

УДК. 553.078; 551.43(551.24)
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-104-115

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДИК СПЕКТРАЛЬНОГО И СТРУКТУРНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ И ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ АУМИНЗАТАУ-БЕЛЬТАУСКОГО РУДНОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН)

**Акрам Байрамович Гоипов¹, Шокир Исломович Ахмадов²,
Александр Вениаминович Тевелев³, Зайниддинхон Мухторхонович Мусахонов⁴,
Рафис Ильдарович Мирсаяпов⁵**

¹ Институт минеральных ресурсов, Ташкент, Узбекистан; akram.goipov7@gmail.com

² Институт минеральных ресурсов, Ташкент, Узбекистан; shokirbekaxmadov@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ООО НТПП «Геопоиск», Челябинск, Россия; atevelev@yandex.ru

⁴ Институт минеральных ресурсов, Ташкент, Узбекистан; zmmusaxonov@mail.ru

⁵ Институт минеральных ресурсов, Ташкент, Узбекистан; rafismirsayapovsd@gmail.com

Аннотация. За последние тридцать лет развитие космических технологий и получение цифровой информации показало, что применение материалов спутникового зондирования земной поверхности в геологии является достоверным и эффективным методом. Особое значение при проведении геолого-поисковых и прогнозных работ на территории Ауминзату-Бельтауского рудного района Республики Узбекистан имеет автоматизированный метод обработки космических снимков различных диапазонов для определения оптимальных мест локализации золотого оруденения.

Ключевые слова: Landsat-7-8, Aster, Sentinel-2A, золоторудные месторождения, рудные тела, линеаментный анализ, структуры, разломы

Для цитирования: Гоипов А.Б., Ахмадов Ш.И., Тевелев А.В., Мусахонов З.М., Мирсаяпов Р.И. Применение инновационных методик спектрального и структурного дешифрирования для решения геологических задач и поиска месторождений (на примере Ауминзату-Бельтауского рудного района Республики Узбекистан) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 104–115.

APPLICATION OF INNOVATIVE METHODS OF SPECTRAL AND STRUCTURAL INTERPRETATION TO SOLVING GEOLOGICAL PROBLEMS AND SEARCHING FOR DEPOSITS (BASED ON THE EXAMPLE OF AUMINZATAU-BELTAU ORE DISTRICT OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN)

**Akram B. Goipov¹, Shokir I. Akhmadov², Alexander V. Tevelev³,
Zainiddinkhon M. Musakhonov⁴, Rafis I. Mirsayapov⁵**

¹ Institute of Mineral Resources, Tashkent, Uzbekistan; akram.goipov7@gmail.com

² Institute of Mineral Resources, Tashkent, Uzbekistan; shokirbekaxmadov@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; “Geopoisk” Ltd., Chelyabinsk, Russia; atevelev@yandex.ru

⁴ Institute of Mineral Resources, Tashkent, Uzbekistan; zmmusaxonov@mail.ru

⁵ Institute of Mineral Resources, Tashkent, Uzbekistan; rafismirsayapovsd@gmail.com

Abstract. Over the past thirty years, the development of space technologies and the acquisition of digital information have shown that the use of satellite sensing materials in geology is a reliable and effective method. A special role in carrying out geological prospecting and forecasting work on the territory of the Auminzatau-Beltau ore region of the Republic of Uzbekistan by the automated method of processing satellite images of various ranges is important for identifying the optimal location of gold mineralization. Target. Identification of a zone of hydrothermal alteration and a favorable position of gold mineralization.

Keywords: Landsat-7-8, Aster, Sentinel-2A, gold deposits, ore, bodies Lineament analysis, structures, fault

For citation: Goipov A.B., Akhmadov Sh.I., Tevelev A.V., Musakhonov Z.M., Mirsayapov R.I. Application of innovative methods of spectral and structural interpretation to solving geological problems and searching for deposits (based on the example of Auminzatau-Beltau ore district of the Republic of Uzbekistan). *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 104–115. (In Russ.).

Введение. В настоящее время Центральные Кызылкумы, благодаря выявленным крупнейшим золоторудным месторождениям, в первую очередь Мурунтау, Кокпатас и Даугызтау, являются ведущим рудным регионом Республики Узбекистан по запасам и добыче золота. С 1967 г. был введен в эксплуатацию уникальный Мурунтауский золотодобывающий комплекс на базе месторождения Мурунтау, промышленная добыча началась 21 июля 1969 г.

Территорией исследования является Ауминзатау-Бельтауский рудный район, расположенный в пределах Кызылкум-Нуратинского сегмента Южного Тян-Шаня. В основании палеозойского разреза залегают отложения, представленные снизу вверх вулканогенно-терригенно-кремнистой (ауминзинская и таскаганская свиты) и флишоидной (бесапанская свита) формациями раннепалеозойского возраста; выше с незначительным перерывом и угловым несогласием залегают отложения карбонатной формации нижнего-среднего девона.

Характерной особенностью Ауминзатау-Бельтауского района является проявление как древних доорогенных, продольных, так и поперечных наложенных позднеорогенных структур. В соответствии с этим позиция района в структуре Кызылкумской золотоносной провинции определяется пересечением древних по заложению и достаточно протяженных складчато-разрывных структур Ауминза Бельтауского антиклиниория субширотной ориентировки с Ясвай-Даугызтауской поперечной наложенной зоной дислокации близмеридионального простирания. Подобная приуроченность рудного района к участку пересечения крупных региональных структур предопределяет позицию и особенности внутреннего строения расположенных здесь рудных полей.

В последнее время во многих регионах мира наблюдается активное использование дистанционных методов при проведении геологоразведочных работ. Landsat-8 и Sentinel-2 являются эффективными и точными инструментами картирования для поиска полезных ископаемых [Adiri, 2016; Amri et al., 2017; Mwaniki et al., 2015].

Дистанционное зондирование дает возможность оптимизировать стратегию и подходы к разведке, выявить новые перспективы и снизить затраты и время на разведку месторождений полезных ископаемых [Ciampalini et al., 2012; Pour, Hashim, 2015]. Каналы VNIR и SWIR космических изображений серии Landsat и Aster [Adiri et al., 2016; Mars, Rowan, 2006], с применением методов обработки изображений [Amri et al., 2017; Ciampalini et al., 2012; Kolawole et al., 2023], таких как композиция ложного цвета (FCC), соотношение полос (BR), анализ главных компонентов (PCA) [Loughlin, 1991], минимальная доля шума (MNF) и картографирование спектрального угла (SAM), широко используются для картирования литологически измененных пород и геологических неоднородностей [Adiri et al.,

2016; El Atillah et al., 2019; Гоипов и др., 2020; Goipov et al., 2023; Mwaniki et al., 2015; Pour, Hashim, 2015], выделения линейных структур.

Территория Ауминзатау-Бельтауского рудного района является одной из наиболее перспективных минерально-сырьевых баз Центральных Кызылкумов на золото и серебро. На территории исследования были открыты промышленные золоторудные объекты, относящиеся к золото-сульфидным (месторождение Даугызтау, Аджибугут и Сарыбатыр, Асаукак и др. участки), кварц-золото-сульфидным (месторождение Амантайтау), золото-серебро-кварц-полисульфидным (месторождение Высоковольтное) формациям.

Даугызтауское золоторудное месторождение было открыто в 1969 г., добыча руды ведется с 5 марта 2002 г., а на месторождении Центральный Амантайтау эксплуатация начата в 2019 г. Также ведется добыча окисленных и сульфидных руд на месторождениях Асаукак, Сарыбатыр и 13 мелких месторождений. Продолжается оценка множества мелких и средних месторождений золота и серебра на участках Восточное, Северный Даугызтау, Южный, Курметинский, Степногорский и др.

После открытия уникального месторождения золота Мурунтау в 1960 г., в Кызылкумском регионе резко увеличились поисково-оценочные геологоразведочные работы на золото, серебро и другие полезные ископаемые. В 1966–1970 гг. структурно-литологической партией ревизионно-тематической экспедиции в южной части Кызылкумов открыто серебренное месторождение Высоковольтное, Каракатинское рудопроявление золота, а также большое количество точек золоторудной минерализации.

