

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

КАРТИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ НАБОРА ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ LANDSAT 8 НА ТЕРРИТОРИИ ШИТА АХАГГАР (ЮЖНЫЙ АЛЖИР)

© 2025 г. Ю. Н. Иванова^{1,2}, Ф. Гугали²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2024 г.

Впервые на основе материалов космической съемки космического аппарата дистанционного зондирования Земли Landsat 8 выполнено картирование гидротермально-метасоматических изменений на территории шита Ахаггар, Южный Алжир, перспективной для выявления золоторудной минерализации. Исследование проведено с целью выявления сходных закономерностей в распределении гидротермально-метасоматических изменений для разработки прогнозно-поисковых критериев на золоторудный тип минерализации. Таким образом, было установлено, что перспективные на золоторудную минерализацию площади на территории шита Ахаггар локализованы вдоль и/или внутри трансрегиональной разломной зоны, которая контролирует рудную минерализацию, приуроченную к периферии крупных морфоструктур (диаметром от 400 до 800 км) 1-го порядка. Такие морфоструктуры осложнены кольцевыми и дугowymi структурами 2-го и более высоких рангов, а также разрывными нарушениями ССЗ и ССВ простираний протяженностью более 100 км, либо ослабленными зонами, вдоль которых фиксируются внедрения даек среднего (габбро-диориты, диориты) состава, связанных с золоторудной минерализацией. Кроме того, в потенциально рудоносных вулканических постройках должны проявляться метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксидов двух- (магнетит) и трехвалентного железа (гематит), и в меньшей степени — оксидов и гидроксидов железа (лимонит), гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов.

Ключевые слова: космические снимки, золоторудная минерализация, Южный Алжир, Landsat-8, метод главных компонент, цифровая модель рельефа, линейменты, плотность линейментов

DOI: 10.31857/S0205961425020028, EDN: EJNHRN

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день на мировом рынке увеличивается спрос на золото. В связи с этим растут и объемы его предложения. Оно выступает объектом для инвестиций, индикатором состояния мировой экономики и показателем стабильности в финансовом развитии страны. Золоторудные месторождения становятся привлекательными для инвесторов и вызывают определенный научный интерес. Страны стремятся расширить свои золотые запасы, выявляя новые месторождения, тем самым увеличивая свою минерально-сырьевую базу и укрепляя национальную экономику.

Признаки золотой минерализации в Алжирской Сахаре на ЮЗ докембрийского шита Ахаггар (Алжирская Народно-Демократическая Республика) впервые были обнаружены французскими геолога-

ми в 50-х годах XX в. и лишь в 1970–1990-х годах были выявлены и разведаны золоторудные объекты мирового класса. Наиболее значимыми из них являются месторождения Амесмесса и Тирек с запасами 60 и 15 т, при среднем содержании золота 18 и 25 г/т соответственно (рис. 1) (Кряжев и др., 2017).

Методы дистанционного зондирования Земли позволяют извлекать ценную информацию, которая по сравнению с “традиционными” методами (геологическими, геофизическими, геохимическими) обладает более низкой стоимостью, высокой эффективностью и информативностью, простотой в применении, а также большей обзорностью, детальностью и повышенной глубиной (Бондур, 2016; Ананьев, 2017).

Современные материалы спутниковых изображений особенно актуальны для картирования и

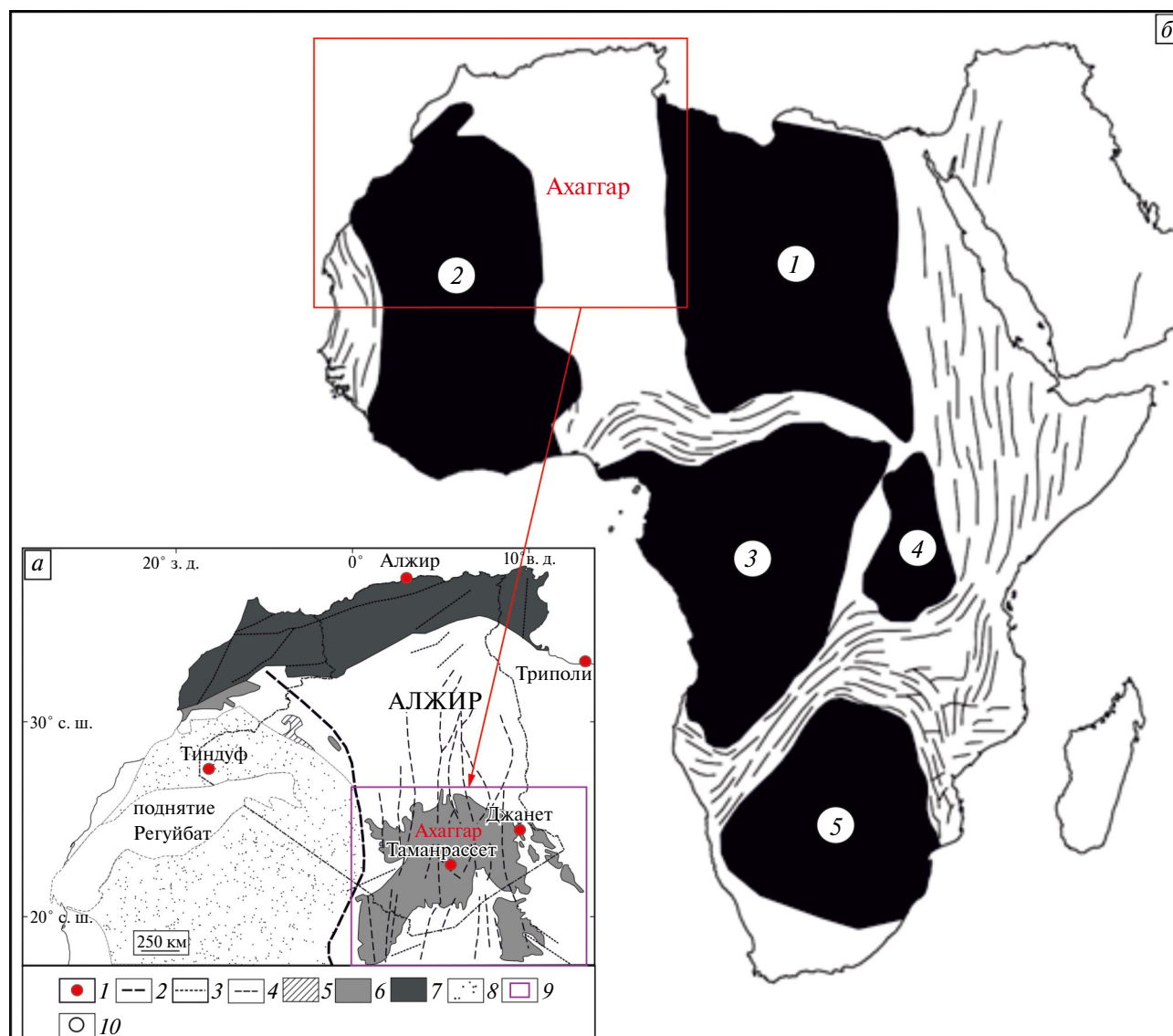


Рис. 1. Схема локализации щита Ахаггар в окружении архейских кратонов по (Liégeois et al., 2005) (а). Упрощенная геологическая карта изучаемой территории и сопредельной площади по (Black et al., 1994) (б). Условные обозначения: 1 – города; 2 – границы Западно-Африканского кратона; 3–4 – разломы: 3 – протерозойские (панафриканские), 4 – мезозойские; 5–7 – области складчатости: 5 – архейская, 6 – панафриканская (900–680 млн лет) (Aissa, Marignac, 2016), 7 – альпийская; 8 – палеозойский бассейн Таодени; 9 – границы щита Ахаггар; 10 – кратоны: Сахара (1), Западно-Африканский (2), Конго (3), Танзанийский (4), Калахари (5).

прогнозирования полезных ископаемых на больших территориях с засушливым и пустынным климатом, а также высокогорным рельефом, где часто недоступны обнажения горных пород и затруднен сбор проб (Zhang et al., 2007).

Цель работы – построить прогнозную карту щита Ахаггар, полученную на основе (1) карты развития гидротермально-метасоматических пород и (2) прогнозной схемы распределения зон высокопроницаемых горных пород на золоторудный тип минерализации. Эти материалы были составлены в результате обработки данных снимков космического аппарата

дистанционного зондирования Земли (КС КА ДЗЗ) Landsat 8. Кроме того, будут учтены данные геологической карты для оконтуривания перспективных участков, выделения новых прогнозно-поисковых критериев и выявления структурных, геологических и морфологических особенностей, связанных с золоторудным типом минерализации в пределах исследуемой территории.

Геологическое строение изучаемой территории

Щит Ахаггар относится к Панафриканскому Транссахарскому поясу, который образовался в

неопротерозое между 750 и 500 млн лет назад в результате столкновения кратонов: Западно-Африканского, Конго и Восточно-Сахарского (Liégeois et al., 2005; Caby, 1996) (рис. 1а). Он представляет собой глыбово-складчатую область площадью около 0.5 млн км², находящуюся в центре Сахары, и протягивается с запада на восток на 850 км, с севера на юг — на 600 км (Кряжев и др., 2017).

