
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДЕТАЛЬНОГО ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ КА LANDSAT-8: НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ, РОССИЯ

© 2023 г. И. О. Нафигин^а, *, В. Т. Ишмухаметова^а, С. А. Устинов^а, В. А. Минаев^а, В. А. Петров^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, Россия

*E-mail: estera-st@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

В работе рассматривается пригодность использования мультиспектральных данных дистанционного зондирования спутника Landsat-8 для проведения регионального геолого-минералогического картирования территории Юго-Восточной Забайкалья (Россия) в условиях средне-низкогорного рельефа и континентального климата. Для повышения спектральной информативности спутниковых данных Landsat-8 использованы статистические алгоритмы обработки, включающие: метод анализа главных компонент (PCA), минимальной доли шума (MNF) и независимого компонентного анализа (ICA). Результаты статистической обработки были сопоставлены с классами геологических материалов: минералы группы оксидов/гидроксидов, содержащие переходные ионы железа (Fe^{3+} и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$); группа глинистых минералов, содержащих $\text{Al}-\text{OH}$ и Fe , $\text{Mg}-\text{OH}$; минералы, содержащие двухвалентный ион железа (Fe^{2+}) и растительный покров. Сгенерированы и проинтерпретированы псевдоцветные RGB композиты, отражающие распределение и мультипликацию классов геологических материалов. Для построения схемы перспективности на обнаружение полезных ископаемых была произведена интеграция информативных тематических слоев с использованием модели нечеткой логики. Полученная схема сопоставлена с геологической информацией и сделаны положительные выводы о пригодности территории для проведения дальнейших дистанционных исследований по картированию гидротермально измененных зон и продуктов гипергенеза с целью локализации участков, перспективных на выявление гидротермально-метасоматической минерализации.

Ключевые слова: Landsat-8, геолого-минералогическое картирование, статистические методы, дистанционное зондирование земли, гидротермальная минерализация, прогнозно-поисковые работы

DOI: 10.31857/S0205961423010086, **EDN:** MNATCH

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений повышения эффективности прогнозно-поисковых работ на твердые полезные ископаемые является применение современных методов и технологий с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Кирсанов и др., 2019; Смирнова и др., 2020). Осуществление комплекса прогнозных работ с помощью дистанционных методов выполняется последовательно в соответствии с традиционным подходом к изучению территорий — от региональных к крупномасштабным работам (Сахновский и др., 2009). В работе рассматривается первый этап прогнозно-поискового комплекса работ с применением дистанционных методов, соответствующий региональному уровню исследований. На данном этапе примене-

ние различных статистических методов обработки данных ДДЗ направлено на оценку пригодности использования материалов мультиспектральной спутниковой съемки Landsat-8 для геолого-минералогического картирования при геоморфологических, климатических и почво-растительных условиях, свойственных исследуемой территории.

Исследуемая территория Юго-Восточного Забайкалья имеет широкий металлогенический потенциал (Au , U , Mo , $\text{Pb}-\text{Zn}$, Sn , W , Ta , Nb , Li , флюорит) и является перспективной на обнаружение новых гидротермальных месторождений твердых полезных ископаемых. В связи с тем, что площадь данной территории достаточно обширна и составляет более 50 тыс. кв. км, проведение на ней детальных полевых прогнозно-поисковых работ в сложных климатических условиях экономически затратно. По этой причине необходимо

рассмотреть различные доступные дистанционные подходы к картированию, классификации и идентификации классов геологических материалов, а также к выявлению индикаторов геологических процессов, с целью локализации перспективных участков на рудную минерализацию гидротермальной и гипергенной природы.

В настоящее время теме геологического картирования по снимкам Landsat-8 посвящено множество публикаций (Amer et al., 2010; Clark and Swayze, 1995; Colby, 1991; Corumluoglu et al., 2015; Gabr et al., 2010; Inzana et al., 2003; Lawrence et al., 2005; Mars and Rowan, 2011; Rockwell and Hofstra, 2008; Pour et al., 2018a, 2018b; Pour and Hashim, 2015; Rajendran and Nasir, 2019). Однако в связи с пространственным разрешением и спектральным диапазоном данных Landsat-8, а также с геологическими, географическими и климатическими условиями территории, геологическое дешифрирование сводится к картированию мафических, кислых, силикатных горных пород, глинистых (Al—ОН и Fe, Mg—ОН) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов, а также минералов группы оксидов/гидроксидов, содержащих переходные ионы железа (Fe^{3+} и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория располагается в Юго-Восточной части Забайкальского края (Россия) и простирается с запада на восток между долинами рек Онон и Аргунь, а с севера на юг между долиной реки Газимур и государственными границами страны с Китаем и Монголией. Административно Юго-Восточная часть Забайкалья включает Борзинский, Забайкальский, Краснокаменский, Приаргунский, Александрово-Заводский, Калганский, Нерчинско-Заводский и Газимуро-Заводский муниципальные районы (рис.1) (Новикова, 2014). Тектоническая позиция территории определяется ее положением на стыке Сибирского кратона и Монголо-Охотской складчатоглыбовой области (Ищукова и др., 1998).

Рельеф территории преимущественно средне-низкогорный, в основном представлен хребтами, разделенными обширными впадинами и широкими долинами многочисленных рек. Средняя высота над уровнем моря составляет около 700 м. Равнинные формы рельефа имеют подчиненное значение и приурочены в основном к межгорным понижениям. Горные территории в основном труднодоступные, поэтому межгорные понижения заняты земельным фондом, на котором базируется сельскохозяйственные угодья. Климат резко континентальный. Господство антициклонного состояния атмосферы обуславливает большое количество солнечных дней. Среднегодовая температура воздуха составляют -1°C .

Геологическое строение исследуемого района весьма сложное и характеризуется продолжительным развитием разновозрастных, разнообразных по составу и генезису образований, залегание которых осложнено складчатыми и разрывными нарушениями.

Упрощенная версия детальной геологической карты миллионного масштаба (Шивохин и др., 2010) представлена на рис. 2.

Геологические структуры и рудовмещающие вулканоплутонические комплексы Южного Приаргуны эволюционировали в течение протерозойского (завершился около 600 млн лет назад), каледонского (~520–410 млн лет назад) и герцинского (~360–210 млн лет назад) тектономагматических циклов, в процессе тектономагматической активизации в позднем мезозое (~160–100 млн лет назад) и на неотектоническом этапе развития региона. Позднемезозойская тектономагматическая активизация наиболее продуктивна по проявлению рудогенетических процессов, определивших металлогенический облик территории (Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020).

Вулканические толщи позднемезозойского вулканизма, сложенные преимущественно трахибазальтами, базальтами, трахиандезитами, андезитами, трахириолитами, риолитами и диоритпорфиритами, получили распространение в основном в локальных структурах, возникших как в пределах крупных впадин, так и в поднятиях между ними. Таким образом, осадочно-вулканогенные комплексы пород позднемезозойского активизационного этапа, слагающие грабенообразные впадины и локальные вулканотектонические структуры, составляют верхний структурный этаж, который образовался на протерозой-палеозойском гранит-метаморфическом фундаменте, слагающим нижний этаж.

После завершения вулканизма вдоль долгоживущих тектонических структур проявились многостадийные гидротермальные процессы, сформировавшие рудные месторождения, а в узлах пересечения долгоживущих глубинных разломов, образовались крупные рудные узлы золото-порфировой, молибден-медно-порфировой, золото-сульфидной, полиметаллической, флюоритовой и молибден-урановой минерализации.

Основным фактором, определяющим размещение месторождений полезных ископаемых, в пределах исследуемой территории, является литолого-структурный, т.к. месторождения в основном приурочены к линейным зонам разрывных нарушений разного порядка и узлам пересечения долгоживущих глубинных зон разломов северо-восточного простираения с зонами разломов северо-западного, меридионального и широтного простираций (Ищукова и др., 1998).