На выявленных месторождениях в настоящее время ведутся горные работы по добыче золота и действуют гидрометаллургический золотоизвлекательный завод.

В целях наращивания сырьевой базы ГМЗ-3 Навоийского горно-металлургического комбината необходимо выявить перспективные золоторудные объекты для постановки детальных поисковых работ. В данном случае применение опережающих космогеологических исследований способствуют сокращению финансовых затрат, времени проведения геолого-поисковых исследований, которые направлены на оценку рудного потенциала территории исследования, т. е. на золото.

Для решения проблемы прогноза, поиска и оценки потенциала территории гор Ауминзатау на золото была проведена обработка материалов дистанционного зондирования Landsat-7-8, Aster и Sentinel-2A (рис. 1).

Методы исследования. Первичная подготовка материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при геологических исследованиях проводятся визуальными и автоматизированными методами интерпретации. При выполнении задач в данном исследовании использованы мультиспектральные

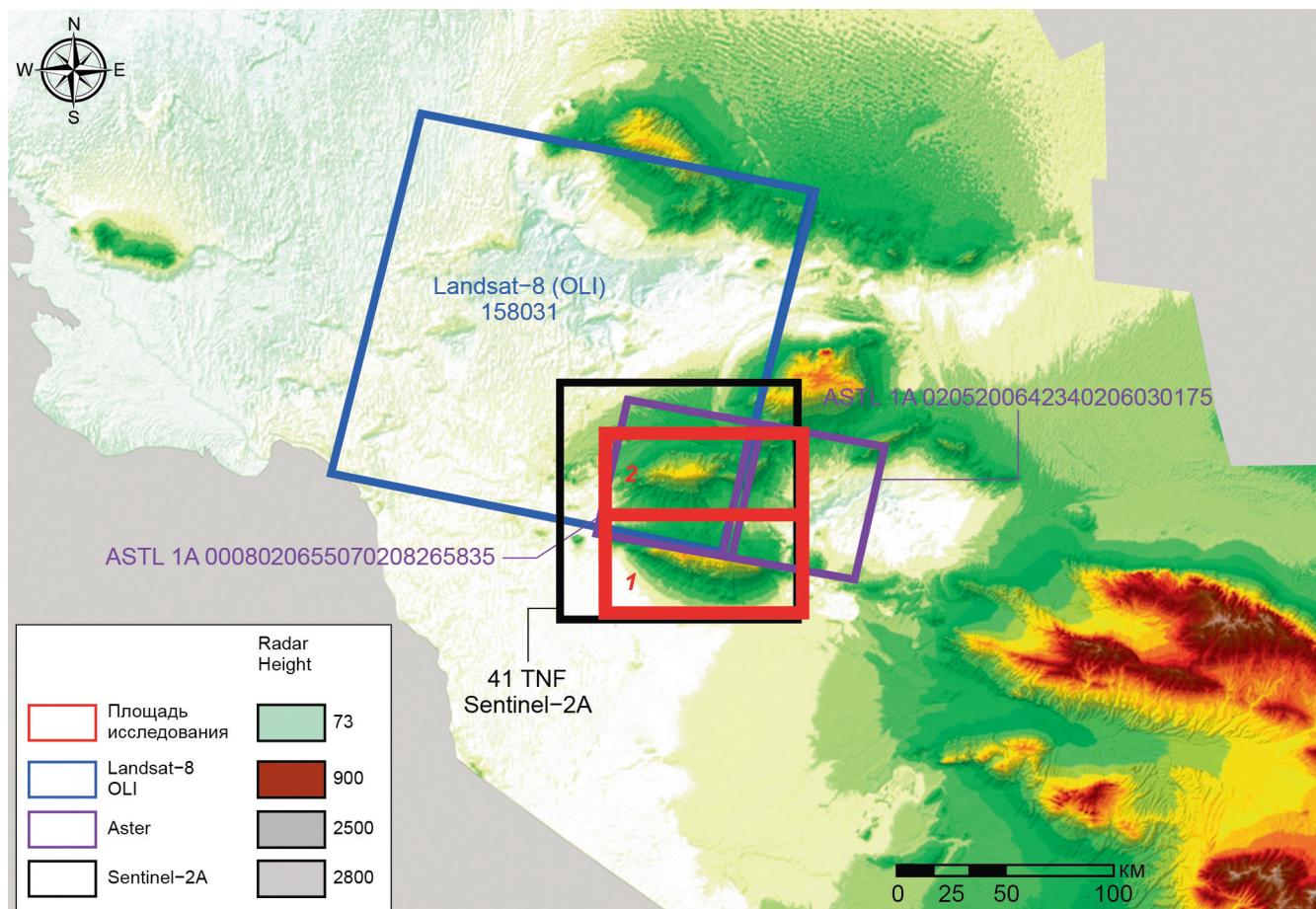


Рис. 1. Обзорная карта района работ на основе цифровой модели рельефа с захватом космической съемки серии Landsat, Aster, Sentinel-2A территории гор Ауминзатау и Бельтау

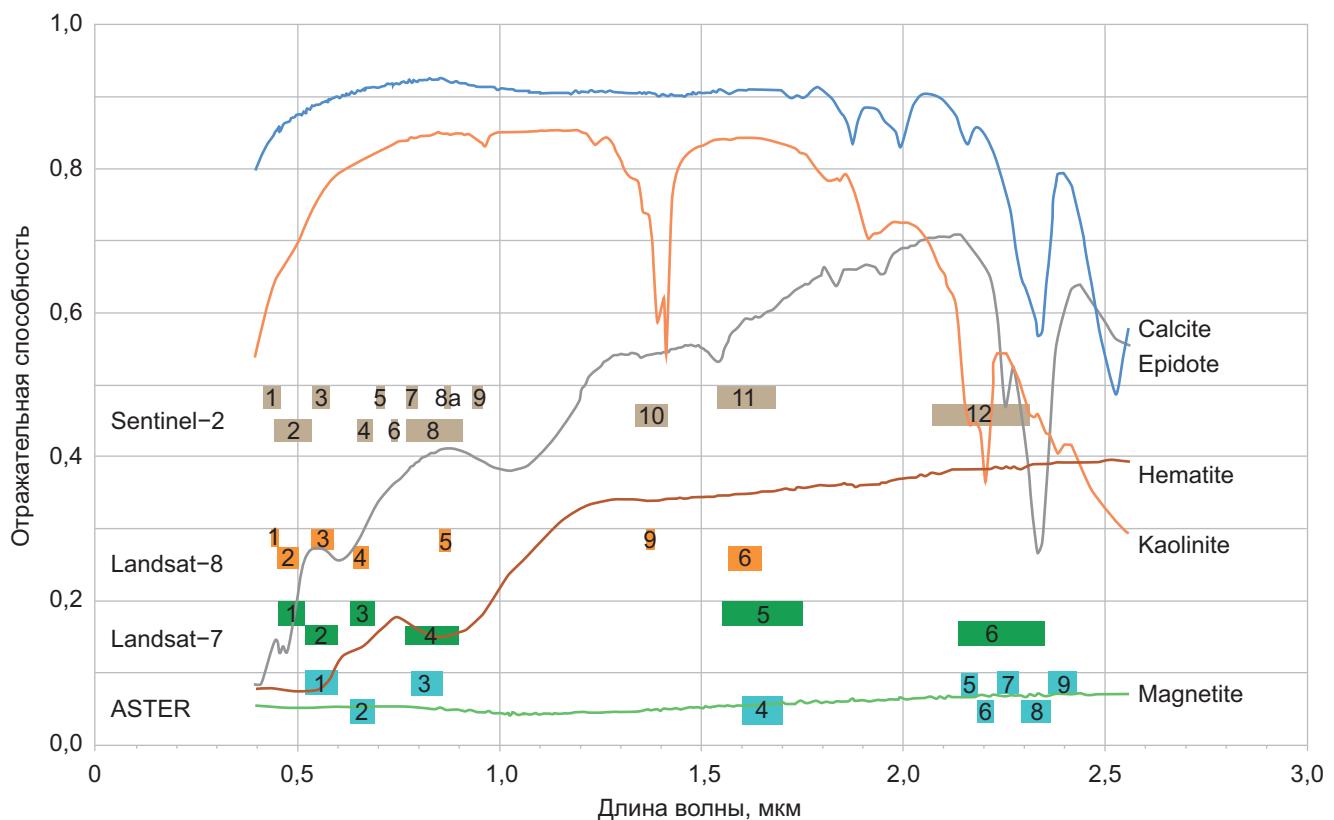


Рис. 2. Спектральное разрешение используемых космических снимков и спектральная сигнатура некоторых минералов