Щит в основном состоит из метаморфизованных пород архейского и палеопротерозойского возраста. Первые представлены гнейсами, кристаллическими сланцами, кальцифирами и мраморами (2200 млн лет). Плутонические образования — ассоциацией чарнокитов (1900 млн лет) и плагиогранитов. Палеопротерозойские отложения (590—583 млн лет) являются менее метаморфизованными и состоят из вулканогенно-осадочных пород, сохранившимися в синклиналях и грабенах, а также гнейсами, кварцитами, глинистыми сланцами, мраморами, амфиболитами и железистыми кварцитами (Allègre, Caby, 1972; Bertrand, 1974; Haddoum, 1992). Кроме того, присутствуют синорогенные батолиты и дайки пестрого состава, а также позднеорогенные панафриканские граниты с возрастом 620—580 млн лет и посторогенные граниты Таурирт, возникшие в интервале 535—484 млн лет в период раннепалеозойской тектоно-магматической активизации (Caby, 1996; Белов и др., 2015).

Тектонический облик Ахаггара определяет система меридионально вытянутых грабено- и горстообразных блоков, разделенных глубинными разломами, которые представляют собой зоны дробления, милонитизации и метасоматоза. Грабенообразные блоки сложены преимущественно гранит-зеленокаменными комплексами неопротерозоя, а горстообразные — гранито-гнейсовыми породами и гранитоидными образованиями архейско-раннепротерозойского возраста (Белов и др., 1991; Caby, 1996).

В центре щита находится Центрально-Ахаггарский горст-антиклинорий, состоящий преимущественно из нижнепротерозойских пород. С запада к нему примыкает Западно-Ахаггарский мегасинклинорий, а с востока — краевая переходная синклинозная зона. Обе эти структуры выполнены в основном верхнепротерозойскими породами. На крайнем западе располагается Западно-Ахаггарский горст-антиклинорий, сложенный, как и Центрально-Ахаггарский, нижнепротерозойскими образованиями, а также наиболее древними отложениями архейского гранулит-чарнокитового ин-узальского комплекса (Boissonnas, 1973; Аули, Белов, 2014). Эти образования формируют линейную складчато-блоковую структуру Ахаггара.

В самой восточной части Ахаггара находится Джанетская антиклинорная зона, где также разви-

ты нижнепротерозойские породы. Границы структурно-формационных зон проходят по крупным древним тектоническим нарушениям, преимущественно субмеридионального простирания (Zaba, 1992; Аули, Белов, 2014).

Для щита характерны мезозойские и протерозойские (панафриканские) разломы. Первые связаны с внутриконтинентальными рифтовыми структурами в области альпийской складчатости (20—18 млн лет). В течение мезозоя происходили левосторонние растягивающие транскуррентные движения в опускающихся удлинённых областях (рифтинг) (Liégeois et al., 2005).

Панафриканские разломы (535—520 млн лет) образовались в результате внутриплитного напряжения, связанного со столкновением Африки и Европы, которое спровоцировало линейное литосферное расслоение и быстрый подъем астеносферы в результате сброса давления (Liégeois et al., 2005).

Например, крупный протерозойский Восточно-Ин-Узальский (ВИЗС) разлом локализуется на востоке от одноименного террейна и протягивается в меридиональном направлении более чем на 1000 км при ширине до 50 км (рис. 2). Это правосторонняя пластичная зона сдвига с горизонтальным смещением на несколько сотен километров, простирающаяся на 2°30' (Caby, 1996; Marignac et al., 2016).

В пределах разлома породы подверглись динамометаморфизму с проявлением милонитизации и последующего бластеза. Кроме того, для него характерно наличие оперяющих тектонических нарушений высших порядков, вмещающих разнообразных дайки габбро и габбро-диоритов и кварцево-рудные жилы (Аули, Белов, 2014; Белов и др., 2015). Последние формируют вдоль него линейные жильные поля на месторождениях Амесмесса, Тирек и других объектах с золоторудной минерализацией. На первом объекте локализованы наиболее продуктивные золотоносные кварцево-жильные зоны, в которых сосредоточено около 75% всех запасов руд. Протяженность жильных зон достигает 3 км при мощности от 2 до 30 м (Aissa et al., 2002).

Кроме того, для щита характерны литосферные разломы (зоны мегасдвига), разделяющие террейны. Они характеризуются нарушениями сплошности земной коры и пронизывают мантийную часть литосферы. Движение крупных литосферных плит в этих зонах связано с конвективными процессами в мантии (Каракин, Курьянов, 2003). Эти разломы контролируют золоторудную минерализацию, приуроченную к зонам максимального растяжения (перпендикулярно σ_1) (см. рис. 2) (Clack et al., 1994; Caby, 1996; Marignac et al., 2016).

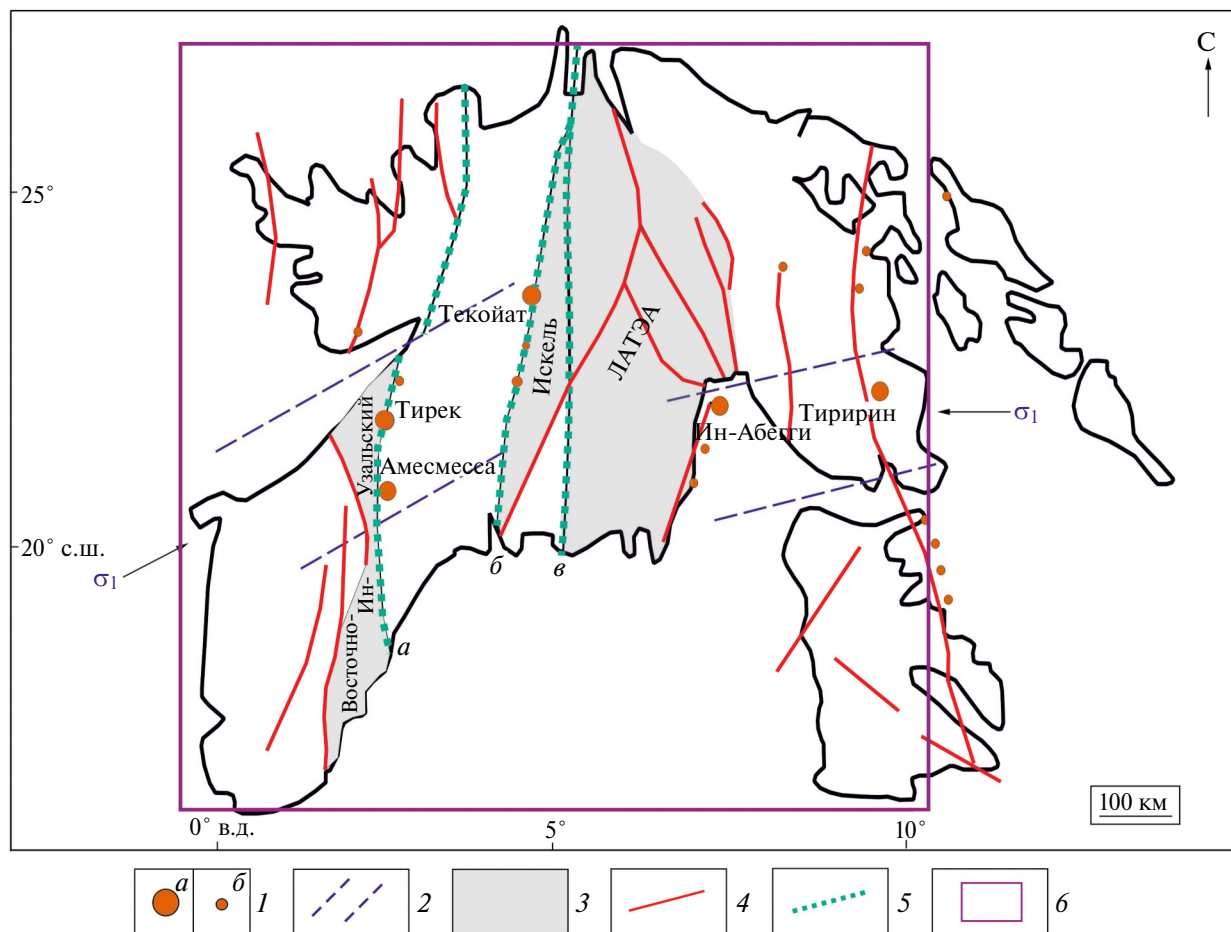


Рис. 2. Схема локализации некоторых золоторудных объектов в структурах щита Ахаггар по (Aissa, et al., 2002). Условные обозначения: 1 – месторождения (a) и рудопроявления (б) золота; 2 – зона растяжения; 3 – террейны; 4 – разрывные нарушения (литосферные разломы); 5 – зоны сдвига: ВИЗС (a), Искель (б), ЛАТЭА (в); 6 – границы, соответствующие рисункам 3–6.

В основном, все известные на щите месторождения и проявления золота найдены в террейнах Искель и ЛАТЭА (аббревиатура террейнов: Лауни, Тефедест, Эжере-Алексод и Азру-н-Фад).

