorokhorina E.I. Geology and ore content of the Ugy and Oldongsin structures Charo-Olyokma block of the Aldan shield (based on materials from GDP-200). *Ores and metals*, 2018, no. 3, pp. 31–39. (In Russ.)

6. Sedenko S.V., Sedenko E.G. Low-temperature limonite-quartz-K-feldspar metasomatites - a new type of gold mineralization in the western part of the Aldan shield. *Domestic Geology*, 1994, no. 9, pp. 11–18. (In Russ.)
7. Dvurechenskaya S.S., Kryazhev S.G. Mineralogical and geochemical features of rocks and ores of the Tabornoe deposit, western part of the Aldan shield. *Ores and Metals*, 2005, no. 2, pp. 28–36. (In Russ.)
8. Zubkov Yu.A., Sagir A.V., Chvarova N.V. “Uguysky” type of large-volume gold ore deposits formed in the linear weathering crust (Southwestern Yakutia). *Domestic Geology*, 2020, no. 2, pp. 32–44. (In Russ.)
9. EarthExplorer. *USGS science for a changing world*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 13 November 2023).
10. EO Browser. *The European Space Agency*. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (accessed 13 November 2023).
11. *Aerospace methods of geological research*. Ed. by A.V. Pertsova. St. Petersburg, St. Petersburg cart factory VSEGII Publ. house, 2000. 316 p. (In Russ.)
12. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radianceat-sensor» data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.
13. Hewson R.D., Cudahy T.J., Mizuhiko S., Ueda K., Mauger A.J. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill – Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99 (1), pp. 159–172. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
14. Gad S., Kusky T. Aster spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt. *Gondwana Research*, 2007, vol. 11, pp. 326–335. DOI: 10.1016/j.gr.2006.02.010.
15. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 2010, vol. 38, pp. 59–69. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.007.
16. 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. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.014.
17. Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Zuev V.M. *Remote forecast of kimberlite magmatism*. Moscow, Triumph Publ., 2017. 312 p. (In Russ.)
18. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 108, pp. 54–72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
19. 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 Russ.)
20. Noori L., Pour A., Askari G., Taghipour N., Pradhan B., Lee C., Honarmand M. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud – Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (5):495. DOI: 10.3390/rs11050495.
21. Chen Q., Zhao Z., Zhou J., Zeng M., Xia J., Tao Sun T., Zhao X. New insights into the Pulang porphyry copper deposit in Southwest China: indication of alteration minerals detected using ASTER and WorldView-3 Data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13:2798. DOI: 10.3390/rs11050495.
22. Chen Q., Zhao Z., Zhou J., Zhu R., Xia J., Sun T., Zhao X., Chao J. ASTER and GF-5 Satellite data for mapping hydrothermal alteration minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14:1253. DOI: 10.3390/rs14051253.
23. Lesnyak D.V., Ananyev Yu.S., Gavrilov R.Yu. Structural, geophysical and geochemical criteria for epithermal acid-sulfate gold mineralization using the example of the Svetloe ore field (Khabarovsk Territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 60–72. (In Russ.)
24. Kazansky V.I. Unique Central Aldan gold-uranium ore region (Russia). *Geology of ore deposits*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 195–211. (In Russ.)
25. Potseluev A.A., Ananyev Yu.S., Annikova I.Yu. Cosmostructural model of the Kalgutinsky rare metal deposit area (Altai Mountains). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 45–53. (In Russ.)
26. Ananyev Yu.S., Potseluev A.A., Zhitkov V.G. Cosmostructural positions of gold ore objects of the Trans-Angara part of the Yenisei Ridge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 38–47. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander V. Yarchuk, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Local Geologist, LLC «Neryungri-Metallik», 3, 70 let Oktyabrya street, Neryungri (Khani), 678976, Russian Federation; avy29@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7226-5321>

Yury S. Ananyev, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Received: 21.11.2023

Revised: 06.03.2025

Accepted: 19.03.2025