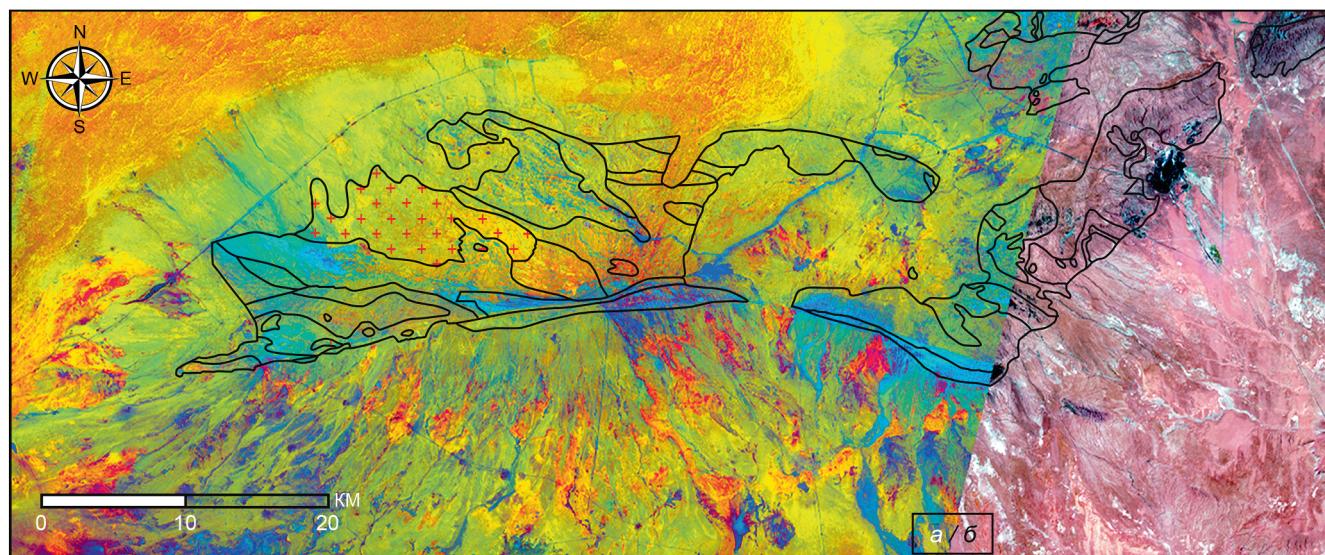


Рис. 3. Результаты обработки космических снимков Landsat-8 с наложенными границами палеозойских обнажений: *а* — метод соотношения каналов $R=b6/b5$, $G=b7/b6$, $B=b4/b7$; *б* — композитное изображение

космические снимки Landsat-8, Aster и Sentinel, ниже приведены их спектральные разрешения, сравнения каналов при регистрации спектральных кривых нескольких минералов в определенном диапазоне (рис. 2).

Для определения зоны минерализации через спутниковый спектральный метод используется ближний инфракрасный диапазон [Goipov et al., 2023] в интервале 2,0–2,5 мкм (рис. 2). Именно данный диапазон регистрирует зоны вторичных изменений, таких как зоны метасоматоза и сульфидизации, аргиллизации, пропилитизации и др. [Mars, Rowan, 2006], которые могут быть связаны с зонами оруденения.

При выполнении исследований использованы различные способы и алгоритмы методов обработки материалов (ДЗЗ) с использованием разновременных космических снимков Landsat-7, 8 Aster и Sentinel-2A.

Метод минеральных составляющих основан на цветной композиции нескольких индексов: индекс глинистых пород, индекс гидроксида железа. На основе использования соотношения и комбинации разных мультиспектральных каналов создана новая комбинация, которая дала возможность картирования литологических изменений (рис. 3).

Соотношение спектральных каналов $R=b6/b5$, $G=b7/b6$, $B=b4/b7$ позволило изучить литологические неоднородности региона, выявить ландшафтные типы почв, а также литологически разнородные породы, отображаемые очень большим числом цветов и оттенков. Сравнение результатов обработки космических снимков методом соотношения каналов и композитного изображения показало, что метод соотношения каналов более информативен, что позволяет получить более достоверные данные при извлечении геологической информации.

Если обратим внимание на границы выходов палеозойских отложений по геологической карте А.К. Бухарина, масштаба 1:200 000 [Бухарин и др., 1985], можно заметить как соответствие, так и несоответствие полигонов определенному цвету. Это обусловлено составом и возрастом геологических образований (свит), так как каждая свита представлена разнотипными породами.

На основе спектральной обработки материалов ДЗЗ с созданием соотношения каналов космических снимков и получения изображения цветового искусственного разнообразия появляется возможность картографировать литологические и минералогические разности пород и их вторичные изменения, а также получить данные о минералогических особенностях исследуемой территории.

Пространственное разрешение мультиспектрального диапазона космических снимков Sentinel-2 составляет 20 м, что соответствует высокому разрешению среди общедоступных мультиспектральных космических снимков. Исходя из этого, для картирования литологических неоднородностей и выявления их границ (контактов) использован снимок Sentinel-2A (рис. 4).

Основные золоторудные месторождения Центрально-Кызылкумского региона относятся к гидротермальному генетическому типу [Атлас..., 2010] и в связи с этим применение методов обработки космических снимков разными методами и индексами становится целесообразным (рис. 5).

Возможности каналов Landsat-7 для обнаружения гидроксида железа и гидроксидных минералов с использованием изображения с соотношением 3/1 и картирования гидроксилсодержащих минералов и карбонатов с использованием космических изображений с соотношением каналов 5/7 соответственно и картирование гидротермальных изменений [Гоипов и др., 2023].

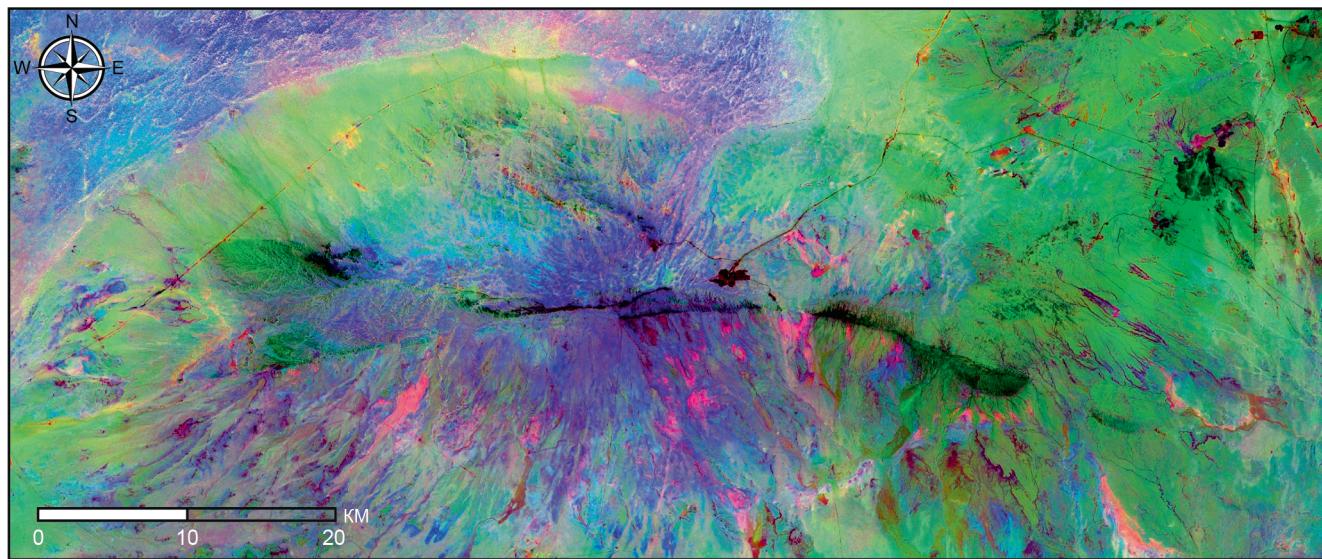


Рис. 4. Комбинация соотношения каналов Sentinel-2A: R = b4/b3, G = b12/11, B = b11/b6 (для космических снимков Landsat-8 R = 4/3; G = 6/2; B = 7/4)