Террейн Искель представляет собой узкую полосу длиной около 700 км и шириной около 60 км, простирающуюся с севера на юг. В мезопротерозое, раннем и среднем неопротерозое (криогенный и эдиакарский периоды) этот океанический террейн подвергался аккреции вдоль его границ (Caby et al., 1996; Liégeois et al., 2005). Он состоит из вкрапленных мафит–ультрамафитовых кумулятивных тел, которые интерпретируются как остатки офиолитовых единиц. В центре террейна локализуются плутонические тела. К нему приурочено месторождение золото-кварц-сульфидной формации Текойат и ряд других рудопроявлений (Black et al., 1994).

Вдоль террейна ЛАТЭА (Центральный Ахаггар) также простирается зона мегасдвига, со смещениями в несколько сотен километров. Со-

гласно (Liégeois et al., 2005) он сформировался в результате столкновения Сахарского и Западно-Африканского мегакратонов, что привело к внутриплитному напряжению, образованию и активизации сложных дифференциальных движений, в том числе трансформенных, и разделению террейна ЛАТЭА на несколько блоков. В Ахаггаре преимущественно реактивированными областями являются кратонные границы и метакратоны.

Продольно разрывным нарушениям внедрялись гранитные батолиты (615–580 млн лет) (Maignas et al., 2016). Террейн состоит из архейских и палеопротерозойских амфиболитовых до гранулитовых фаций метаморфических и магматических пород. В пределах ЛАТЭА известно золоторудное месторождение Ин-Абегги, включающее систему золотосодержащих кварцевых жил с интенсивным гидротермальным изменением. Золотоносные жилы расположены в габбро-диоритовом массиве нео-

протерозойской вулканогенно-осадочной серии (Liégeois et al., 2005).

Более подробную информацию о геологическом строении щита Ахаггар можно найти в работах (Allègre, Caby, 1972; Boissonnas, 1973; Bertrand, 1974; Haddoum, 1992; Zaba, 1992; Black et al., 1994; Caby, 1996; Aissa, 2002; Белов и др., 2014; Белов и др., 2015; Auli, 2016; Кряжев и др., 2017 и др.).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Безоблачные дневные сцены КА Landsat-8:

LC08_L2SP_192044_20221031_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_191044_20221024_20221101_02_T1;
 LC08_L2SP_191045_20221109_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_193044_20221022_20221101_02_T1;
 LC08_L2SP_194044_20221029_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_194045_20221029_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_193045_20221006_20221013_02_T1;
 LC08_L2SP_193043_20221022_20221101_02_T1;
 LC08_L2SP_194046_20230101_20230110_02_T1;
 LC08_L2SP_190043_20221017_20221031_02_T1;
 LC08_L2SP_190044_20221017_20221031_02_T1;
 LC08_L2SP_190045_20221017_20221031_02_T1;
 LC08_L2SP_191043_20221024_20221101_02_T1;
 LC08_L2SP_194047_20221029_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_194043_20221029_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_189043_20221111_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_189044_20221111_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_189045_20221111_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_190047_20221017_20221031_02_T1;
 LC08_L2SP_191046_20221109_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_191047_20221109_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_192047_20221031_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_193047_20221107_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_195046_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_195047_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_195043_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_193042_20221107_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_189042_20221111_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_191042_20221109_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_195042_20221105_20221115_02_T1;

LC08_L2SP_195044_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_195045_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_190048_20221102_20221114_02_T1;
 LC08_L2SP_191048_20221109_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_193048_20221107_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_195048_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_189041_20221111_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_190041_20221102_20221114_02_T1;
 LC08_L2SP_191041_20221109_20221121_02_T1;
 LC08_L2SP_193041_20221107_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_194041_20221114_20221122_02_T1;
 LC08_L2SP_195041_20221105_20221115_02_T1;
 LC08_L2SP_196043_20221027_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_196044_20221027_20221108_02_T1;
 LC08_L2SP_196045_20221027_20221108_02_T1
 уровня обработки 1T (с поправкой на рельеф). Изображения были получены из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

Предварительная обработка КС включала радиометрическую калибровку, атмосферную и топографическую коррекцию (Teillet et al., 1982; Lyapustin et al., 2003; Zhang et al., 2017; Roy et al., 2014).

Геологическая информация представлена в виде геологической карты, масштаб 1:100000 (1-е издание), составленной Министерством культуры и промышленности и Национальным обществом научных исследований и эксплуатации рудников (Carte geologique..., 1977).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеаментный анализ. Линеаменты — это прямые или приблизительно линейные формы рельефа, которые широко распространены по поверхности Земли и тесно связаны с подземными скрытыми и поверхностными структурными элементами. Направление и количество линеаментов отражает характер трещиноватости горных пород и может предоставлять ценную информацию о геологических структурах, тектонике и залегании полезных ископаемых (Masoud, Koike, 2011).

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Thannoun, 2013), выделения оставшейся морфологической системы кальдер (Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализации (Hubbard et al., 2012) и др.

Методика выделения линеаментов ручным способом на основе КС приведена в работе (Иванова и др., 2020).

Для выделения дополнительных линейных элементов рельефа (вытянутые в плане уступы горных хребтов, спрямленные участки речных долин и русел рек и др.), которые не дешифрируются на КС, использовалась глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) Aster GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) с пространственным разрешением в плане 30 м (Полякова и др., 2020; Wilson, Gallant, 2000). Данные ЦМР визуализированы с помощью техники “теневой рельеф” с целью построения схемы плотности линеаментов для выделения областей с высокими концентрациями линеаментов и дальнейшего прогнозирования перспективных участков на золоторудный тип минерализации.

Минералы невозможно идентифицировать непосредственно по КС, но могут быть выявлены поля метасоматически-измененных пород, имеющих ярко выраженные спектральные характеристики поглощения и отражения, которые фиксируются в диапазоне датчика КА ДЗЗ. Поэтому для картирования минералов гидротермальных изменений и литологических единиц (Mauger, 2013; Коротков, 2023) широко используется метод соотношения полос (band ratios). Данный метод усиливает спектральные особенности пикселей изображений, основываясь на вычислении отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). Выбор подобных каналов осуществляется исходя из отражающей способности искомого минерала. При этом в числителе должен располагаться канал, характеризующий наибольшую отражающую или излучающую способность минерала, а в знаменателе — наименьшую. В результате искомым минерал (или их группа) будет выражен яркими пикселями на полученном изображении.

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА Landsat-8 разработано несколько минералогических индексов (Pour et al., 2018): 4/2 — минералы группы оксидов и гидроксидов железа (гематит, магнетит, гетит, ильменит), а также ярозит и их смесь — лимонит; 6/4 — минеральные ассоциации с преобладанием оксида двухвалентного железа (магнетита); 6/5 — минеральные ассоциации с преобладанием оксида трехвалентного железа (гематита); 6/7 — гидроксилсодержащие (Al-OH и Fe, Mg-OH), карбонатные (кальцит и доломит) и сульфатные (гипс) минералы. Эти индексы рассматриваются как весовые показатели (индикаторы) Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH и Si-OH для групп минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза.

Метод главных компонент (МГК) — это многомерный статистический метод, который позволяет выбирать некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственного вектора) переменных так, что каждый извлеченный компонент имеет наименьшую дисперсию. Более подробную информацию о методе можно найти в работах (Jolliffe, 2002; Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Gupta, 2017). Первая главная компонента (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как она характеризуется наибольшей дисперсией в пространстве всех признаков (Jolliffe, 2002).

МГК преобразует набор коррелированных данных в некоррелированные линейные данные. МГК широко используется для картирования гидротермальных минералов и литологических единиц на основе спектральных каналов-сенсоров КА ДЗЗ (Loughlin, 1991). Данный метод применен к анализу ранее полученных минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы. Подобный подход позволяет статистически оценить надежность пространственного распределения соответствующих вторичных минералов в исследуемом районе.

В качестве входных данных для МГК традиционно используются спектральные каналы КС, но для наиболее эффективной статистической оценки надежности пространственного распределения соответствующих гидротермальных минералов в исследуемом районе использованы результаты оценки минералогических индексов с применением ковариационной матрицы.

Роза-диаграмма построена в автоматическом режиме с помощью скрипта на языке Python с использованием библиотеки Matplotlib.

Систематизация и обобщение данных выполнена в программной среде QGIS. Все имеющиеся данные собраны и визуализированы в едином ГИС-проекте.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В кайнозой на исследуемой территории происходила активная вулканическая деятельность, связанная с коллизией Африки и Европы. Для нее можно выделить три основные стадии: верхний эоцен — олигоцен (35–50 млн лет); миоцен (12 млн лет); поздний плиоцен — поздний четвертичный период (от 3 млн лет до верхнего палеолита). После этого вулканизма образовался расчлененный рельеф с высотами более 2000 м (например, гора Тахат — 2918 м) и зыбью до 1500 м (Liégeois et al., 2005; Black et al., 1994; Caby, 1996). Эти события нашли отражение на КС.

Дешифрирование КС в пределах изучаемой территории позволило выделить крупные морфоструктуры овальной и круглой формы, а также кольцевые, дуговые и радиальные линеаменты более высокого ранга (рис. 3 и 4).

На рис. 4 представлена морфоструктурная карта с нанесенными на нее линеаментами, выделенными ручным способом, по данным КС КА Landsat 8 и ЦМР.