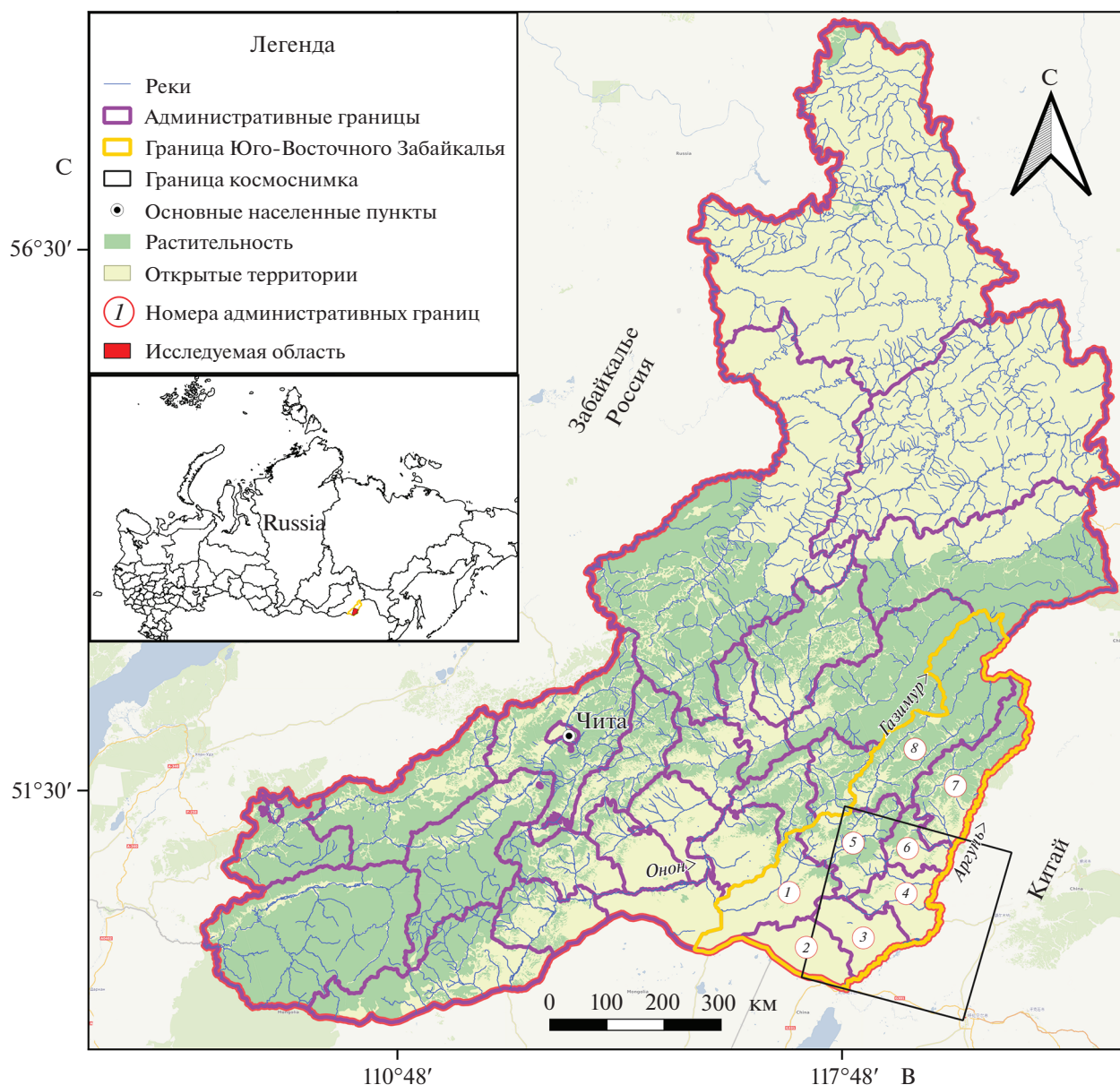


Рис. 1. Картограмма Забайкальского края, Россия (Нафигин и др.). Муниципальные районы: 1 – Борзинский; 2 – Забайкальский; 3 – Краснокаменский; 4 – Приаргунский; 5 – Александрово-Заводский; 6 – Калганский; 7 – Нерчинско-Заводский; 8 – Газимуро-Заводский.

Также заметная роль в образовании и размещении месторождений полезных ископаемых принадлежит гипергенным процессам. Ими обусловлены некоторые качественные и количественные характеристики руд на отдельных объектах. В первую очередь это касается россыпей золота и других металлов, значительной части месторождений строительных материалов, а также некоторых коренных месторождений металлических полезных ископаемых. В результате процессов гипергенеза на исследуемой территории были сформированы площадные и линейные коры вы-

ветривания, зоны окисления сульфидных месторождений и железные шляпы, а также образовались россыпи минералов, устойчивых к процессам выветривания. В качестве металлотектов, контролирующих размещение полезных ископаемых, рассматриваются железные шляпы и линейные коры выветривания, развивающиеся преимущественно по линейным зонам разрывных нарушений разного порядка (Шивохин и др., 2010).

Несмотря на относительно высокую опойсываемость, ранее проведенные исследования ука-

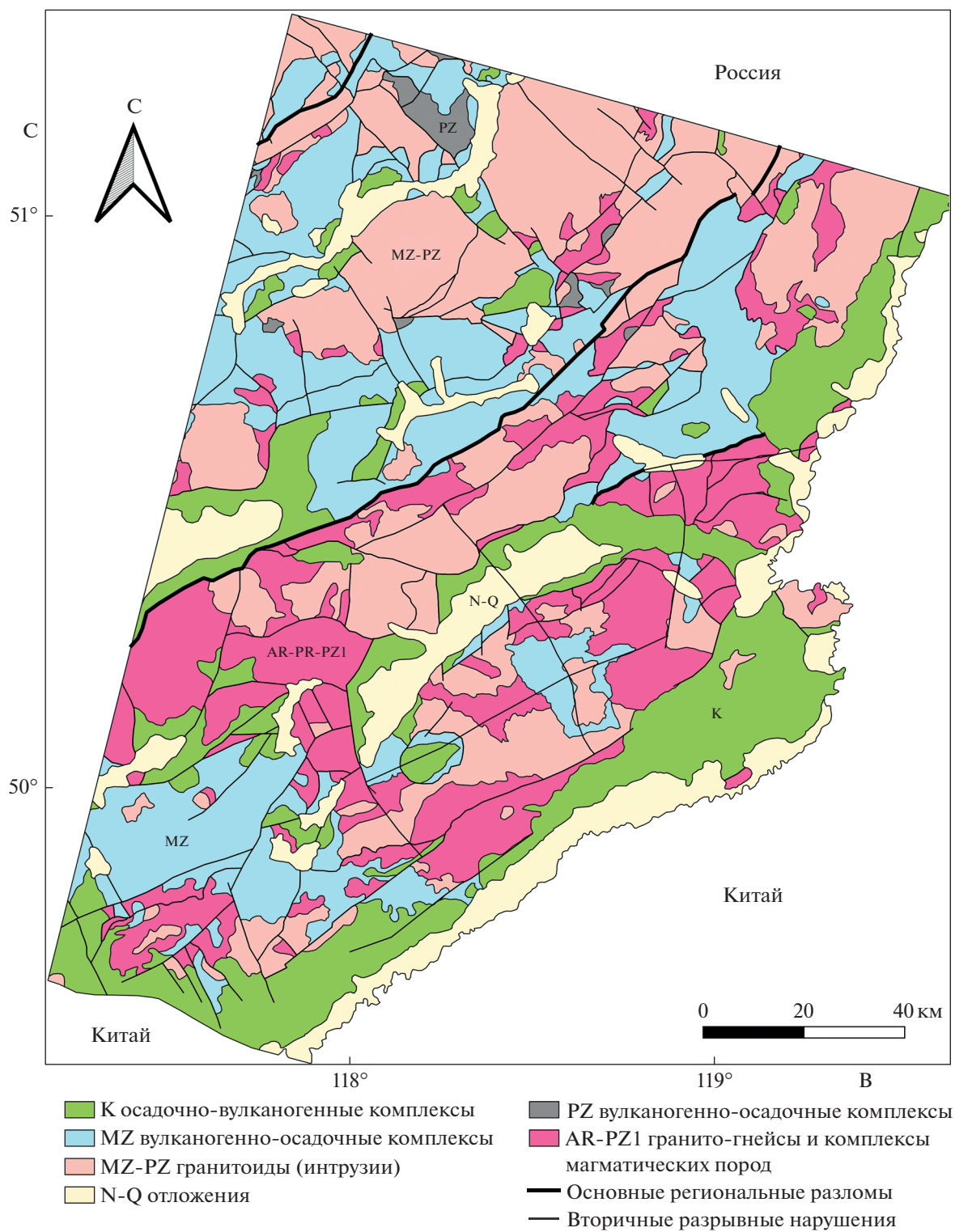


Рис 2. Схема геологического строения района исследования (модификация (Шивохин и др., 2010)).