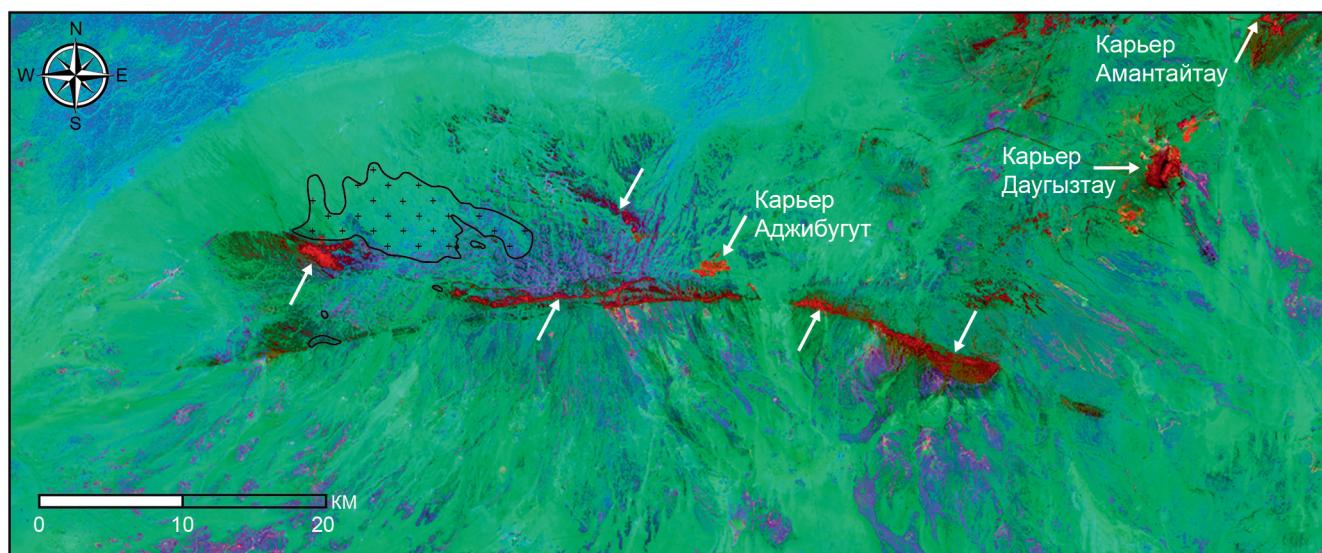


Рис. 5. Результат обработки методом гидротермальные составляющие (Hydrothermal Composition), белыми стрелками указаны зоны гидротермальных изменений (красный цвет) с более высокой вероятностью

пов и др., 2020] описаны в зарубежных статьях [Amri et al., 2017; Ciampalini et al., 2013; Gad, Kusky, 2006].

По результатам обработки методом гидротермальных составляющих выявлены зоны гидротермальных изменений (красным цветом) и эти зоны соответствуют контурам карьеров Амантайтау, Даугызтау и Аджибугут, которые являются отрабатываемыми крупными золоторудными объектами.

Космический снимок Aster является более эффективным для выявления зон минерализации, благодаря захвату широкого спектра мультиспектрального диапазона (рис. 6). На рис. 6 синим цветом отображаются карбонатные отложения, в том числе с примесью глин.

Результаты. В геологическом строении гор Ауминзатау принимает участие интенсивно-дислоцированный и метаморфизованный комплекс метавулканогенных, метавулканогенно-осадочных и терригенно-осадочных пород, слагающих фундамент. По обрамлению поднятия развит неметаморфизованный комплекс пород мезозойско-кайнозойского платформенного чехла [Бухарин и др., 1985; Цой и др., 2015; Пирназаров, Колоскова, 2003]. Большинство геологов, изучавших район Ауминзатау, признают двухчленное стратиграфическое деление метаморфического комплекса фундамента: на тасказганскую и бесапанскую свиты [Рудные..., 2001].

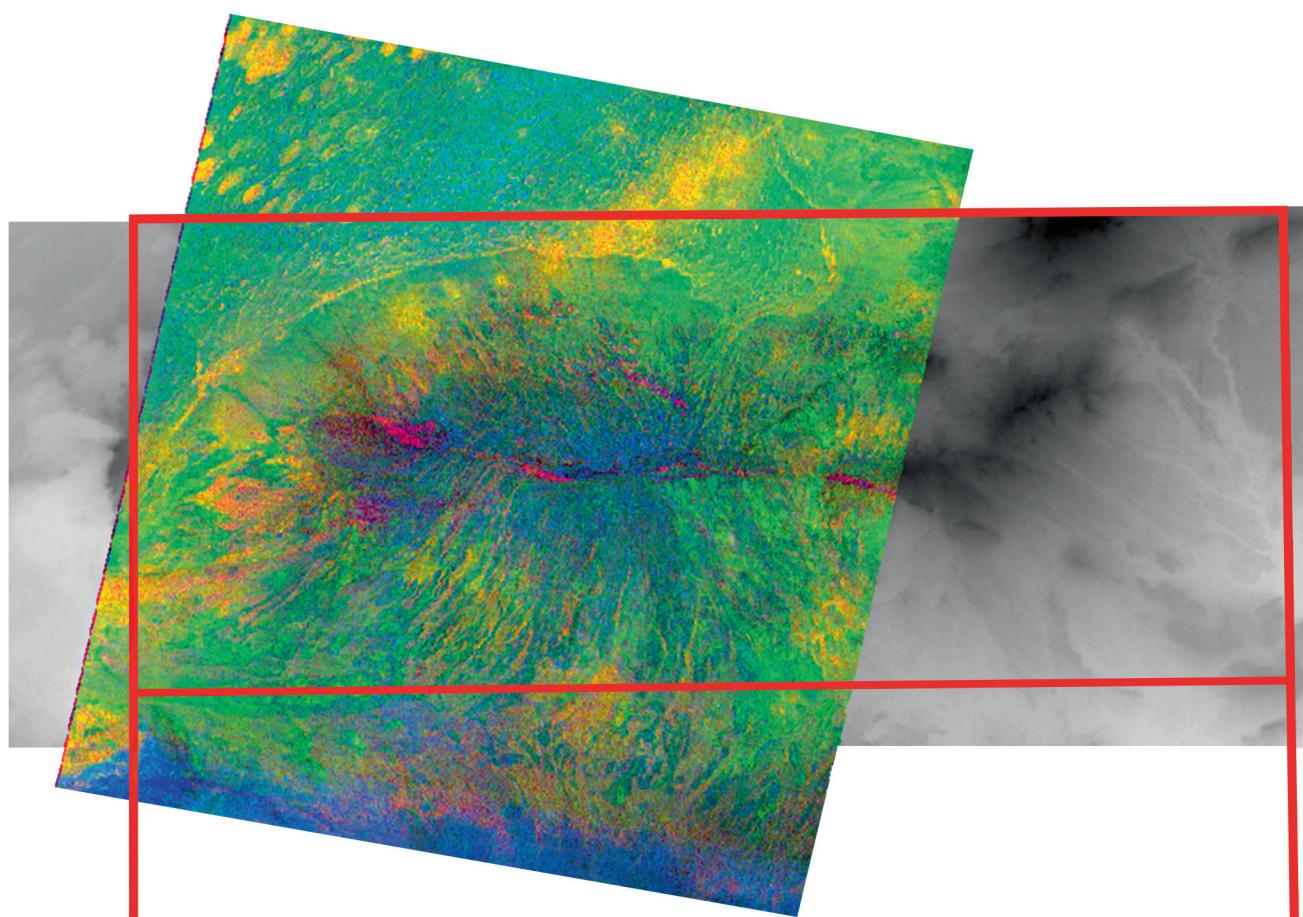


Рис. 6. Результат обработки космического снимка Aster, соотношения каналов: $R = b13/b12$ (R — кварц), $G = (band\ 4 + band\ 7) / (band\ 5 + b6)$ (G — глина), $B = b6/b8$ (B — карбонатные отложения)