На нем выделяются 4 крупных структуры овальной формы 1-го ранга: № 1 и 2 вытянуты в СВ направлении, № 3 и 4 — в субмеридиональном и субширотном направлениях, соответственно). Морфоструктура № 1 имеет размеры 660 на 500 км, морфоструктура № 2 — 420 на 473 км, морфоструктуры № 3 и № 4 — 307 на 260 км и 400 на 333 км, соответственно. Они осложнены дуговыми, кольцевыми (до 40 км в диаметре) и радиальными (до 340 км) линеаментами более высокого ранга.

Кроме того, на данном рисунке отчетливо выделяются серии более коротких по простиранию ради-

альных линеаментов СЗ и СВ направлений длиной до 100 км. Эти разрывные нарушения образуют три зоны сдвига. (а) Зона субмеридиального простирания длиной около 933 км, вероятно, принадлежащая ВИЗС и/или являющаяся ее частью. (б) Зона также субмеридиального направления длиной примерно 867 км, которая, скорее всего, относится к сдвиговой зоне, локализованной на западе террейна Искель. (в) Зона ЮЮВ направления длиной примерно 1067 км, по-видимому, относится к разрывному нарушению, разделяющему террейны ЛАТЭА и Искель. (г) Зона ЮВ простирания, возможно, относящаяся к восточной границе террейна ЛАТЭА. Эти структуры насыщены дизъюнктивными нарушениями и имеют сложное блоковое строение.

Вдоль и внутри выделенных зон локализовано большинство золоторудных и других типов месторождений и рудопроявлений. Поэтому, вероятно, эти зоны играют рудоконтролирующую роль. Они, скорее всего, образовались позднее морфоструктур № 1–4, так как при пересечении с кольцевыми структурами линейные структуры рассекают их как

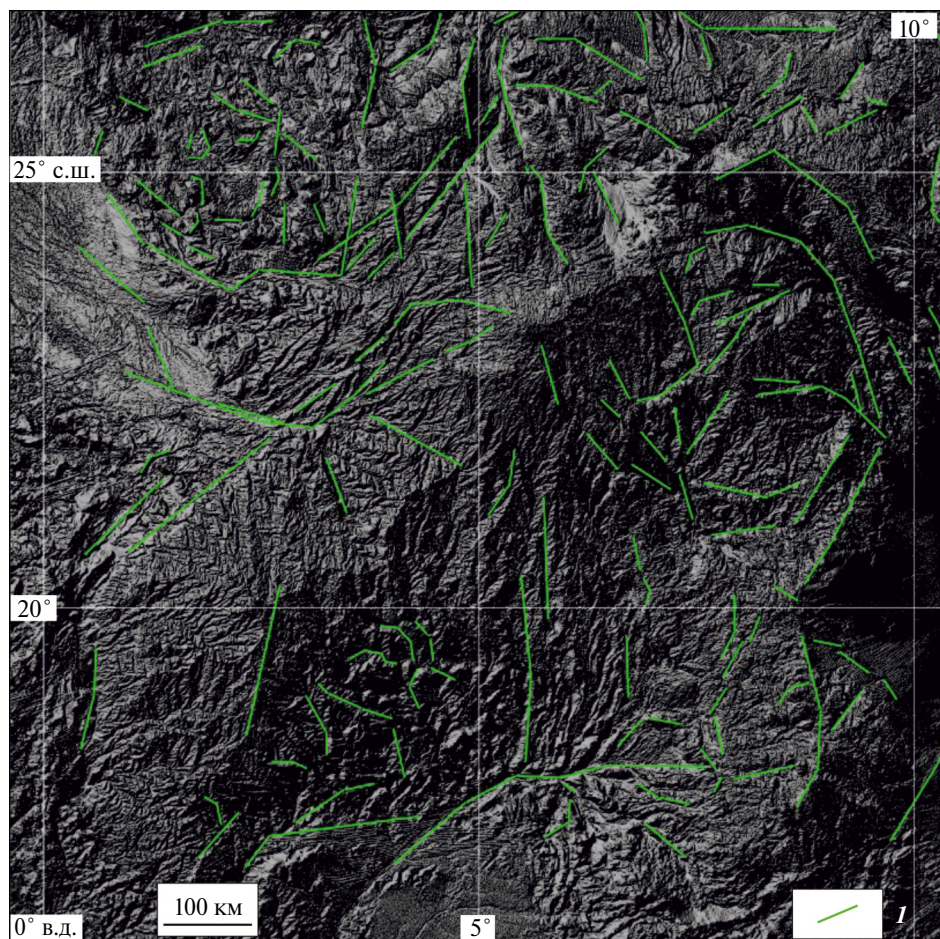


Рис. 3. ЦМР и выделенные по ней линеаменты для территории исследования. Условные обозначения: 1 — линеаменты.

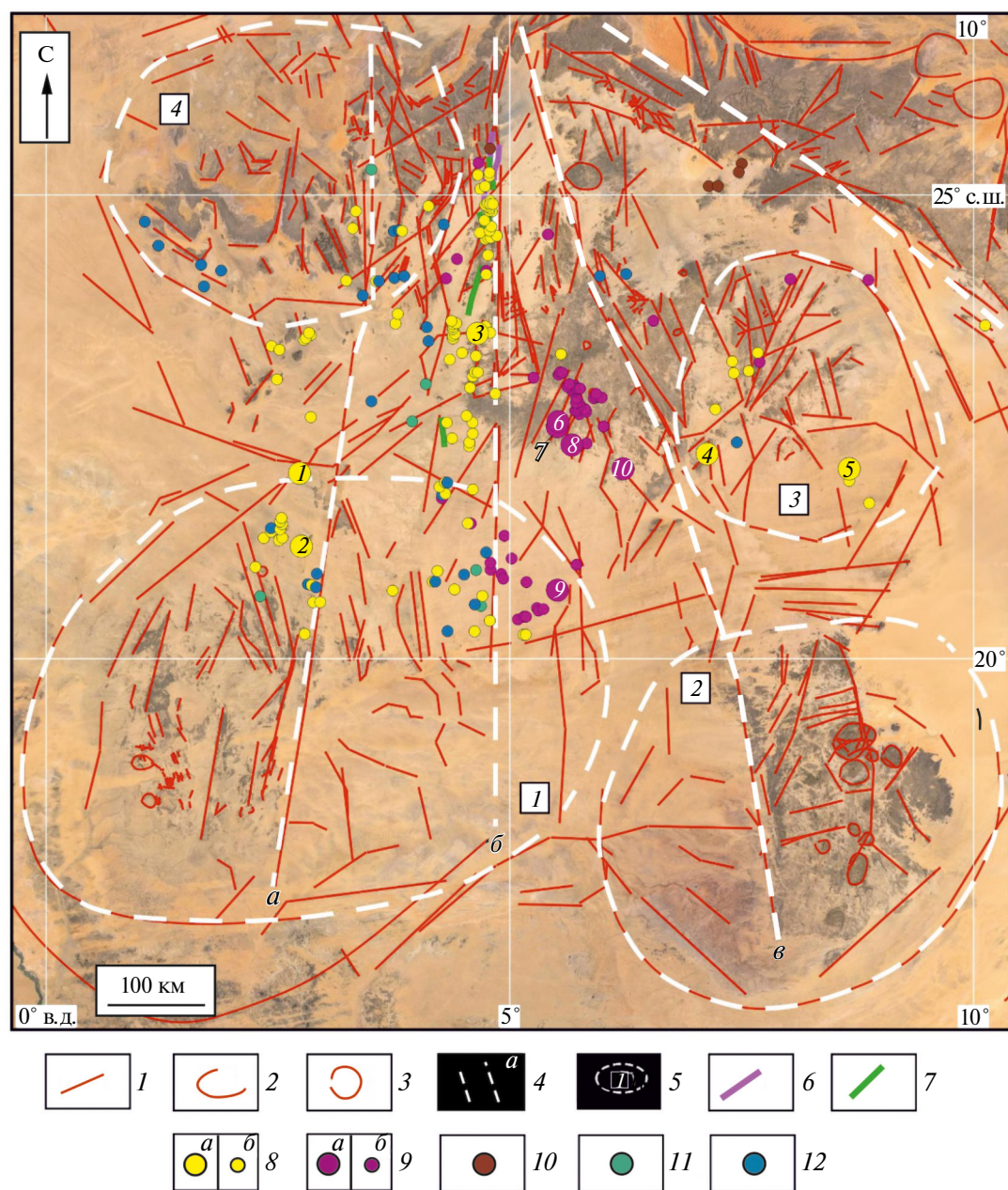


Рис. 4. Морфоструктурная карта площади исследования в естественных цветах (RGB 4-3-2) с наложенными на нее линеаментами, полученными по данным КС КА Landsat 8 и ЦМР (а). 1–3 – линеAMENTы: 1 – радиальные, 2 – дуговые, 3 – кольцевые; 4 – зоны сдвига, относящиеся к террейнам: ВИЗС (а), Искель (б), ЛАТЭА (в), зона сдвига, разделяющая террейны ЛАТЭА и Искель (г); 5 – морфоструктуры № 1–4; 6–7 – дайки, сложенные породами кислого (6) и основного (7) состава; 8–12 – месторождения (а) и рудопроявления (б): 8 – Au, 9 – Sn, W, Mo, 10 – Fe, Ti, 11 – Ni, Co, Cr, Pt, 12 – Pb, Zn, Ag, Cu. Цифрами указаны месторождения: Тирек (1), Амессеса (2), Текойат (3), Ин-Абегги (4), Тиририн (5), Эль Каруза (6), Тин Амзи (7), Алемеда (8), Нахда (9), Бачир (10).