зывают на то, что рассматриваемая территория имеет хорошие перспективы наращивания минерально-сырьевой базы по многим видам полезных ископаемых.

ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Характеристика спутниковых оптических данных. Landsat-8 запущен 11 февраля 2013 года и является восьмым в серии спутников (<http://sci->

ence.nasa.gov/missions/ldcm). На Landsat-8 установлено 2 сенсора OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infra-Red Sensor). OLI-сенсор собирает данные для восьми коротковолновых спектральных каналов с пространственным разрешением 30 метров и 15 метрового панхроматического канала: канал 1 — глубокий синий (0.43–0.45 μm), канал 2 — синий (0.45–0.51 μm), канал 3 — зеленый (0.53–0.59 μm), канал 4 — красный (0.64–0.67 μm), канал 5 — ближний инфракрасный (0.85–0.88 μm), канал 6 — коротковолновый инфракрасный (1.57–1.65 μm), канал 7 — коротковолновый инфракрасный (2.11–2.29 μm), канал 8 — панхроматический (0.50–0.68 μm), и канал 9 — перистые облака (Cirrus) (1.36–1.38 μm). 1 — канал OLI сенсора используется в основном для наблюдений за окрасом океана в прибрежных зонах, а 9 коротковолновый инфракрасный канал OLI сенсора позволяет обнаруживать перистые облака (Cirrus), т.к. он захватывает сильную спектральную функцию поглощения водяного пара (Irons et al., 2012). TIRS-сенсор собирает данные изображения для двух тепловых каналов: канал 10 (10.60–11.19 μm) и канал 11 (11.50–12.51 μm) с пространственным разрешением 100 м. Кроме каналов OLI и TIRS сенсоров в наборе данных Landsat-8 OLI присутствует канал “оценка качества”, представляющий собой побитно упакованные данные о поверхностных, атмосферных и сенсорных условиях съемки, которые могут повлиять на общую полезность данного пикселя (Acharya and Yang, 2015).

Данные Landsat-8 OLI собираются полосой захвата в 185 километров и сегментируются на сцены размером 185×180 км, имеют высокое отношение сигнала к шуму и 12-битное квантование данных, что позволяет измерять тонкую изменчивость отражения земной поверхности, что целесообразно для регионального геологического картирования (Irons et al., 2012).

Предобработка спутниковых оптических данных. Для данного исследования из Информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных дистанционного зондирования Земли (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>) на дату 21 октября 2017 г. было получено дневное безоблачное изображение Landsat-8 уровня обработки 1T (с поправкой на рельеф) LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (path/row 165/13), покрывающее исследуемую территорию. Полученный продукт является ортотрансформированным и его картографическая проекция определена в 50 зоне Универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM) с использованием датума всемирной системы геодезических параметров Земли 1984 г. (WGS84).

Предобработка спутниковых данных для проведения геолого-минералогического картирова-

ния была выполнена авторами наряду с современным мировым опытом (Sekandari et al., 2022; Wambo et al., 2020; Pour and Hashim, 2015):

- для калибровки исходных цифровых значений (DN) изображения к отражающей способности дневной поверхности земли (диапазон от 0 до 1) применен алгоритм быстрого атмосферного анализа спектрального гиперкуба в пределах прямой видимости (FLAASH) (Cooley et al., 2002) с использованием субарктической летней атмосферной и сельской аэрозольной моделей MODTRAN (Berk et al., 1989);

- на основе канала “оценка качества” произведена изоляция пикселей, которые могут внести погрешности в дальнейшую обработку изображения;

- рассчитаны Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) (Rouse et al., 1973) и Нормализованный относительный индекс воды (NDWI) (Gao, 1996) с целью маскировать растительный и водный покров дневной поверхности, т.к. области земной поверхности с преобладанием сильного (интенсивного) растительного и водного покрова делают невозможным оценку уникального спектрального вклада горных пород и почв в пиксель изображения;

- вырезана исследуемая область.

Композитное изображение в псевдоцветах. Для дешифрирования земной поверхности широко используются различные цветовые комбинации спутниковых снимков, полученных в VNIR, SWIR и TIR спектральных диапазонах. Однако среди множества свободно доступных спутниковых оптических данных для проведения геологического картирования успешно себя зарекомендовали данные Landsat (Mwaniki et al., 2015). Композитное изображение в ложных цветах (FCC) является одним из лучших способов интерпретации растровой информации, полученной в различных диапазонах электромагнитного спектра (как видимого, так и не видимого), с использованием аддитивной RGB-модели (Richards and Xipring, 2006). Цветовые композиты набора данных Landsat в основном используются для распознавания классов материалов таких как, горные породы, растительность и водные объекты (Chukwu et al., 2013). Для литологического картирования, создание композита ложного цвета (FCC) основано на комбинации коллективно наименее коррелированных спектральных каналов, отражающих уникальные спектральные характеристики поглощения и отражения различных горных пород и минералов (Sabins, 2007). Полученные комбинации спектральных каналов позволяют различать области с различными структурами, литологическими разностями и минералами, которые характеризуются на полученном FCC изображении различными цветами и их градиентами. Цвет-

Таблица 1. Матрица собственных векторов, полученная в ходе PCA трансформации

Собственные векторы	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5	Канал 6	Канал 7
PC1	–0.0495	–0.0650	–0.1497	–0.2377	–0.4534	–0.6808	–0.4953
PC2	0.4064	0.4415	0.4805	0.4465	0.0958	–0.0443	0.0636
PC3	–0.1689	–0.1306	–0.0420	0.0887	0.8011	–0.1440	–0.5313
PC4	–0.1444	–0.2034	–0.1624	–0.2091	0.3025	–0.5585	0.6814
PC5	0.5881	0.3506	–0.1666	–0.6658	0.2266	0.0788	–0.0507
PC6	0.5190	–0.2626	–0.6596	0.4748	–0.0200	–0.0258	0.0079
PC7	0.4096	–0.7420	0.5057	–0.1544	–0.0130	0.0207	–0.0388

товая гамма одной и той же комбинации может отличаться для каждой исследуемой территории, что в свою очередь связано с различными обстановками осадконакопления и минеральным составом горных пород (Bishta, 2009).

В рамках нашего исследования был подобран RGB композит из 2, 5 и 7 каналов Landsat-8, являющийся наиболее информативным для регионального картирования различных геологических формаций в пределах Юго-Восточного Забайкалья.

Анализ главных компонент. Анализ главных компонент (PCA) является статистическим методом, преобразующим набор коррелированных данных в набор некоррелированных линейных данных, которые называются “главными компонентами” (PCs) (Ruiz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998; Ourhizif and Algouti, 2019). Он может быть основан как на ковариационной, так и на корреляционной матрице (Pour and Hashim, 2016). PCA широко применяется для геолого-минералогического картирования территорий на основе спектральных особенностей материалов на дневной поверхности, зафиксированных сенсорами дистанционного зондирования (Pour and Hashim, 2016). Как правило, набор данных, преобразованный этим методом, обычно сохраняет до 97% информации исходного набора данных (Kruse et al., 1993). Основной целью данного преобразования является максимизация отношения сигнал/шум для повышения надежности выделения объектов дневной поверхности по их спектральным характеристикам.

Некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственных векторов) первых семи каналов Landsat-8 содержат информацию, связанную с Fe^{3+} , Fe^{2+} (гематит, ярозит и др.), Al/Fe-OH (биотит, серицит и др.), Mg-Fe-OH (хлорит, эпидот и др.), CO_3^{2-} (кальцит, доломит и др.) и Si-OH (опал/халцедон и др.) группами минералов. Эта информация может быть извлечена из спектральных каналов ближнего (VNIR), коротковолнового (SWIR) и теплового (TIR) инфракрасных

диапазонов (Loughlin, 1991; Pour and Hashim, 2016). Как правило, PCs с сильными нагрузками собственных векторов в определенных спектральных каналах характеризуют отражательную и поглощающую способность указанных ранее групп минералов противоположными знаками. Положительная нагрузка в спектральном канале подчеркивает группу минералов в виде ярких пикселей, в то время как отрицательная нагрузка отображает группу минералов в виде темных пикселей (Loughlin, 1991).