Территория гор Ауминзатау специализируется на золото-урановое оруденение, занимающие западную часть Ауминзатау-Бельтауского рудного района. На территории гор Ауминзатау выявлено и разведано три уран-ванадиевых месторождений: Рудное, Косчека и Джантуар. Кроме того, выявлены 15 рудопроявлений и 22 проявления минерализации. Золоторудная минерализация развита по всему разрезу домезозойского комплекса пород от таскаганской до бесапанской свиты включительно.

Выявлено и предварительно оценено месторождение Песчаное и многочисленные рудопроявления, локализованные в Коспактауской золотоносной зоне, объединенные в Коспактауское рудное поле. На юго-восточном продолжении зоны, под мало-мощным чехлом мезозойских отложений в Акмамбетской впадине выявлено месторождение золота Аджибурут. Наличие золоторудной минерализации в юго-западной и юго-восточной частях гор Ауминзатау позволило выделить перспективные площади в рангах рудных полей (Угловое, Фазилбекское).

По территории исследования установлено, что сульфиды и карбонаты замещены гидроокислами железа и частично выщелочены. Содержание гидроокислов железа достигает 5,2%. Представлены они гетитом, гидрогетитом, ярозитом, скородитом,

питтицитом, псиломеланом. Очень характерны для зоны окисления гидрослюды, каолинит. Для картирования минералов каолинизации разработан метод индекса каолинита [Mars, Rowan, 2006].

Установлена причастность седиментогеных отложений к формированию месторождений Центральных Кызылкумов, с преобладанием соотношения альбитизации и карбонатизации, характерного для продуктов пропилитизации туфогенных пород [Проценко, 2012]. Примером может служить Амантайтауский подтип с рудными зонами и колчеданными залежами в углеродисто-терригенных породах верхнебесапанской подсвиты. Рудные тела имеют вид залежей, линз и секущих минерализованных зон с прожилково-вкрапленной минерализацией. Рудовмещающие породы — углеродсодержащие кварцево-слюдистые сланцы, полевошпат-кварцевые песчаники, алевролиты, подверженные процессам кварц-полевошпатового метасоматоза, пропилитизации и березитизации. Все эти вторичные изменения служат поисковым признаком дистанционных методов исследований.

Месторождения кор выветривания с тонким остаточным и новообразованным перемещенным золотом наиболее вероятны в Центрально-Кызылкумском районе, где благоприятно сочетаются

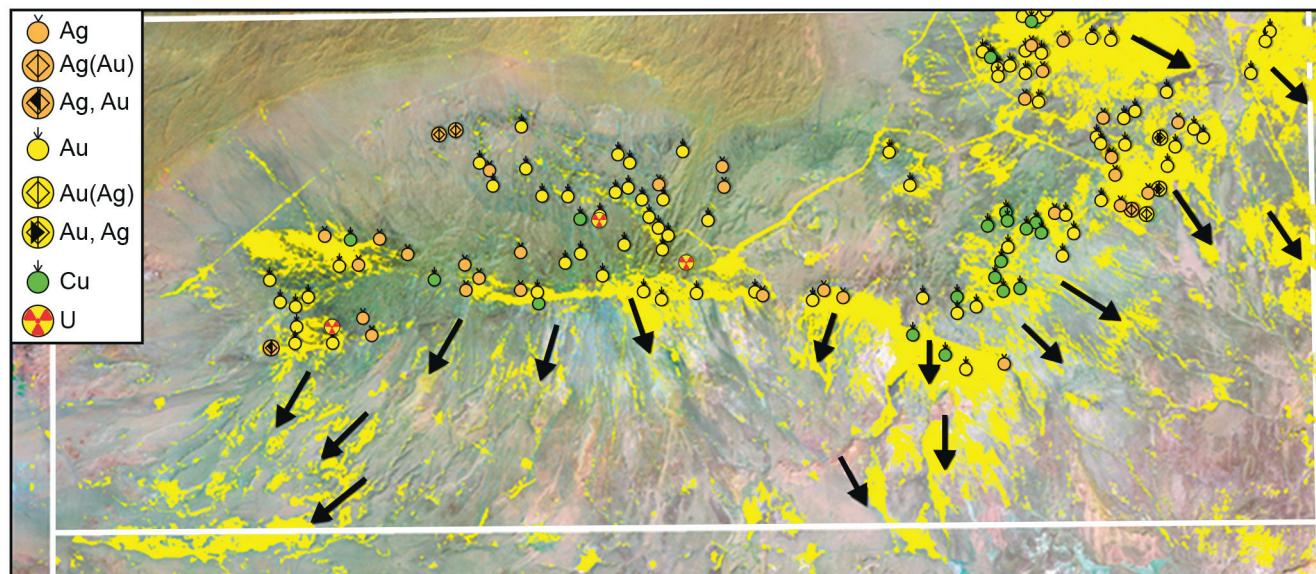


Рис. 7. Результат обработки методом индекса каолинита (Landsat-8/OLI), стрелками указано распространение вторичных ореолов выветривания

условия, определяющие их образование: донорные источники золота, выраженные многочисленными рудными полями и рассеянной золоторудной минерализацией; коры выветривания гидрослюдисто-каолинитового профиля, часто погребенные, и зоны окисления сульфидной минерализации; артезианские бассейны и другие условия формирования геохимических барьеров и т. д. [Рудные..., 2001].

Примененными минеральными индексами по территории гор Ауминзатау откартированы зоны каолинитизации, которые могут быть связаны с золоторудным оруднением (рис. 7).

Установленная гидрослюдисто-каолинитовая зона сложена интенсивно измененными выветрелыми гранитами, которые превращены в смешанную глинисто-дресевянную массу светло-серого, беловато-коричневого пестрого цвета с сохранением структуры материнской породы. Полевой шпат почти полностью замещен тонкочешуйчатым ожелезненным каолинитом, биотит превращен в бесформенную массу тонкочешуйчатого гидрослюдистого агрегата с веерообразными выделениями каолинита, оконтуренный гидроокислами железа.

Исследования показывают, что зоны каолинитизации приурочены как к коренным, так и к дезинтегрированным породам. Мощность гидрослюдисто-каолинитовой зоны коры выветривания по гранитоидам составляет от 2 до 7 м.

Каолинитовая зона отмечается в Захкудукской площади. Она сложена мягкой, рыхлой породой белой, буроватой или пестрой окраски. В породе полевые шпаты и, частично темноцветные минералы полностью превращены в каолинит, зерна кварца сильно корродированы и иногда покрыты пленками гидроокислов железа. В рассматриваемой каолинитовой зоне, снизу вверх содержание као-

линита постепенно увеличивается и уменьшается количество гидрослюды. Для зоны характерны две разновидности каолинита — крупно- и мелкочешуйчатый. Крупночешуйчатый агрегат развивается по гидрослюдам, а мелкочешуйчатый — по плагиоклазу и калиевому полевому шпату.