без видимых смещений, так и с разрывами, обрезаниями и смещениями отдельных частей кольцевых разломов (Космическая..., 1983).

Ориентация линеаментов анализируется путем создания розы-диаграммы, которая представляет собой количество линеаментов, доминирующих в

определенном направлении (рис. 5а). В результате главные структуры – это линеAMENTы ССЗ простирания. Второстепенные – ССВ, субмеридиального и СЗ направлений.

Для линеаментов, выделенных по ЦМР, также были построены розы-диаграммы (рис. 5б). Глав-

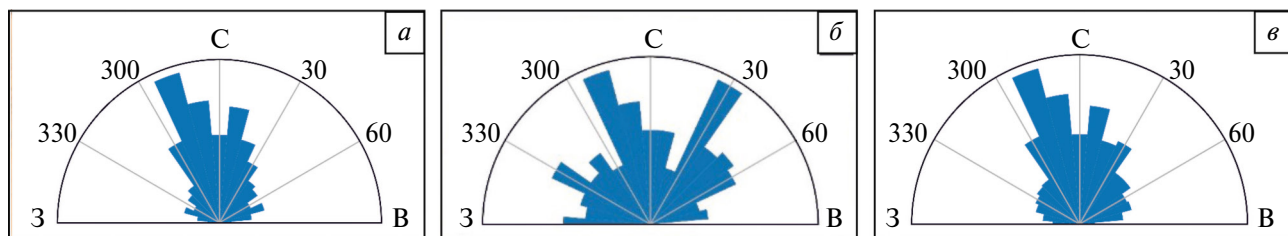


Рис. 5. Розы-диаграммы составлены для линейментов, выделенных ручным способом по КС КА Landsat 8 (а); ЦМР (б); КС КА Landsat 8 и ЦМР (в).

ные структуры — это линейменты ССЗ и ССВ простирающихся. Второстепенные — СВ, СЗ и субширотные направлений.

Несогласие в преобладающих ориентировках, скорее всего, можно объяснить наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных комплексов. Где находятся обнажения горных пород, там выделяется большее число линейментов (см. рис. 4). Следовательно, при анализе систем структурных нарушений необходимо отдельно применять и рассматривать каждый способ ручного линейментного анализа — по КС КА Landsat 8 и ЦМР, так как они дополняют друг друга.

Таким образом, объединенная роза-диаграмма, выделенная по КС и ЦМР, показывает, что на изучаемой территории преобладают линейменты ССЗ и ССВ ориентировок, второстепенными являются разрывные нарушения СЗ, СВ и субмеридионального направлений (рис. 5в).

Большинство известных месторождений и рудопроявлений (Au, Pb-Zn-Ag-Cu, Ni-Co-Cr-Pt, Sn-W-Мо минерализация) на изучаемой площади принадлежат к внешним и внутренним частям морфоструктур № 1 и № 4. Тогда как для морфоструктуры № 3 их число меньше (Au, Pb-Zn-Ag-Cu минерализация), а в морфоструктуре № 2 не локализовано ни одного выявленного до настоящего времени объекта.

Морфоструктуры № 1–4 представляют собой гетерогенные структуры 1-го порядка со сложным внутренним строением и длительным развитием, вероятно, образованные под влиянием нескольких геологических процессов. Внутреннее строение морфоструктур осложнено (1) линейментами ССВ и ССЗ простирающихся (более 100 км) либо ослабленными зонами 1-го порядка, вдоль которых фиксируется внедрение разнообразных интрузивных тел (дайки основного и кислого состава), с которыми генетически связана золоторудная минерализация, (2) кольцевыми и дуговыми линейментами 2-го и более высоких рангов, вероятно, корового уровня заложения (Горный и др., 2014). Такие структуры, скорее всего, формирова-

ли малоглубинные очаги с разнообразной рудной специализацией (Томсон и др., 1984; Серокуров и др., 2008) (см. рис. 4). Так, по данным (Кряжев и др., 2017), золоторудная минерализация месторождений Амесмесса и Тирек, принадлежащая морфоструктуре № 1, сформировалась на различных гипсометрических уровнях единой рудообразующей гидротермальной системы при участии однотипных гетерогенных углекислотно-натриево-хлоридных растворов умеренной концентрации (~6 мас. % экв. NaCl). Рудоотложение протекало в температурном диапазоне 290–320°C на глубинах ~7 км (месторождение Тирек) и 4.5 км (месторождение Амесмесса). Гетерогенность минералообразующей среды на всех уровнях глубинности была обусловлена избыточным количеством углекислоты, поступающей в систему из подкорового источника ($\delta^{13}\text{C} = -7\text{‰}$). Углекислотная фаза могла служить основным транспортирующим агентом рудообразующей системы в термостатированных условиях, обеспечивая значительный вертикальный размах оруденения на золото-кварцевых месторождениях данного типа.

Другими признаками потенциальной рудоносности отдельно взятых вулканических построек могут служить проявления зон с повышенными значениями индексов оксида железа II и III, реже гидроксид-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов, которые могут быть закартированы по результатам спектрального анализа КС КА ДЗЗ.

В результате для изучаемой территории впервые закартированы четыре типа гидротермальных изменений, которые представлены преимущественно разными группами минералов и отдельно показаны на рис. 6.

Как видно из рис. 6, распределения оксидов трех- (гематит) и двухвалентного железа (магнетит), особенно с высоким содержанием, совпадают. В меньшей степени совпадает расположение повышенных значений оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и гидроксид-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов.

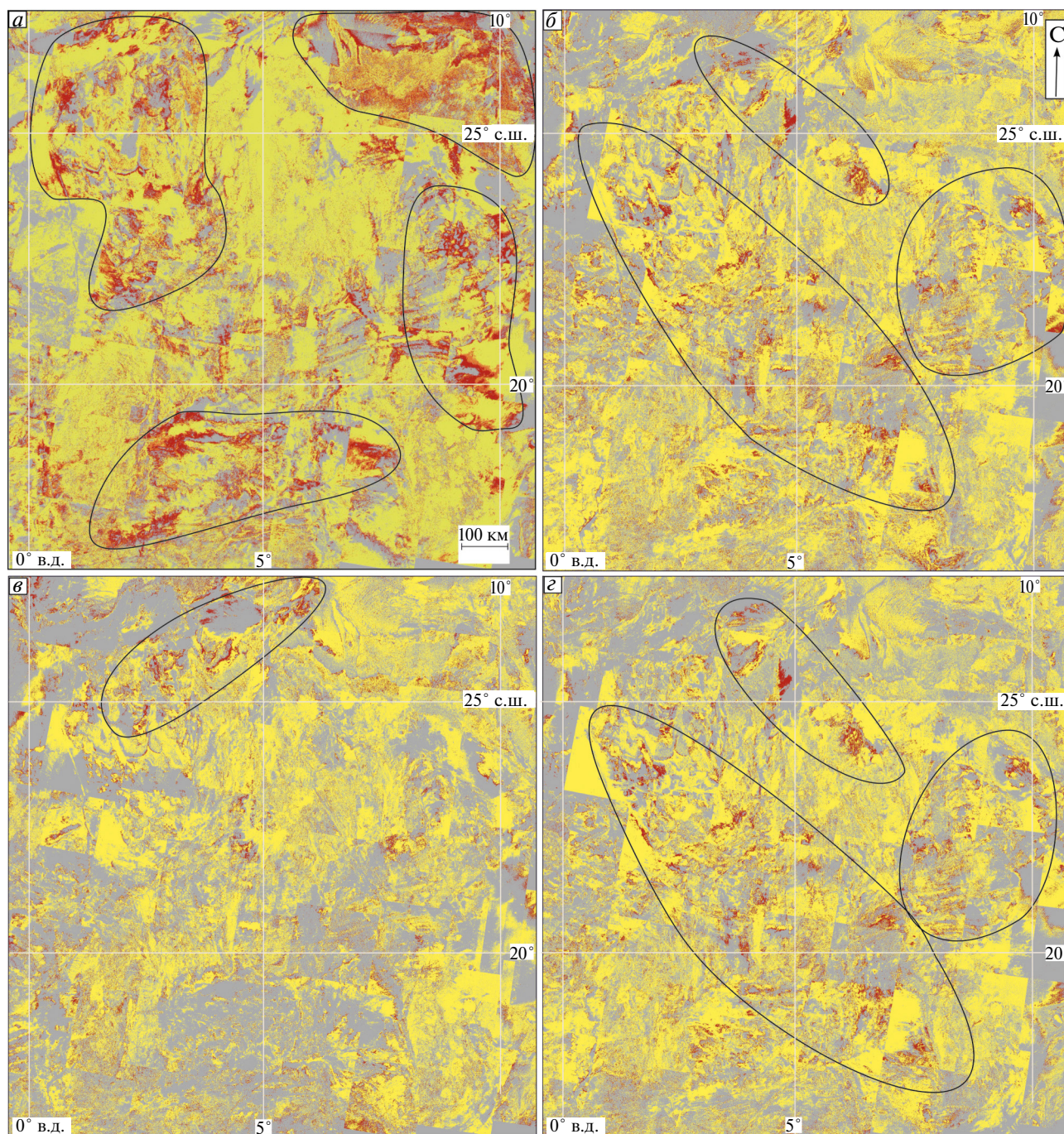


Рис. 6. Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой территории, полученные в результате обработки КС КА Landsat-8: *а* — оксиды и гидроксиды железа (лимонит); *б* — оксиды двухвалентного железа (магнетит); *в* — гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы; *з* — оксиды трехвалентного железа (гематит). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные — желтый цвет, средние — оранжевый и максимальные — красный, линиями указаны контуры максимальных концентраций (сгущения точек) вторичных изменений.