Метод PCA был применен к семи каналам Landsat-8 (1–7), используя ковариационную матрицу. В табл. 1 представлена матрица собственных векторов для выбранных каналов Landsat-8 (1–7), полученная при PCA трансформации.

Метод главных компонент с предварительной нормализацией шума. Метод главных компонент с предварительной нормализацией шума (MNF) — хорошо известная технология обработки мультиспектральных и гиперспектральных изображений, уменьшающая и отделяющая шумовые компоненты (Green et al., 1988). MNF является линейным преобразованием и состоит из двух последовательных PCA трансформаций. Первая трансформация использует ковариационную матрицу шумов для декорреляции и перемасштабирования шумовых компонент. Данные, имеющие единичную дисперсию и не имеющие межканальной корреляции, рассматриваются как шум и отделяются от остальных данных. На следующем этапе к изолированным от шумов данным применяется стандартная PCA трансформация, целью которой является повторный пересмотр среднеквадратических отклонений шумовых компонент. Подобно изображениям PC, MNF изображения также упорядочиваются в соответствии с максимальной изменчивостью данных с отличием в том, что PCs упорядочиваются в соответствии с уменьшением дисперсии, а MNFs в соответствии с уменьшением уровня полезного сигнала.

В табл. 2 представлена матрица собственных векторов первых семи каналов Landsat-8 (1–7), полученная при MNF трансформации.

Таблица 2. Матрица собственных векторов, полученная в ходе MNF трансформации

Собственные векторы	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5	Канал 6	Канал 7
PC1	–0.0824	–0.1040	–0.1910	–0.2730	–0.4650	–0.6520	–0.4800
PC2	0.2390	0.2730	0.3450	0.4040	0.5100	–0.0455	–0.3440
PC3	0.3680	0.3430	0.3500	0.2260	–0.6300	–0.1410	0.3960
PC4	0.2160	0.1880	0.0786	0.0844	–0.2680	0.5880	–0.6970
PC5	0.5890	0.3820	–0.2830	–0.6080	0.2290	–0.0178	0.0768
PC6	–0.4570	0.3190	0.6370	–0.5290	0.0414	0.0363	–0.0330
PC7	0.4450	–0.7170	0.4800	–0.2350	0.0311	0.0154	–0.0291

Независимый компонентный анализ. Независимый компонентный анализ (ICA) является статистическим методом, извлекающим независимые компоненты (источники) из многомерного сигнала за счет разложения наблюдаемых случайных переменных в линейную комбинацию независимых случайных компонент (Comon, 1994). В основе данного подхода лежат два основных предположения: 1) распределение компонентов, составляющих сигнал, отлично от нормального, т.е. негауссово; 2) компоненты статистически независимы друг от друга. ICA по своей формулировке близок к PCA, но в отличие от него он направлен на поиск набора независимых, а не ортогональных компонент. Также он использует статистику более высокого порядка и может различать интересующие объекты даже тогда, когда они занимают лишь небольшую часть пикселей изображения (Adiri et al., 2019).

С целью обособления максимально независимых пикселей, связанных с минералами гидротермальной природы и продуктами гипергенеза, ICA анализ был применен к результатам PCA трансформации, т.е. к семи изображениям главных компонент. Полученные результаты были проанализированы на основе статистических коэффициентов, двумерных диаграмм рассеяния и их визуального анализа.

Моделирование на основе нечеткой логики. Моделирование на основе нечеткой логики основано на теории нечеткой логики, предложенной L.A. Zadeh (Zadeh, 1965). Это форма неоднозначной логики, в которой переменные могут принимать любые вещественные (действительные) значения в диапазоне от 0 до 1 включительно (Novák et al., 1999). Моделирование на основе нечеткой логики успешно применяется для построения схем распределения перспективных областей на рудную минерализацию в пределах металлогенических провинций (Ghanbari et al., 2012; Kim et al., 2019). Моделирование на основе нечеткой логики для картирования перспективных зон на обнаружение полезных ископаемых обычно состоит из трех последовательных этапов: 1) фаззификация

фактических данных; 2) логическая интеграция фаззифицированных фактических данных при помощи сети вывода и подходящего нечеткого оператора; 3) дефаззификация полученных результатов с целью облегчения их интерпретации (Carranza, 2008). Результатом первого этапа является набор значений нечеткого множества, выражающегося в виде непрерывного ряда от 0 до 1. Значение 0 означает отсутствие принадлежности к определенному нечеткому множеству, а значение 1 – полную принадлежность. В промежутке степень принадлежности значений соответствует выбранной функции множества. Фаззификация производится для каждой фактической карты, которая в дальнейшем будет подлежать интегрированию. При интегрировании методом нечеткой логики взвешивается весь фаззифицированный набор данных на основе значений расстояний между объектами и каждому пикселю или пространственному положению назначается определенный вес в диапазоне от 0 до 1 (Carranza, 2008).

Для логической интеграции наборов данных, используемых при поиске полезных ископаемых, обычно используются пять типов наложений: Нечеткое И (AND), Нечеткое ИЛИ (OR), Нечеткое произведение (Product), Нечеткая сумма (Sum) и Нечеткая гамма (Gamma) (Bonham-Carter, 1994).

В табл. 3 приведен перечень входных слоев и параметры фаззификации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Композитное изображение в ложных цветах. Цветной RGB композит из 2, 5 и 7 (рис. 3) спектральных каналов Landsat-8 отображает классы геологических материалов, имеющих спектральные характеристики, связанные с оксидами/гидроксидами железа (Fe^{3+} и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$), а также с глинистыми (Al-OH и Fe, Mg-OH) и карбонатными (CO_3^{2-}) минералами. Данное утверждение основано на том, что минералы группы оксидов/гидроксидов железа имеют тенденцию к сильному поглощению в диапазоне от 0.4 до

Таблица 3. Параметры фаззификации для выбранных тематических слоев

Исходные данные	Входные слои	Диагностируемая группа минералов	Функция множества	Нечеткий оператор
Набор данных КА ДЗЗ Landsat-8 (VNIR-SWIR)	PC4	Глинистые и карбонатные минералы	Линейная	И
	MNF4			
	IC2			
	PC5	Минералы, содержащие оксиды/гидроксиды железа		
	MNF5			
	IC3			
	PC3	Геоботаническая аномалия и минералы с содержанием второго иона железа (Fe ²⁺)		
	MNF3			
	IC5			

1.1 μm (особенности поглощения Fe^{3+} от 0.45–0.90 μm , а Fe^{2+} от 0.90–1.2 μm) (Hunt and Ashley, 1979), что соответствует 2, 4 и 5 каналам Landsat-8. Глинистые (Al–OH and Fe, Mg–OH) и карбонатные (CO_3^{2-}) минералы имеют спектральные особенности поглощения в диапазоне от 2.1 до 2.4 μm , а отражательные в диапазоне от 1.55–1.75 μm (Hunt and Ashley, 1979), что соответствует 7 и 6 каналам Landsat-8 соответственно. Тем самым, данная цветовая комбинация хорошо подчеркивает текстурные характеристики магматических горных пород, отличая их от осадочных (Ourhizif and Algouti, 2019).

Также, следует отметить, что 5 канал чувствителен и к растительному покрову. Это позволяет отличать районы с высокой растительностью от гидротермально измененных зон. Особенности поглощения растительного покрова находятся в диапазоне 0.45–0.68 μm , а высокая отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне от 0.7 до 1.2 μm (Ruiz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998).

Визуальный анализ полученного псевдоцветного изображения показывает, что на основе определенных групп минералов исследуемую территорию можно условно разделить на северо-восточную и юго-западную части. Юго-западная часть характеризуется обильным пространственным распределением минералов класса оксида/гидроксида трехвалентного железа с примесью группы глинистых минералов (синий, фиолетовый, бледно-зеленый оттенки на рис. 3), а северо-восточная часть обладает равномерным пространственным распределением группы глинистых минералов с примесью минералов класса оксида/гидроксида двухвалентного железа. Растительный покров (плотный зеленый цвет) в основном приурочен к наиболее расчлененному и высокогорному рельефу территории.