Видимая мощность гидрослюдисто-каолинитовой зоны колеблется от 12 до 15 м. Каолинитовая зона коры выветривания, развитой по песчано-сланцевым породам бесапанской свиты, обнажается практически на всем протяжении вдоль контакта с отложениями нижнего мела. Породы, слагающие зону, сохраняют текстурные особенности исходного субстрата и представлены сильно выветрелыми, мягкими, рыхлыми образованиями с бурыми пятнами ожелезнения.

С течением времени в результате изменения геохимических условий в вещественном составе элювия происходили некоторые изменения. Это прежде всего выразилось в появлении нехарактерных для коры выветривания эпигенетических минералов, представленных кальцитом, баритом, пиритом, гипсом и другими.

Все процессы, способствующие преобразованию изучаемых пород, проявлялись в определенной последовательности и были взаимосвязаны между собой, что привело к появлению в элювиальном профиле зональности и сосредоточению основной массы каолинитового материала в верхних зонах коры выветривания и продуктах ее переотложения.

Остаточные и переотложенные каолинизированные образования на рассматриваемой территории большей частью перекрыты осадочным чехлом. В пределах изучаемых площадей осадочный чехол, перекрывающий кору выветривания, сложен слабодислоцированными отложениями нижнего и верхнего мела.

Для определения зон разрывных нарушений применены методы фильтрации с применением операторов Kirsha, Собеля, Index-IV. Результаты фильтрации послужили для определения линий рельефа, которые могут быть связаны с рудоконтролирующими структурами территории исследования.

В горах Ауминзатау золотопродуктивная минерализация развита преимущественно в полях метасоматитов кварц-полевошпат-биотитового, кварц-полевошпатового и лиственит-березитового составов. Первые два типа метасоматитов развиты в биотит-хлоритовой и биотит-актинолитовой субфациях прогрессивного метаморфизма, последний в основном в хлорит-серицитовой субфации.

Характерной особенностью района является совместное проявление как древних, доорогенных, продольных, так и поперечных наложенных позднеорогенных структур. В соответствии с этим позиция района в структуре Кызылкумской золотоносной провинции определяется пересечением древних по заложению и достаточно протяженных складчато-разрывных структур Ауминза-Бельтауского антиклиниория субширотной ориентировки Ясвай-Даугызтауской поперечной наложенной зоной дислокации близмеридионального простирания. Подобная приуроченность рудного района к участку пересечения крупных региональных структур предопределяет позицию и особенности внутреннего строения расположенных здесь рудных полей.

Геотектоническая характеристика гор Ауминзатау и Бельтау. Геотектоническая позиция рудного района — краевая часть Центрально-Кызылкумского срединного массива на границе со сложно построенным Кульджуктауским сектором Зерафшано-Алайской структурно-формационной зоны, который представляет собой позднегерцинскую рифтогенную структуру [Миркамалов и др., 2019]. Важный тектонический элемент района — субмеридиональная зона скрытых глубинных разломов фундамента Ауминза-Алтынтауская (или Турбай-Ауминзинская), проявленная на поверхности системой северо-северо-западных разрывов по типу правого сдвига.

Структурный план района отражает результаты воздействия каледонского, герцинского и альпийского циклов тектогенеза, за счет чего он имеет сложно-блоковое строение, обусловленное развитием разрывных структур четырех направлений: северо-западного, субширотного, северо-восточного и субмеридионального [Миркамалов и др., 2019].

Каледонский цикл. Выделение разрывных нарушений каледонского цикла является очень трудной задачей в условиях довольно сложного глыбового-блокового строения района, обусловленного проявления трех этапов орогенеза. Для картирования самых древних разломов нами использовались результаты ранее проведенных магнито- и гравиразведки. Анализ морфологии и пространственного поведения магнитоактивных тел, как и геологическим

данным свидетельствуют о приуроченности аномалиеобразующих объектов к структурным элементам секущего или согласного залегания по отношению к пликативным структурам.

На дневной поверхности данные разломы в большинстве случаев не сопровождаются зонами дробления и интенсивной трещиноватости, лишь иногда подтверждаются дайкообразными телами диабазов и несколько повышенной пиритизацией вмещающих пород. По отношению к простиранию линейных складок выделяются продольные и косые разломы.

Герцинский тектонический цикл. Все крупные разрывные нарушения по отношению к простиранию складчатых структур являются косыми, а по положению поверхности сместителя к слоистости вмещающих пород — секущими. Среди более мелких разрывов отмечаются как продольные, так и поперечные, однако их интенсивность проявления (при нашем масштабе изучения) является незначительной.

Широко развитые разрывные нарушения герцинского цикла фиксируются в виде структур северо-восточного, субширотного и северо-западного направлений, наиболее четко прослежены на местности, на космоснимках. Северо-восточные и субширотные разломы имеют крутное падение (до 75–80°) и сбросо-сдвиговую кинематику, большую амплитуду (до 400 м) и протяженность (десятки километров).

Альпийский цикл. Альпийские структуры носят, в основном, унаследованный характер. Тектонические движения по ним выражены в обновлении герцинских разломов (преимущественно широтных и северо-восточных), образовании горст-антеклиналей и разделяющих их депрессий. Кроме того, известны собственно альпийские и неотектонические структуры; складки северо-восточного направления и кольцевые структуры.

Применение метода соотношения каналов космических снимков LandsatETM+ и OLI позволило картировать зоны ожелезнения. Данные зоны во многих случаях соответствуют зонам разломов различного порядка (рис. 8).

К крупным разрывам территории исследования относятся (с юга на север) Южно-Ауминзатауский, Сарыктауский, Шокетауский, Захкудукский, Ауминзинский, Южно-Коспактауский, Коспактауский, Коскошинский и Северо-Ауминзатауский разломы.

Все отмеченные разломы, кроме Шокетауского, отчетливо выделяются (зоной градиентов) в гравитационном поле, отмечаются в магнитном поле по ряду характерных признаков и на отдельных участках хорошо дешифрируются. Отдельные разрозненные фрагменты отдешифрированных разломов увязывались между собой геологическими признаками, а также на основании совокупности геофизических признаков.

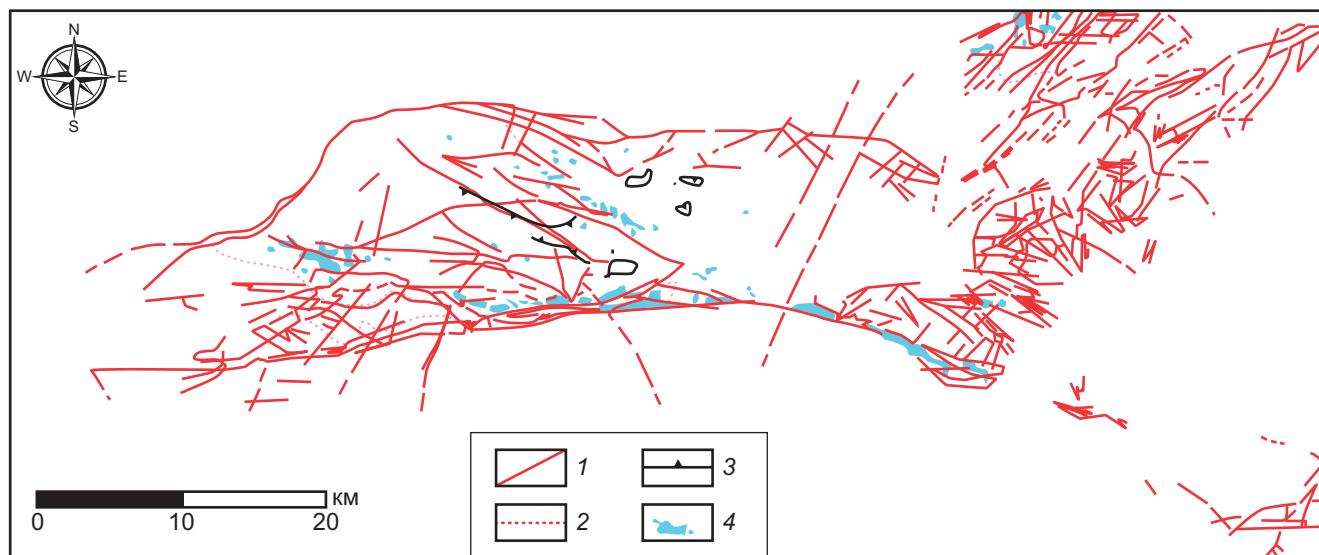


Рис. 8. Результаты обработки мультиспектральных космических снимков Landsat-8 методом индекса железа, синим цветом наложенные на карту разломов гор Ауминзатау-Бельтау: 1 — разломы (первого порядка) надежные, 2 — предполагаемые разломы (второго порядка), 3 — взбросы, 4 — зоны ожелезнения (определенены методом индекса оксида железа)