Кроме того, подтверждением совпадения распределения оксидов железа II и III могут служить минералогические данные. Согласно данным (Rabah et al., 2020), на месторождении Ин-Абегги металлоносные минералы сопровождаются оксидами титана и

железа (рутил, ильменит и гематит) и гидроксидами железа (гетит и лимонит) на гипергенной стадии.

На месторождении Амесмесса самородное золото присутствует в кварцево-рудных жилах и около-рудных гидротермально-измененных породах (зонах

березитизации и калишпатизации). В зонах березитизации оно встречается среди железосодержащих хлоритов (Белов и др., 2015).

Кроме того, на данном объекте в небольшом объеме присутствуют окисленные руды, прослеживающиеся до глубин 20–30 м. Они состоят из кварца (до 25–30%), березитов (до 70–75%) и небольшого количества гипергенных минералов, в основном гетита, гидрогетита, гематита, иногда с налетами малахита, азурита и церуссита на стенках трещин и пустот выщелачивания. В этом типе руд встречаются “видимые” золотины (Белов и др., 2015).

На месторождении Тирек значительная доля золота присутствует в виде микроскопических частиц, локализованных в сильноизмененных вмещающих породах. По данным (Saad et al., 2018), основным механизмом отложения золота на объекте является реакция между рудными флюидами, богатыми S, и железосодержащими вмещающими породами в результате дестабилизации комплекса $Au(HS)_2^-$ в рудных флюидах.

На рисунке 7 представлена схема плотности линеаментов для изучаемого района, полученная в результате обработки данных КС КА Landsat-8.

Плотность линеаментов характеризуется как степень проницаемости (т.е. нарушенности) горных пород. Выявленные ранее рудопроявления и месторождения в основном локализуются в зонах с высокими значениями плотности линеаментов (красный/оранжевый цвет) и связаны со структурами, играющими рудоконтролирующую роль. Ряд объектов локализован в зонах с низкими концентрациями структур (зеленый и синий цвет). Это связано, вероятно, с наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных комплексов.

Учтены следующие признаки. (1) Геологические особенности – расположение морфоструктур вдоль трансрегиональной разломной зоны высшего ранга (зоны сдвига), осложненные радиальными разрывными нарушениями ССВ и ССЗ направлений, вдоль которых локализованы субвулканические тела, связанные с оруденением. Данная зона имеет сложное блоковое строение и, вероятно, играет рудоконтролирующую роль. (2) Зоны распространения гидротермальных изменений, выделенные на основе обработки КС КА Landsat-8. (3) Области с высокими концентрациями линеаментов, т.е. сильно нарушенными горными породами. (4) Локализация рудных объектов: выделено два перспективных участка. Они локализуются на С и ЮВ изучаемой территории. На схемах дешифрирования КС они отвечают скоплениям наиболее ярко выраженных проявлений минералогических индексов распределения оксидов двух- и трех-

валентного железа (гематит) и, в меньшей степени, оксидов и гидроксидов железа (лимонит).

В перспективный участок № 1 входят объекты Au, Sn-W-Mo, Fe-Ti, Ni-Co-Cr-Pt, Pb-Zn-Ag-Cu минерализации. Скорее всего, это связано с тем, что эта площадь более изучена, чем другие территории щита Ахаггар (Marignac et al., 2016). В перспективный участок № 2 пока не входит ни один известный объект.

Таким образом, обнаруженные предшественниками месторождения и рудопроявления локализованы в выделенной перспективной области. Например, в перспективной площади № 1 находится наибольшее количество объектов Au, Sn-W-Mo, Ni-Co-Cr-Pt, Pb-Zn-Ag-Cu минерализации, что подтверждает достоверность полученных результатов вследствие применения описанного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки данных КА ДЗЗ Landsat-8 построены карты распространения гидротермальных изменений для изучаемой территории: гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие породы, оксиды двух- (магнетит) и трехвалентного железа (гематит), оксиды и гидроксиды железа (лимонит), с использованием спектральных каналов КА ДЗЗ Landsat 8 (минералогические индексы) и МГК.

Составлена схема плотности линеаментов и выявлена тесная связь между известными рудными объектами и высокими значениями плотности линеаментов.

Выделены два участка, перспективных на золоторудный тип минерализации, на основе интеграции карт распространения метасоматических изменений и схемы плотности линеаментов, геологической карты, а также с учетом достоверных разрывных нарушений, играющих рудоконтролирующую роль. Эти площади приурочены к зонам повышенной плотности выделенных тектонических нарушений и линеаментов и являются наиболее благоприятными/перспективными для прогноза золоторудной минерализации.

Выявлены закономерности, на основании которых сформулированы прогнозно-поисковые критерии на золоторудный тип минерализации в пределах щита Ахаггар, Южный Алжир:

1. Структурный критерий № 1. Перспективные площади на золоторудный тип минерализации на территории щита Ахаггар должны быть локализованы вдоль и/или внутри трансрегиональной разломной зоны, которая контролирует рудную минерализацию, приуроченную к периферии крупных

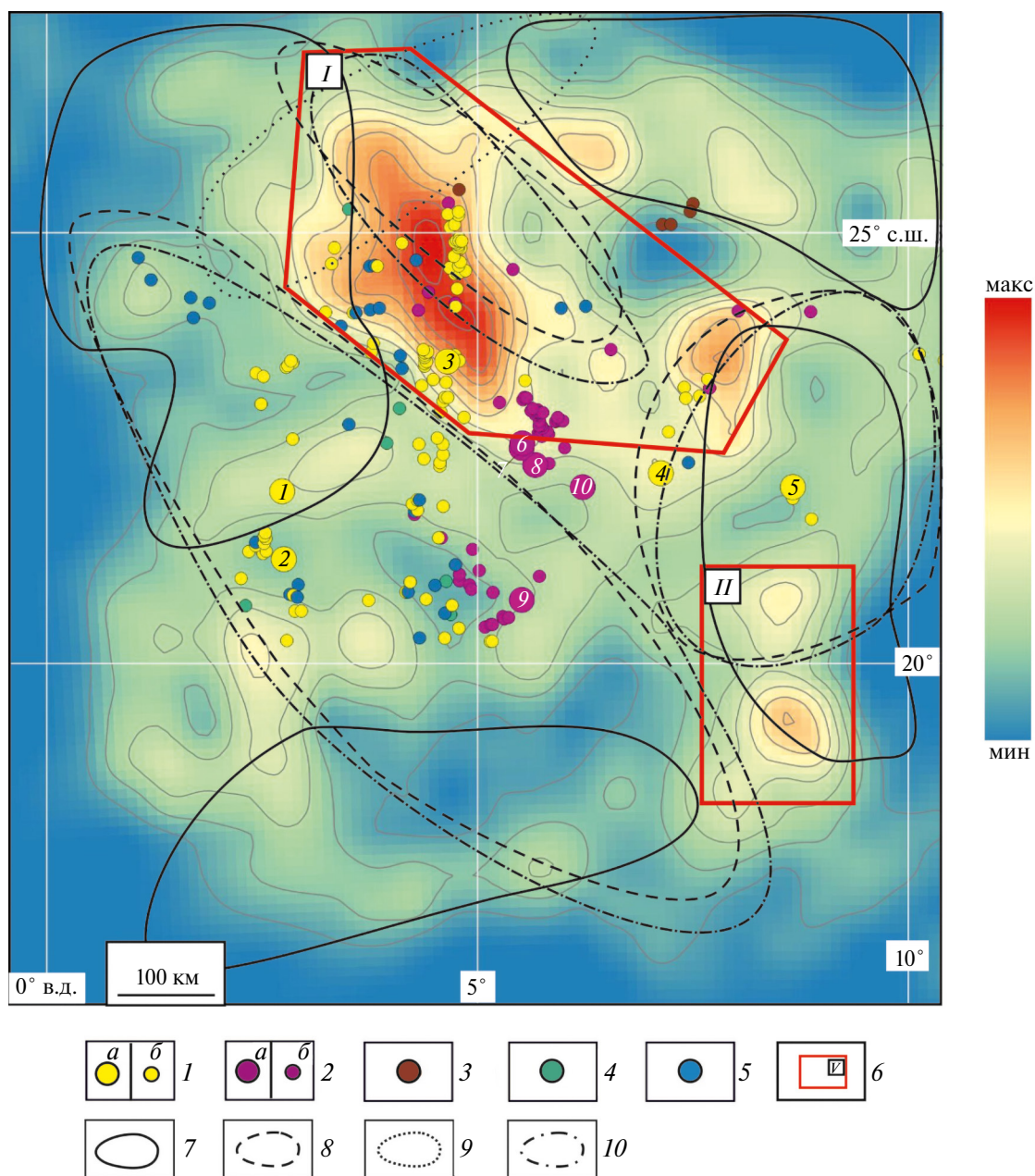


Рис. 7. Схема плотности построена на основе линеаментов, выделенных ручным способом для изучаемой территории, с нанесенными на нее участками, перспективными на золоторудный тип минерализации: 1–5 – соответствуют рис. 4; 6 – границы перспективных площадей, выделенных по материалам КС КА Landsat 8 (номера I–II на карте – см. пояснения в тексте); 7–10 – вторичные изменения: 7 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), 8 – оксиды двухвалентного железа (магнетит), 9 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, 10 – оксиды трехвалентного железа (гематит). На шкале показаны зоны с максимальной (красный цвет) и минимальной (синий цвет) плотностью линеаментов.