Сверяясь с геологической картой (Шивохин и др., 2010), можно сделать вывод, что такое разделение классов геологических материалов на композитном RGB изображении, вероятно, связано с разновозрастными осадочными (алевролиты, песчаники, аргиллиты, конгломераты, туфопесчаники, глины, суглинки и т.д.), магматическими (граниты, гранодиориты, граносиениты и т.д.) и метаморфическими (гнейсы, плагиогнейсы, гнейсо-граниты, амфиболиты, кристаллические сланцы, милониты и т.д.) горными породами, а также с процессами выполаживания территории преимущественно в ее юго-западной части. Магматические и метаморфические породы на RGB композите (см. рис. 3) выражены идентичными цветовыми характеристиками, что говорит о схожести их химического состава и в текущем исследовании рассматриваются как единый класс геологических материалов.

Основываясь на выявленных классах геологических материалов, структурно-геоморфологических предпосылках, геолого-ландшафтных условиях, наличии сельскохозяйственных угодий, цветовой гамме и градиентных переходах, подчеркивающих геологические границы, на основе псевдоцветного RGB композита было выделено 16 геолого-морфологических структур (см. рис. 3), связанных, согласно геологической карте (Шивохин и др., 2010), преимущественно с гранит-гранодиоритовыми и гранито-гнейсовыми комплексами.

Метод главных компонент. Анализ статистических данных, полученных при проведении PCA трансформации над VNIR и SWIR спектральными каналами Landsat-8 (см. табл. 1) показывает, что PCs могут рассматриваться как весомые показатели: растительного покрова; группы минералов с содержанием двухвалентного иона железа (Fe^{2+}); минералов группы оксидов/гидроксидов железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}); группы глинистых (Al–OH и Fe, Mg–OH) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов. В табл. 3 представлены значения нагрузки

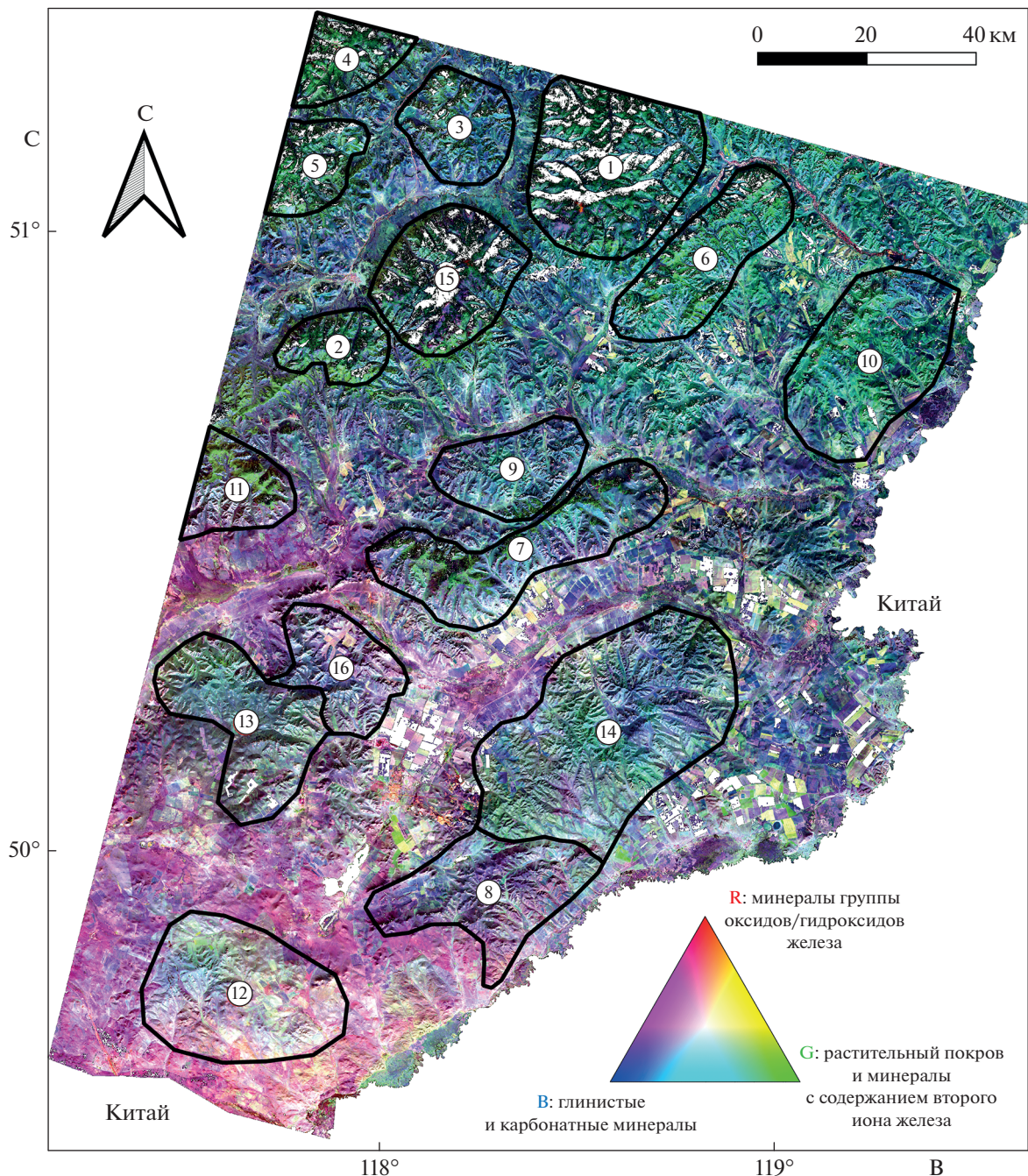


Рис. 3. Псевдоцветное RGB композит из 2, 5 и 7 каналов Landsat-8. 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

собственных векторов для каждого PCs. Анализируя значение и знак нагрузки собственного вектора в PCs можно определить, что PC1 содержит отрицательную нагрузку во всех каналах. Это свидетельствует о том, что ни один из каналов не внес уникального вклада в формирование PC1, следовательно, он не может быть идентифицирован.

PC2 показывает умеренную и слабую положительную нагрузку практически во всех каналах кроме 6, имеющего очень слабую отрицательную нагрузку (-0.0443). На основе этого можно сделать вывод, что группа гидроксилсодержащих ($\text{Al}-\text{OH}$ и $\text{Fe}, \text{Mg}-\text{OH}$) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов проявляется на изображении PC2 в виде

темных пикселей из-за отрицательной нагрузки в 6 канале. Для удобства визуализации темные пиксели были инвертированы в светлые путем переключения значений матрицы на -1.

PC3 содержит сильную положительную нагрузку в 5 канале (0.80112) и умеренную отрицательную нагрузку в 7 канале (-0.5313), а вклад остальных каналов в формирование PC3 слаб и умерен. Следовательно, PC3 отображает полезную информацию, связанную с растительным покровом и группой Fe^{2+} минералов, в виде ярких пикселей.

PC4 имеет умеренную нагрузку в 6 (-0.5585) и сильную в 7 (0.6814) каналах с противоположными знаками. Учитывая, что нагрузка в 6 канале достаточно умеренная, а отрицательный вклад других каналов слаб, темные пиксели PC4 можно рассматривать как более надежные индикаторы группы гидроксилсодержащих (Al-OH и Fe , Mg-OH) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов по сравнению с пикселями PC2. Темные пиксели в PC4 были преобразованы в светлые за счет перемножения их на -1.

Собственные вектора PC5 имеют сильную отрицательную нагрузку в 4 канале (-0.6658) и умеренную положительную нагрузку в 1 канале (0.5881). При этом нагрузка остальных каналов проявлена слабо. Следовательно, группа минералов, содержащих оксиды/гидроксиды железа (Fe^{3+} и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$) определяется в PC5 в основном темными пикселями. С целью преобразования темных пикселей в светлые, их значения были помножены на -1.