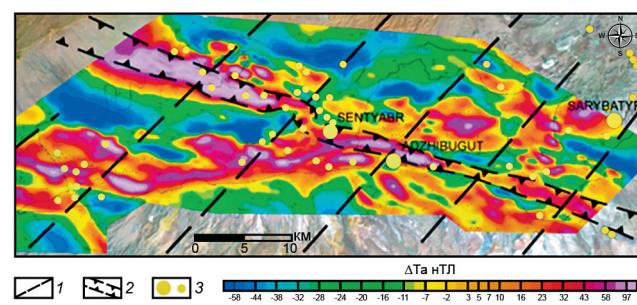


Рис. 9. Аджибугутская минерализованная зона на карте аномального магнитного поля: 1 — поперечные разломы (выделено А.Б. Гоиповым); 2 — Аджибугутская минерализованная зона; 3 — известные золоторудные объекты

Характеристики геофизических полей. Геофизические особенности территории гор Ауминзатау — контрастное мозаичное гравимагнитное поле, обусловленное литологическим составом вмещающей среды: чередованием существенно метабазитовых и терригенно-кремнистых пород, а также наличием гранитоидов. Вблизи поверхности значительное влияние на развитие геофизических аномалий оказывают участки разуплотнения в связи с развитием линейной и площадной кор выветривания.

Антитяньшаньское направление региональных нарушений родилось в регионе на базе геофизических построений и реального наличия разломов такого простирания в южной части Кызылкумов (Бельтау-Амантайтау, Аристантау). Однако последние не имеют сквозного характера, а ограничиваются пластинами карбонатов среднепалеозойского возраста. Данный факт и S-образная форма в плане дали основание отнести их к типу гигантского кливажа.

Характерной особенностью кварц-полевошпат-биотитовых метасоматитов является широкое и постоянное развитие в них пирротина, содержание

которого обычно составляет 1–5%. Метасоматиты кварц-полевошпатового состава отмечаются слабыми положительными магнитными аномалиями (10–50 нТл) и низким электрическим сопротивлением (2–10 Ом·м). Метасоматиты хорошо фиксируются положительными магнитными полями значениями 65–100 нТл (рис. 9), локальными гравиметрическими аномалиями (3,5–5 мГл) и низким электрическим сопротивлением (2–10 Ом·м). Золотоносность этих метасоматитов крайне неравномерная. Вместе с тем почти все золоторудные зоны находятся в их пределах. Это обстоятельство в силу широкого их распространения рассматривается в качестве основного прогнозного критерия.

Характеристика эталонных месторождений.

Коллизионным этапам развития Центрально-Кызылкумского региональных свойственно образование систем поперечных и продольных складчато-разрывных взбросо-сдвиговых зон, контролирующих золоторудную минерализацию многих месторождений. Исходя из общей запад-северо-западной ориентировки герцинского покровно-складчатого сооружения Южного Тянь-Шаня, поперечные коллизионные структуры имеют северо-восточное, север-северо-восточное направление. Примером таких структур может служить система северо-восточных разломов месторождения Даутызтау (рис. 10).

На рис. 10 приведены структурные планы золоторудных месторождений, составленные на основе структурного анализа, установлены геолого-структурные позиции и основные рудоконтролирующие факторы эталонных месторождений Ауминзатау-Бельтауского рудного района (таблица).

Заключение. Проведена комплексная обработка мультиспектральных космических снимков Aster, Landsat-7,8 и Sentinel-2A, картографированы

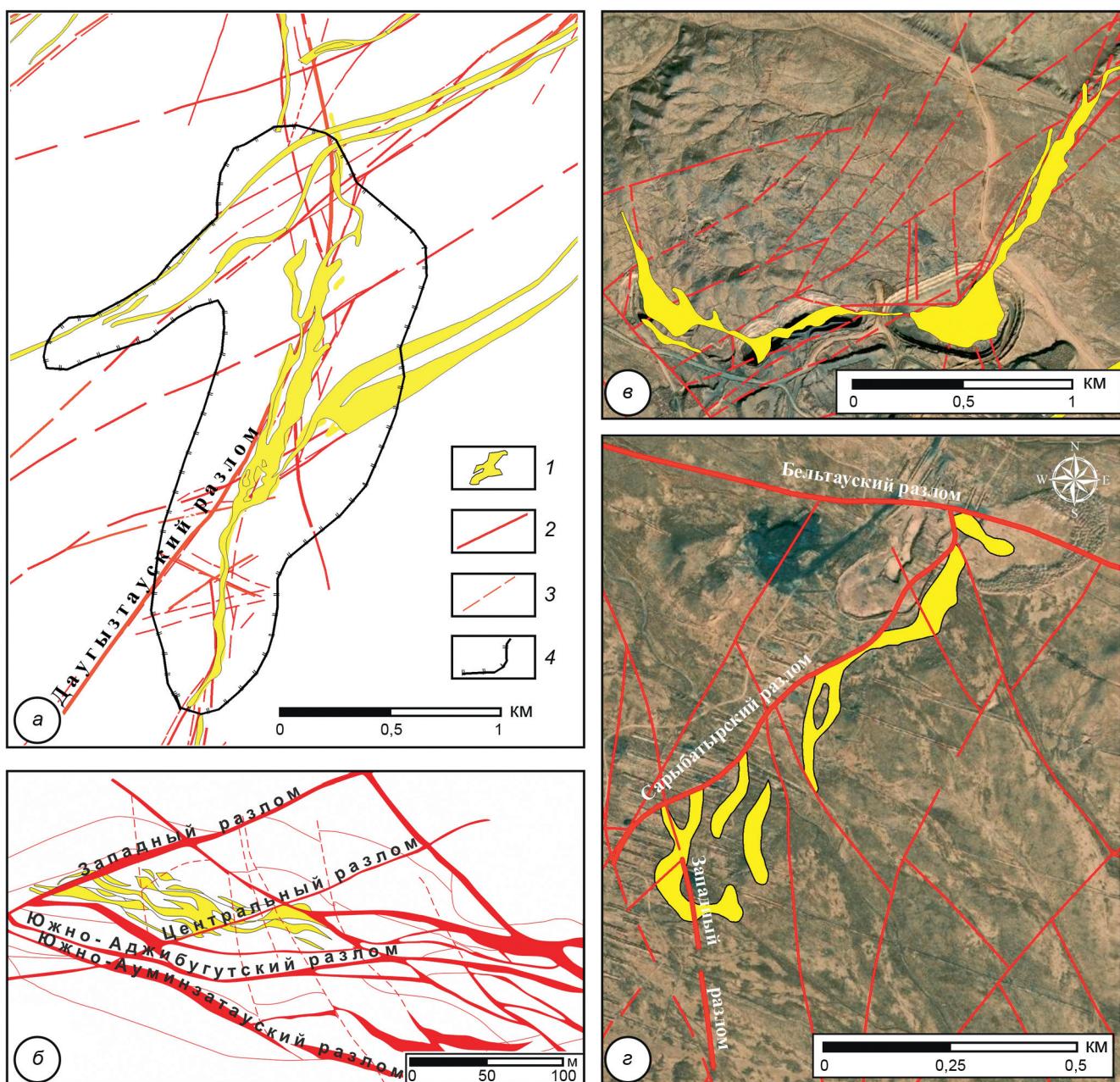


Рис. 10. Структурный план золоторудных месторождений Ауминзатау-Бельтауского рудного района: *а* — Даугызтау: 1 — золоторудные зоны, 2 — разломы, 3 — взбросово-сдвиговые зоны, 4 — контуры карьера; *б* — Аджибугут, *в* — Высоковольтные, *г* — Сарыбатыр

минеральные изменения индексов железа и каолинизации для поисков зон золоторудного и другого оруднения территории гор Ауминзатау.