морфоструктур (диаметром от 400 до 800 км) 1-го порядка.

2. Структурный критерий № 2. Такие морфоструктуры осложнены кольцевыми и дуговыми структурами 2-го и более высоких рангов, а также разрывными нарушениями ССЗ и ССВ простирающихся протяженностью более 100 км, либо ослаблен-

ными зонами, вдоль которых фиксируются внедрения интрузивных тел, парагенетически связанных с минерализацией.

3. Вещественный критерий № 1. Золоторудная минерализация связана с дайками среднего (габбро-диориты, диориты) состава и локализована в кварцевых жилах.

4. Вещественный критерий № 2. В потенциально рудоносных вулканических постройках должны быть проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксидов двух- (магнетит) и трехвалентного железа (гематит), и в меньшей степени оксидов и гидроксидов железа (лимонит).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев Ю.С. Золото-концентрирующие системы Южного складчатого обрамления Западно-Сибирской плиты (на примере Западной Калбы): дис. док. геол.-минерал. наук. Томск, 2017. 509 с.
- Аули Э., Белов С.В. Геодинамические условия формирования золотого оруденения Ин-Узальской зоны Алжирской Сахары // Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах: Труды Всерос. науч. конф. с международным участием. Новосибирск. 2014. С. 37–56.
- Белов С.В., Зверев С.Н., Аули Э. Строение и оруденение месторождения Амессмеса в Алжирской Сахаре // Разведка и охрана недр. 2015. № 2. С. 11–17.
- Белов С.В., Квиникадзе М.С., Гасем С. Граниты Тавриды в Алжирской Сахаре // Известия АН СССР. Сер. геол. 1991. № 10. С. 84–92.
- Бондур В.Г. Космическая геоинформатика // Перспективы науки и образования. 2016. № 1 (19). С. 17–21.
- Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектрометрии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В. Геологическая позиция и структурный контроль золоторудной минерализации Малоуральского вулcano-плутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 51–62.
- Космическая информация в геологии. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: Государственный научный центр Российской Федерации – ВНИИГеосистем, 2003. 222 с.
- Кряжев С.Г., Белов С.В., Игнатов П.А., Васюта Ю.В., Аули Э. Флюидный режим формирования золото-кварцевых месторождений Амессмеса и Тирек в Алжирской Сахаре // Руды и металлы. 2017. № 1. С. 91–96.
- Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 17. № 7. С. 117–127. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>
- Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В. Дистанционная оценка золотоносного потенциала // Руды и металлы. 2008. № 1. С. 45–51.
- Томсон И.Н., Кравцов В.С., Кочнева Н.Т., Середин В.В., Селиверстов В.А. Металлогения скрытых линейментов и концентрических структур. М.: Недра, 1984. 272 с.
- Aissa D. and et al. Les minéralisations aurifères du Hoggar (Sud Algérien) et leurs relations avec les zones de cisaillements lithosphériques // Bull 217 du service géologique de l'Algérie. 2002. Vol. 13. № 2. P. 93–115.
- Aissa D., Marignac C. Controls on gold deposits in Hoggar, Tuareg Shield (Southern Algeria) // Journal of African Earth Sciences. 2016. V. 127. P. 136–145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.002>
- Allègre C.J., Caby R. Chronologie absolue du Précambrien de l'Ahaggar occidental // CR Acad. Sci. Paris. 1972. 275(D). P. 2095–2098.
- Auli E. Regularities of localization and conditions of formation of gold mineralization of the Amesmesa deposit (Algerian Sahara): PhD thesis: Moscow. 2016. 20 p.
- Bertrand J.M.L. Évolution polycyclique des gneiss précambriens de l'Aleksod serie (Hoggar Central, Sahara algerien): aspects structuraux, pétrologiques, géochimiques et géochronologiques // Paris: Serv. Geol. CNRS. 1974. № 19. 307 p.
- Black R., Latouche L., Liegeois J.P., Caby R., Bertrand J.M. Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara) // Geology. 1994. Vol. 22. P. 641–644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0641:PADTIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0641:PADTIT>2.3.CO;2)
- Boissonnas J. Les granites à structures concentriques et quelques autres granites tardifs de la chaîne pan-africaine en Ahaggar (Sahara Central) // Paris: Serv. Geol. CNRS, 1973. № 16. 270 p.
- Caby R. A review of the In Ouzzal granulitic terrane (Tuareg Shield, Algeria): its significance within the Pan-African Trans-Saharan Belt; Special issue on the In Ouzzal granulite unit, Hoggar Algeria // Journal of Metamorphic Geology. 1996. Vol. 14. Is. 6. P. 659–666. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1314.1996.00048.x>
- Carte géologique et géotectonique du Hoggar, au 1:1000000 // DIRECTION mines et la géologie, service géologique de L'Algérie, Société nationale de chercheurs et d'exploitations miniers, ALGER, 1977.
- Haddoum H. Etude structurale des terrains archéens du môle In-Ouazzal (Hoggar occidental, Algérie). Thèse de doct d'état IST/USTHB. 1992. 192 p.
- Hubbard B.E., Mack T.J., Thompson A.L. Lineament Analysis of Mineral Areas of Interest in Afghanistan. USGS Open. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2012. <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>
- Kumar C., Chatterjee S., Oommen T. Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India // International Journal of Remote Sensing. 2020. Vol. 41. № 2. P. 794–812. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>
- Liégeois J.P., Benhallou A., Azzouni-Sekkal A., Yahiaoui R., Bonin B. The Hoggar swell and volcanism: Reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. Plates, plumes, and paradigms // Boulder, Colorado, U. S.: Special Paper of the Geological Society of America. 2005. Vol. 388. P. 379–400. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.379>

- Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y., et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003. 108 (D17). <https://doi.org/10.1029/2002JD002903>
- Marignac C., Aissa D.E., Bouabsa L., et al.* The Hoggar Gold and Rare Metals Metallogenic Province of the Pan-African Tuareg Shield (Central Sahara, South Algeria): An Early Cambrian Echo of the Late Ediacaran Murzukian Event? // *Mineral Deposits of North Africa. Mineral Resource Reviews*, 2016. P. 371–404. DOI: 10.1007/978-3-319-31733-5_15.
- Masoud A.A., Koike K.* Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // *Tectonophysics*. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., et al.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // *Polar Sci*. 2018. № 16. P. 23–46. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- Rabah B., Djamel Eddine A.* Characteristic features of the in Abeggui gold deposit (Hoggar shield, South Algeria) // *International Journal of Recent Scientific Research*. V. 11. Is. 12 (B). P. 40249–40251. DOI: <http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.2020.1112.5658>.
- Roy D.P., Wulder M., Loveland T.R., et al.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // *Remote Sensing of Environment*. 2014. 145. P. 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Saad W., Aissa D.E., Watanabe K., Taguchi S.* Gold deposits associated with the gabbroic rocks at Tirek area, western Hoggar, Algeria: fluid inclusion study // *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. 11:26. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3366-5>
- Teillet P.M., et al.* Radiometric normalization of surface reflectance data in the visible and near-infrared domains from EO-1 Hyperion // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1982. (3). P. 354–366.
- Thannoun R.G.* Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // *Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin*. 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319–7463.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // *Indonesian Journ. of Geography*. 2019. 51, 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Wilson J.P., Gallant J.C.* Terrain analysis: principles and applications // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Zaba J.* Structural evolution of west Hoggar and Adrar des Ifras in Pan-African Orogeny (Central Sahara and Mali); a copilation // *Geological problems of North-West Africa. Technika Poszukiwań Geologicznych*. 1992. Vol. 31. P. 45–56.
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *J. Photogramm. Remote Sens.* 2007. Vol. 62. P. 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.04.004>
- Zhang Y., Zhao H., Ni J.* A comparison of four atmospheric correction algorithms for Landsat-8 OLI imagery in varying landscapes // *Remote Sensing*. 2017. 9(3), 233. <https://doi.org/10.3390/rs9030233>

Mapping of Hydrothermal-Metasomatic Alterations for Forecasting Gold Mineralization Based on Processing of the Landsat 8 Remote Sensing Spacecraft Dataset in the Ahaggar Shield (Southern Algeria)

Yu. N. Ivanova^{1,2}, F. Gugali²

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

Mapping of hydrothermal-metasomatic alterations in the Ahaggar, Southern Algeria, was first performed using the Landsat 8 satellite imagery. This area is promising for gold mineralization. The objective of the study was to identify similar patterns in the distribution of hydrothermal-metasomatic alterations to develop forecast and exploration criteria for the gold ore type of mineralization. Thus, it was established that the areas in the Ahaggar Shield promising for gold mineralization localized along and/or inside the transregional fault zone, which controls ore mineralization confined to the periphery of large morphostructures (400 to 800 km in diameter) of the 1st order. Such morphostructures should be complicated by ring, arc structures of the 2nd and higher ranks and faults of NNW and NNE strikes with a length of more than 100 km, or weakened zones along which intrusions of dikes of medium (gabbro-diorites, diorites) composition associated with gold ore mineralization are recorded. In addition, metasomatic halos of a significant area (more than 30 km²) with increased values of indices of oxides of di- (magnetite) and trivalent iron (hematite), and to a lesser extent oxides and hydroxides of iron (limonite) and hydroxyl- (Al-OH, Mg-OH), carbonate-containing minerals and oxides should be manifested in potentially ore-bearing volcanic structures.