Величины и знаки нагрузок собственных векторов для PC6 и PC7 (см. табл. 1) не указывают на наличие уникальных вкладов каналов Landsat-8 в их формирование, которые, как ожидалось, должны отражать гидротермально измененные горные породы и продукты гипергенеза.

На основе анализа матрицы нагрузок собственных векторов были выбраны компоненты PC4, PC5 и PC3 для формирования RGB композита (рис. 4). В R-канал был помещен PC4 (группа гидроксилсодержащих (Al-OH и Fe , Mg-OH) и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов), в G-канал PC5 (группа минералов, содержащих оксиды/гидроксиды железа), а в B-канал PC3 (растительный покров и группа минералов, содержащих двухвалентный ион железа).

Метод главных компонент с предварительной нормализацией шума. По аналогии с PCA трансформацией, исходными данными для MNF послужили первые семь каналов Landsat-8. Поэтому, полученные результаты также могут быть рассмотрены как карты распределения растительного покрова и группы минералов с содержанием двухвалентного иона железа, минералов

группы оксидов/гидроксидов железа (Fe^{3+} и Fe^{3+} , а также группы глинистых (Al-OH и Fe , Mg-OH)

и карбонатных (CO_3^{2-}) минералов, т.е. продуктов гипергенеза и гидротермально измененных минералов. Сравнение значений матриц собственных векторов MNF (см. табл. 2) и PCA (см. табл. 1) трансформаций показывает, что они имеют схожую картину распределений с незначительными отклонениями в сотых долях. Для количественной оценки взаимосвязи главных и шумовых компонент были построены двумерные диаграммы рассеяния (рис. 5).

На диаграмме PC3 и MNF3 (рис. 5, а) прослеживается положительная линейная зависимость, сходящаяся при высоких значениях. Поэтому оба спектральных канала компонент описывают один и тот же класс природных материалов, т.е. растительный покров совместно с группой Fe^{2+} минералов. Наилучшим образом данный класс подчеркивает компонента PC3, т.к. в ее формирование 5 канал Landsat-8 внес наибольшую нагрузку (0.8011), чем в формирование MNF3 (0.63). Компоненты PC4 и MNF4 (рис. 5, б) также имеют положительную линейную корреляцию, но с увеличением дисперсии при высоких значениях (Pour et al., 2018a), и оба описывают группу гидроксилсодержащих и карбонатных минералов. График (в) на рис. 5 показывает очень сильную положительную корреляцию между PC5 и MNF5, что обосновывает тесное пространственное распределение минералов группы оксидов/гидроксидов железа.

Следовательно, выводы, сделанные при анализе матрицы собственных векторов PCA трансформации, уместны и при анализе матрицы собственных векторов MNF. Такое подобие связано с тем, что MNF трансформация основана на двух последовательных PCA преобразованиях и должна более надежно описывать спектральные классы и их пространственное распределение, чем PCA.

Определив, что 3, 4 и 5 шумовые компоненты имеют ключевое значение при определении основных групп гидротермально измененных пород и продуктов гипергенеза, на их основе был скомбинирован RGB композит (рис. 6).

На полученном изображении зоны с высоким содержанием глинистых и карбонатных групп минералов представлены красным, розовым и пурпурным цветами, приуроченными, преимущественно, к структурным нарушениям и дренирующим системам, а также к апикальным частям хребтов и делювиальным склонам (Wambo et al., 2020).

Широкое распространение минералов группы оксидов/гидроксидов железа в основном связано с альфегумусовыми почвами, являющимися основным природным элементом ландшафта на

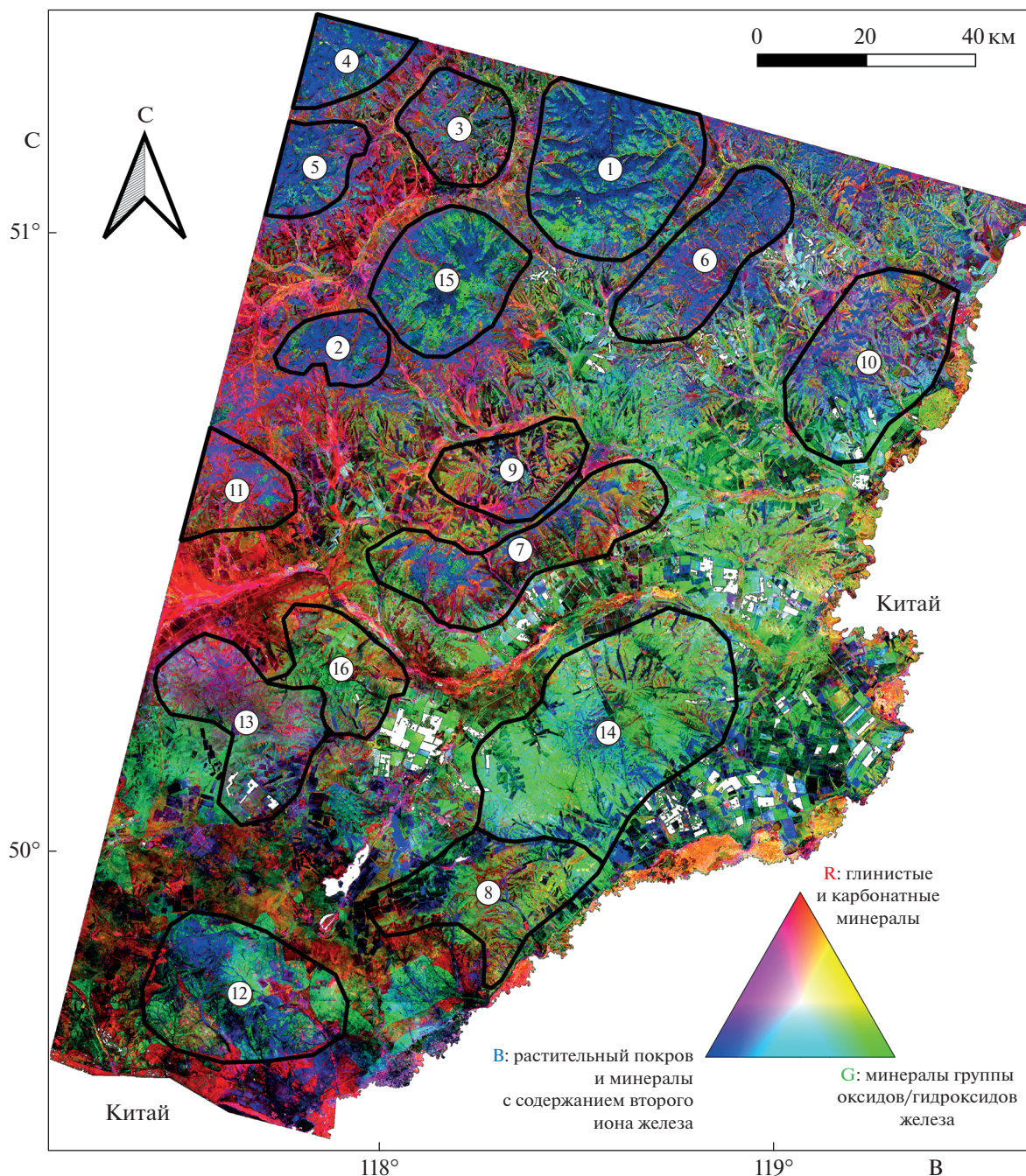


Рис. 4. PCA композит (R: PC4, G: PC5, B: PC3). 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

исследуемой территории. Они выражены на изображении бирюзовым, зеленым, темно- и ярко-зеленым оттенками. Наряду с этим синие, темно-синие и фиолетовые пиксели изображения определяют наличие растительного покрова (различной степени угнетенности), приуроченного в основном к северным склонам и апикальным частям хребтов, а также к сельскохозяйственным угодьям.