Линеаментный анализ позволил выявить новые структуры, контролирующие золотое оруднение, подтвердить ведущую роль структурного фактора в формировании и размещении золоторудных месторождений и проявлений.

Структурный анализ имеющихся месторождений и рудопроявлений установил, что все объекты контролируются крупной линейной Высоковольтно-Даугызтау-Асаукакской тектонической зоной, северо-восточного простириания и размещаются среди терригенных отложений бесапанской свиты.

Рудолокализующими являются субмеридиональные (Даугызтауское и Амантайтауское месторождения) и субширотные (западная часть месторождения Высоковольтное и Асаукак, рудопроявление Северо-Даугызтауское) зоны.

Благоприятными позициями для локализации промышленного оруднения являются узлы пересечения северо-восточных структур с разрывами субмеридионального направления, участки расщепления северо-восточных структур и оперяющие их разломы (в том числе и пологие) со стороны висячего блока.

Промышленные рудные тела в пределах рудолокализующей структуры размещаются кулисо-

Геолого-структурные позиции и основные рудоконтролирующие факторы эталонных месторождений

Наименование месторождения	Геолого-структурная позиция оруденения	Геолого-промышленный тип оруденения	Рудовмещающие породы
Золоторудное месторождение Даугызтау	Приуроченность к участку пересечения Ясвай-Даугызтауской зоны дислокаций с Бельтау-Даугызтауской складчато-разрывной зоной	Золото-сульфидный	Углеродистые метапесчаники, алевролиты, сланцы
Золоторудное месторождение Аджибуугут	Приуроченность к Коспактау-Аджибуугутской синклинали — одной из складок более высокого порядка, осложняющих северное крыло крупной Ауминза-Бельтауской антиклинали	Золото-сульфидно-кварцевый	Метаморфизованные песчаники, алевролиты, сланцы кургантайской свиты
Золото-серебряное месторождение Высоковольтное	Разрывы северо-восточного (Асаукакский, Центральный, Северо-Восточный, Северный и Субширотный) и северо-западного (Восточно-Даугызтауский разлом, Джасаульская и Джусалинская зоны смятия) простирации	Золото-серебряный	Терригенная песчано-сланцевая толща бесапанской свиты
Золоторудное месторождение Сарыбатыр	Сарыбатырский разлом, блокированный Западным и Бельтауским разломами	Золото-сульфидный	Интенсивно дислоцированные гидротермально-метасоматически измененные породы бесапанской свиты

бразно как по падению, так и простиранию зоны. Подавляющее число рудных залежей — крутопадающие, но известны и относительно пологопадающие ($30\text{--}50^\circ$). На территории месторождения Высоковольтное распределение золоторудной и сереброрудной минерализации в пределах рудных зон узловое и струйчатое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас моделей рудных месторождений Узбекистана / Миркамалов Р.Х., Голованов И.М., Чирикин В.В., Фадеичева Л.П., Миркамалова Г.Х. Ташкент: ГП «НИИМР», 2010. 100 с.

Бухарин А.К., Масленникова И.А., Пятков А.К. Домезозойские структурно-формационные зоны Западного Узбекистана. Ташкент: Фан, 1985. 152 с.

Гоипов А.Б., Ахмадов Ш.И., Мовланов Ж.Ж. Изучение минерализованных зон гор Букантау по космическим снимкам в коротковолновом инфракрасном диапазоне // Горный журнал Казахстана. 2020. № 8. С. 10–14.

Миркамалов Р.Х., Чирикин В.В., Диваев Ф.К. Геодинамические реконструкции орогенного пояса Западного Тянь-Шаня и прогнозирование эндогенных отложений в породах фундамента (методические указания). Ташкент: ГП НИИ Минеральных ресурсов, 2019. 162 с.

Пирназаров М.М., Колоскова С.М. Природные типы первичных руд месторождения золота Аджибуугут (Центральные Кызылкумы) // Горный вестник Узбекистана. 2003. № 2. С. 1–6.

Проценко В.Ф. Гипотезы и фактография рудогенеза в черносланцевых толщах. Ташкент: НИИМР, 2012. 264 с.

Рудные месторождения Узбекистана / Отв. ред. И.М. Голованов. Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2001. 660 с.

Цой В.Д., Королева И.В., Алимов Ш.П. Природные типы руд золоторудных месторождений Узбекистана. Ташкент: ГП НИИМР, 2015. 156 с.

Adiri Z., El-Harti A., Jellouli A., Maacha L. Lithological mapping using Landsat 8 and ASTER multispectral data in

Финансирование. Данная статья подготовлена в рамках гранта №Al-5621112007 по теме «Создание космоструктурного атласа обнаженных и закрытых территорий горно-рудных регионов Центрального Кызылкума с целью выявления перспективных площадей на основе космогеологических исследований» 2023–2025 гг.

the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas // Journal of Applied Remote Sensing. January 2016. Vol. 10(1). P. 016005.

Amri K., Rabai G., Benbakhti I., et al. Mapping geology in Djelfa District (Saharan Atlas, Algeria), using Landsat 7 ETM+ data: an alternative method to discern lithology and structural elements // Arabian Journal of Geosciences. 2017. Vol. 10. P. 1–16. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132334457>

Adiri Z., Lhissou R., El Harti A., et al. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications // Ore Geology Reviews. Vol. 117. 2020. 103332.

Ciampalini A., Garfagnoli F., Antonielli B., et al. Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa // Arabian Journal of Geosciences. 2012.

Ciampalini A., Garfagnoli F., Ventisette Ch., et al. Potential Use of Remote Sensing Techniques for Exploration of Iron Deposits in Western Sahara and Southwest of Algeria // Natural Resources Research. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11053-013-9209-5>.

El Atillah A., El Morjani Z., El Abidine, Souhassou M. Use of the Sentinel-2A Multispectral Image for Litho-Structural and Alteration Mapping in Al Glo'a Map Sheet (1/50,000) (Bou Azzer-El Graara Inlier, Central Anti-Atlas, Morocco) // Artificial Satellites. Vol. 54. No. 3. 2019. P. 73–96.

Gad S., Kusky T. Lithological Mapping in the Eastern Desert of Egypt, the Barramiya Area, using Landsat Thematic Mapper (TM) // Journal of African Earth Sciences. 2006. Vol. 44. P. 196–202.

Goipov A.B., M. Ali Akgül, Suphi Ural, Akhmadov Sh.I. New achievements of remote sensing at the stage of geological exploration research: from satellite images to the determination of the ore body. Cukurova University // Journal of Natural & Applied Sciences. 2023. Vol. 2(1). P. 27–36.

Kolawole O.N., Zayyanu M.U., Bayowa O.G. Assessment of image ratio technique: targeting structural features and mineralization characteristics in the southwestern part of the Sokoto Basin in Nigeria using Landsat 8 imagery // Kuwait Journal of Science. 2023. Vol. 50. Iss. 4. P. 803–811.

Loughlin W.P. Principal component analysis for alteration mapping // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1991. Vol. 57(9). P. 1163–1169.

Mamadou T., Jonas D., Takodjou W., et al. Lithological and alteration mineral mapping for alluvial gold exploration in the south east of Birao area, Central African Republic using Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) data // Journal of African Earth Sciences. 2020. Vol. 170. 103933.

Mars J.C., Rowan L.C. Regional mapping of phyllitic-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. P. 161–186.

Mwaniki M. W., Moeller M. S., Schellmann G. A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualising lineaments: A case study of central region Kenya // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences/2015. XL-7/W3.

Pour A.B., Hashim M. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, southeastern Islamic Republic of Iran // Journal of Taibah University for Science. 2015. Vol. 9. P. 155–166.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.10.2024