Keywords: space images, gold mineralization, Southern Algeria, Landsat-8, principal component analysis, digital elevation model, lineaments, density scheme

REFERENCES

- Aïssa D. et al.* Les minéralisations aurifères du Hoggar (Sud Algérien) et leurs relations avec les zones de cisaillements lithosphériques // *Bull 217 du service géologique de l'Algérie*. 2002. Vol. 13. № 2. P. 93–115.
- Aïssa D., Marignac C.* Controls on gold deposits in Hoggar, Tuareg Shield (Southern Algeria) // *Journal of African Earth Sciences*. 2016. V. 127. P. 136–145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.002>
- Allègre C.J., Caby R.* Chronologie absolue du Précambrien de l'Ahaggar occidental // *CR Acad. Sci. Paris*. 1972. 275(D). P. 2095–2098.
- Ananyev Yu.S.* Gold-concentrating systems of the Southern folded frame of the West Siberian plate (on the example of Western Kalba): dis. doc. geol.-mineralog. sciences. Tomsk, 2017. 509 p.
- Auli E.* Regularities of localization and conditions of formation of gold mineralization of the Amesmesa deposit (Algerian Sahara): PhD thesis: Moscow. 2016. 20 p.
- Auly E., Belov S.V.* Geodynamic conditions of formation of gold mineralization of the In-Uzzal zone of the Algerian Sahara // *Noble, rare and radioactive elements in ore-forming systems: Proceedings of the All-Russian scientific conf. with international participation*. Novosibirsk. 2014. P. 37–56.
- Belov S.V., Kvinikadze M.S., Gasem S.* Taurida granites in the Algerian Sahara // *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series*. 1991. No. 10. Pp. 84–92.
- Belov S.V., Zverev S.N., Auly E.* Structure and mineralization of the Amesmesa deposit in the Algerian Sahara // *Exploration and protection of mineral resources*. 2015. No. 2. P. 11–17.
- Bertrand J.M.L.* Évolution polycyclique des gneiss précambriens de l'Aleksod serie (Hoggar Central, Sahara algerien): aspects structuraux, pétrologiques, géochimiques et géochronologiques // *Paris: Serv. Geol. CNRS*. 1974. № 19. 307 p.
- Black R., Latouche L., Liegeois J.P., Caby R., Bertrand J.M.* Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara) // *Geology*. 1994. Vol. 22. P. 641–644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0641:PADTIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0641:PADTIT>2.3.CO;2)
- Boissonnas J.* Les granites à structures concentriques et quelques autres granites tardifs de la chaîne pan-africaine en Ahaggar (Sahara Central) // *Paris: Serv. Geol. CNRS*, 1973. № 16. 270 p.
- Bondur V.G.* Space geoinformatics // *Prospects of Science and Education*. 2016. No. 1 (19). Pp. 17–21.
- Caby R.* A review of the In Ouzzal granulitic terrane (Tuareg Shield, Algeria): its significance within the Pan-African Trans-Saharan Belt; Special issue on the In Ouzzal granulite unit, Hoggar Algeria // *Journal of Metamorphic Geology*. 1996. Vol. 14. Is. 6. P. 659–666. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1314.1996.00048.x>
- Carte géologique et géologique du Hoggar, au 1:1000000 // *DIRECTION mines et la géologie, service géologique de l'Algérie, Société nationale de chercheurs et d'exploitations minières, ALGER*, 1977.
- Gorny V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A.* Features of the mineralogical zoning of ore-magmatic systems hosting quartz-vein gold deposits (based on satellite spectrometry data) // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2014. Vol. 11. No. 3. Pp. 140–156.
- Haddoum H.* Etude structurale des terrains archéens du môle In-Ouazzal (Hoggar occidental, Algérie). Thèse de doct d'état IST/USTHB. 1992. 192p.
- Hubbard B.E., Mack T.J., Thompson A.L.* Lineament Analysis of Mineral Areas of Interest in Afghanistan. USGS Open. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2012. <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>
- Ivanova Yu.N., Vykhristenko R.I., Vikentyev I.V.* Geological position and structural control of gold ore mineralization of the Malouralsky volcano-plutonic belt (Polar Urals) based on the results of analysis of multispectral images of the Landsat 8 spacecraft // *Exploration of the Earth from Space*. 2020. No. 4. P. 51–62. <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0205961420040089>
- Karakin A.V., Kuryanov Yu.A., Pavlenkova N.I.* Faults, fractured zones and waveguides in the upper layers of the earth's shell. Moscow: State Scientific Center of the Russian Federation – VNIIGeosistem, 2003. 222 p. (In Russia).
- Kryazhev S.G., Belov S.V., Ignatov P.A., Vasyuta Yu.V., Auli E.* Fluid regime of formation of the Amesmesa and Tirek gold-quartz deposits in the Algerian Sahara // *Ores and metals*. 2017. No. 1. P. 91–96.
- Kumar C., Chatterjee S., Oommen T.* Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India // *International Journal of Remote Sensing*. 2020. Vol. 41. № 2. P. 794–812. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>
- Liégeois J.P., Benhallou A., Azzouni-Sekkal A., Yahiaoui R., Bonin B.* The Hoggar swell and volcanism: Reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. Plates, plumes, and paradigms // *Boulder, Colorado, U. S.: Special Paper of the Geological Society of America*. 2005. Vol. 388. P. 379–400. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.379>
- Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y., et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003. 108 (D17). <https://doi.org/10.1029/2002JD002903>
- Marignac C., Aïssa D.E., Bouabssa L., et al.* The Hoggar Gold and Rare Metals Metallogenic Province of the Pan-African Tuareg Shield (Central Sahara, South Algeria): An Early Cambrian Echo of the Late Ediacaran Murzukian Event? // *Mineral Deposits of North Africa. Mineral Resource Reviews*, 2016. P. 371–404. DOI: 10.1007/978-3-319-31733-5_15
- Masoud A.A., Koike K.* Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // *Tectonophysics*. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B.* Analysis of the possibility of using digital elevation models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM for research of the Arctic territories of Russia // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. 17. No. 7. P. 117–127. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., et al.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern

- Victoria Land, Antarctica // *Polar Sci.* 2018. № 16. P. 23–46. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- Rabah B., Djamel Eddine A.* Characteristic features of the in Abeggui gold deposit (Hoggar shield, South Algeria) // *International Journal of Recent Scientific Research.* V. 11. Is. 12 (B). P. 40249–40251. DOI: <http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.2020.1112.5658>
- Roy D.P., Wulder M., Loveland T.R., et al.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // *Remote Sensing of Environment.* 2014. 145. P. 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Saad W., Aissa D.E., Watanabe K., Taguchi S.* Gold deposits associated with the gabbroic rocks at Tirek area, western Hoggar, Algeria: fluid inclusion study // *Arabian Journal of Geosciences.* 2018. 11:26. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3366-5>
- Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Gromtsev K.V.* Remote assessment of gold-bearing potential // *Ores and metals.* 2008. No. 1. P. 45–51.
- Space information in geology. Moscow: Nauka, 1983. 536 p. (In Russia).
- Teillet P.M., et al.* Radiometric normalization of surface reflectance data in the visible and near-infrared domains from EO-1 Hyperion // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1982. (3). P. 354–366.
- Thannoun R.G.* Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // *Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin.* 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319–7463.
- Thomson I.N., Kravtsov V.S., Kochneva N.T., Seredin V.V., Seliverstov V.A.* Metallogeny of hidden lineaments and concentric structures. M.: Nedra, 1984. 272 p.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // *Indonesian Journ. of Geography.* 2019. 51, 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Wilson J.P., Gallant J.C.* Terrain analysis: principles and applications // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Zaba J.* Structural evolution of west Hoggar and Adrar des Ifras in Pan-African Orogeny (Central Sahara and Mali); a compilation // *Geological problems of North-West Africa. Technika Poszukiwań Geologicznych.* 1992. Vol. 31. P. 45–56.
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *J. Photogramm. Remote Sens.* 2007. Vol. 62. P. 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.04.004>
- Zhang Y., Zhao H., Ni J.* A comparison of four atmospheric correction algorithms for Landsat-8 OLI imagery in varying landscapes // *Remote Sensing.* 2017. 9(3), 233. <https://doi.org/10.3390/rs9030233>