Независимый компонентный анализ. Результаты визуального анализа IC и PC изображений показывают, что некоторые IC изображения имеют схожее пространственное распределение значений пикселей с пикселями PC изображений. Следовательно, между ними можно установить тип взаимосвязи и попытаться идентифицировать IC изображения, связанные с ранее определенными спектральными классами геологических матери-

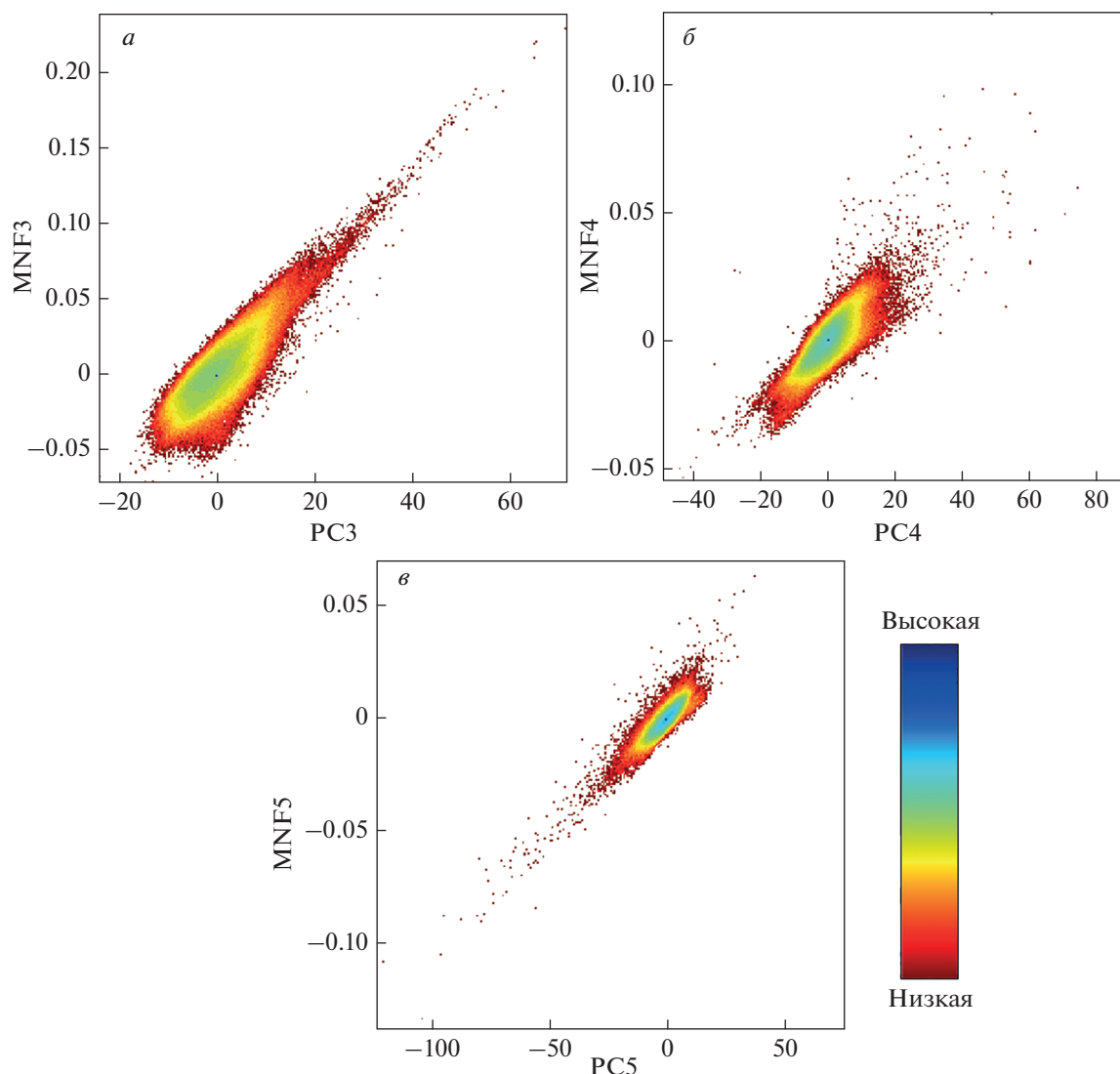


Рис. 5. (а) – двухмерный корреляционный график для PC3 и MNF3. (б) – двухмерный корреляционный график для PC4и MNF4. (в) – двухмерный корреляционный график для PC5 и MNF5.

алов, посредством построения двухмерных диаграмм рассеяния.

В ходе анализа диаграмм рассеяния (рис. 7) было установлено, что изображение IC5 изолирует данные, связанные с растительным покровом и минералами Fe^{+2} группы (рис. 7, а), IC2 изолирует группу глинистых и карбонатных минералов (рис. 7, б), а IC3 изолирует минералы группы оксидов/гидроксидов железа (рис. 7, в).

Данное заключение основано на том, что на всех установленных диаграммах отчетливо прослеживается обратная линейная зависимость, что позволяет определить принадлежность входных данных к одному и тому же спектральному классу геологического материала. Также, анализ ковариационной и корреляционной матрицы для выбранных IC компонент подтверждает их макси-

мальную независимость друг от друга, так как их диагональные элементы эквиваленты, а их значения практически равны нулю (табл. 4, 5) (Pour et al., 2018a).

Следовательно, для отображения изолированных пикселей (улучшенных характеристик) определенных геологических материалов был построен RGB композит из IC2, IC3 и IC5 (рис. 8). Перед построением композита знаки значений компоненты IC5 с PC3 имеет обратную линейную зависимость (см. рис. 7, а), а знак нагрузки собственных векторов для PC3 в 5 канале Landsat-8 является положительным.

На синтезированном ICA композите (см. рис. 8) наблюдается более строгое разделение групп минералов и их локализация среди растительного

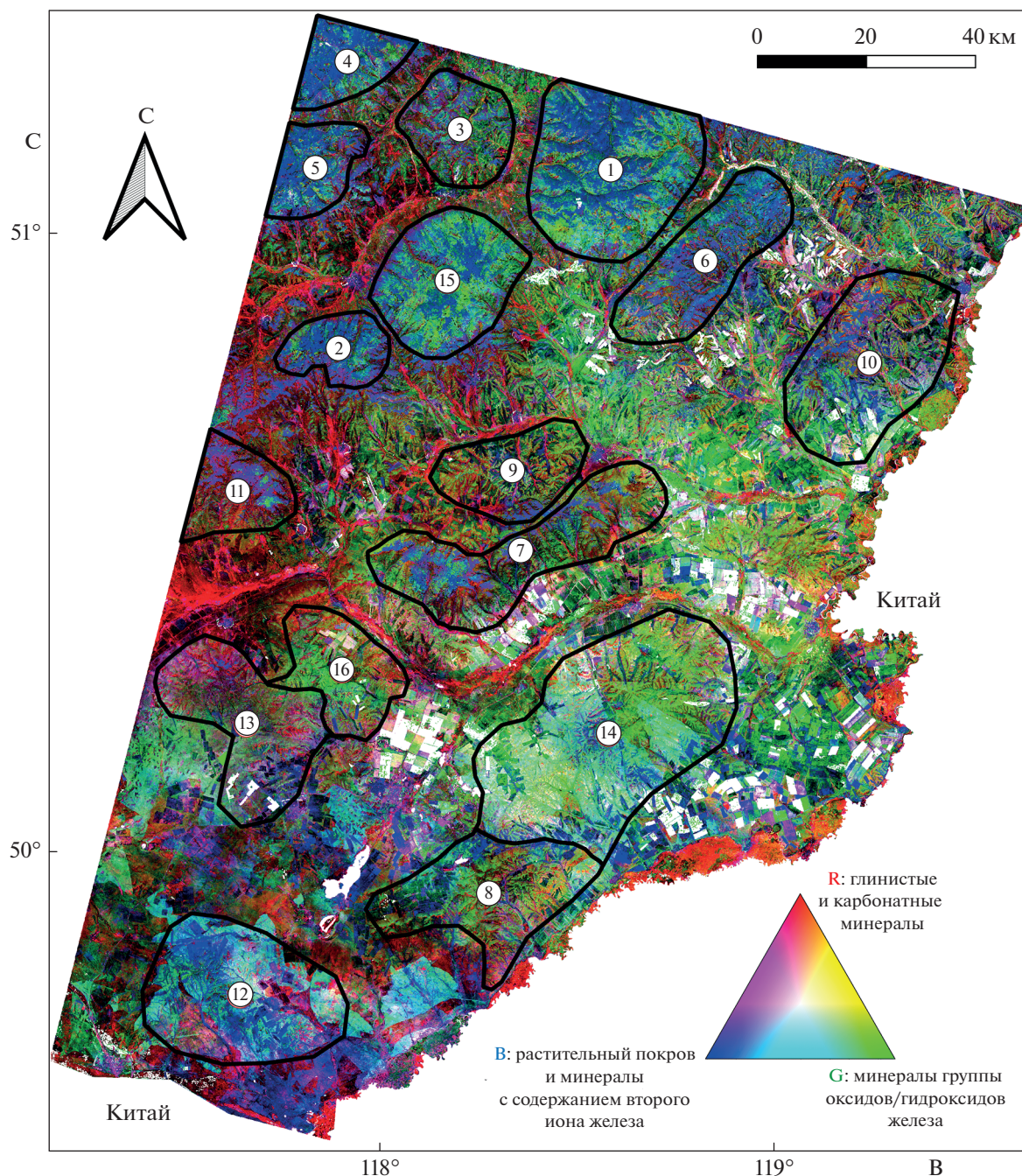


Рис. 6. MNF композит (R: MNF4, G: MNF5, B: MNF3). 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

покрова по сравнению с результатами PCA и MNF преобразований. Растительный покров в зависимости от его плотности, помимо темно синего оттенка, приобрел бледно-серый и бледно-бирюзовый оттенки. Также стали более явно выражены геоморфологические структуры, в основном речные системы совместно с аллювиальными и делювиальными отложениями, сложенными преимущественно гидроксилсодержащими минералами (красный и розовый оттенки).

Области, затронутые преимущественно окислительными процессами (зеленый и светло-зеленый оттенки), также подверглись пространственному распределению, и стали более плотно локализованы. Желтые и оранжевые оттенки, свойственные также результатам PCA и MNF, предположительно, связаны с зонами гидротермально измененных горных пород или продуктами гипергенеза.

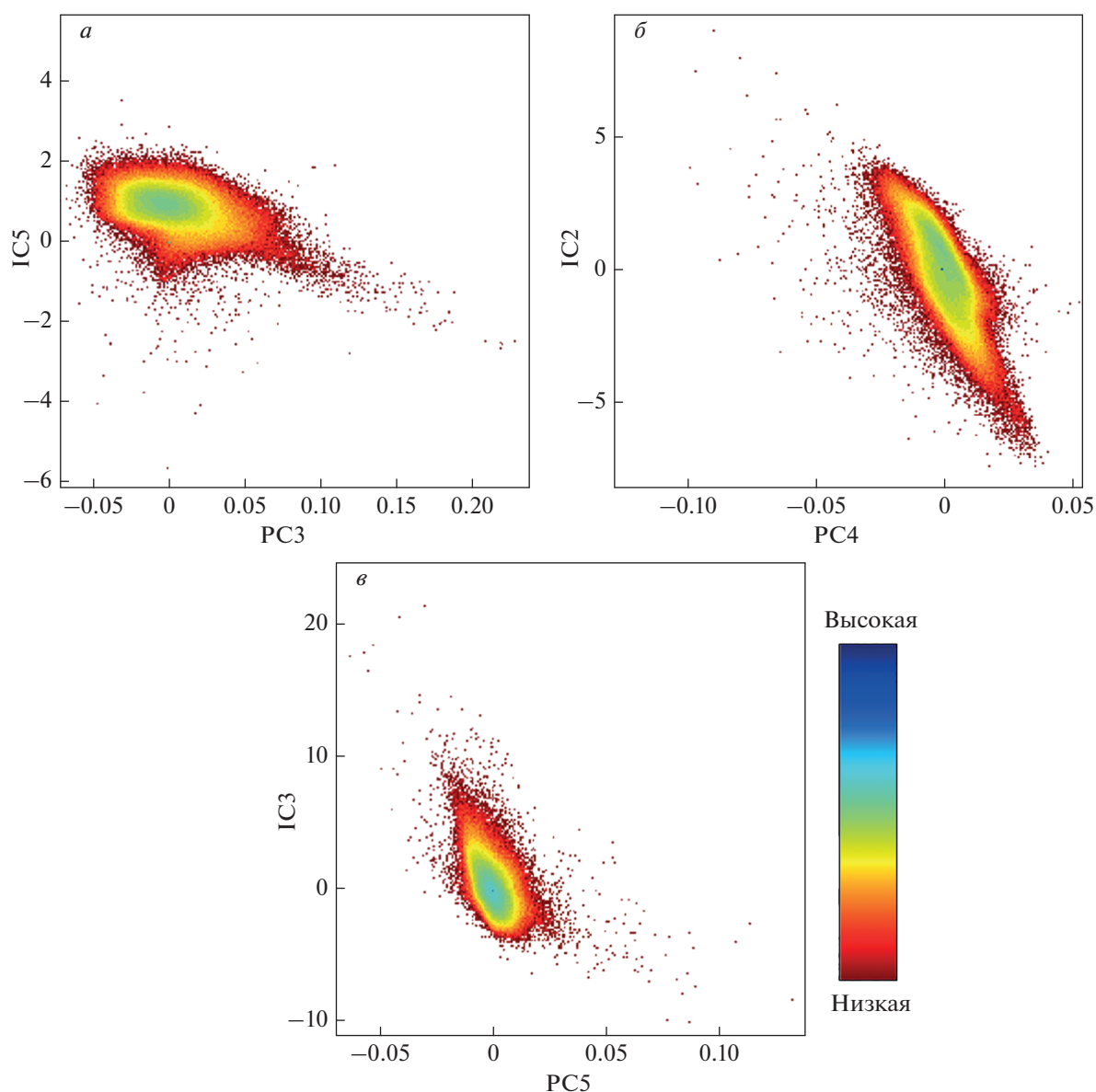


Рис. 7. (а) — двухмерный корреляционный график для PC3 и IC5. (б) — двухмерный корреляционный график для PC4 и IC2. (в) — двухмерный корреляционный график для PC5 и IC3.

Моделирование схемы перспективности на обнаружение полезных ископаемых. Для того чтобы построить схему регионального пространственного распределения наиболее благоприятных на нахождение рудной минерализации областей на основе модели нечеткой логики были использованы соответствующие тематические слои, полученные в ходе статистического преобразования набора данных Landsat-8 методами PCA, MNF и ICA (см. табл. 3). Из PCA трансформации были выбраны PC4, PC5 и PC3 тематические компоненты, из MNF — MNF3, MNF4 и MNF5 тематические компоненты, а из ICA — IC2, IC3 и IC5 тематические компоненты. Перед проведением ин-

теграции, с использованием оператора “AND”, выбранные тематические слои сначала были переклассифицированы, а затем фазифицированы, используя линейную функцию множеств. Полученная схема перспективности на обнаружение полезных ископаемых в пределах исследуемой территории представлена на рис. 9.

Для проведения пространственного анализа распределения классов нечеткого множества, относительно расположения комплексов пород, рудных узлов, лицензионных площадей известных полезных ископаемых и тектонических нарушений, они были нанесены на схему (см. рис. 9). Анализ показал, что предполагаемые высоко-

Таблица 4. Ковариационная матрица, полученная при ICA трансформации над результатами PCA

Ковариация	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
IC1	3.67E-02	2.03E-12	-1.73E-12	-5.69E-13	1.12E-13	-1.70E-13	-2.42E-14
IC2	2.03E-12	3.28E-04	-4.89E-14	-2.72E-14	6.67E-15	-6.43E-15	-3.86E-15
IC3	-1.73E-12	-4.89E-14	1.91E-04	7.73E-15	-2.65E-15	1.84E-15	1.36E-15
IC4	-5.69E-13	-2.72E-14	7.73E-15	2.85E-05	-1.14E-15	1.09E-15	6.63E-16
IC5	1.12E-13	6.67E-15	-2.65E-15	-1.14E-15	1.25E-05	-3.63E-16	-9.34E-17
IC6	-1.70E-13	-6.43E-15	1.84E-15	1.09E-15	-3.63E-16	1.62E-06	1.69E-16
IC7	-2.42E-14	-3.86E-15	1.36E-15	6.63E-16	-9.34E-17	1.69E-16	9.44E-07

Таблица 5. Корреляционная матрица, полученная при ICA трансформации над результатами PCA

Корреляция	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
IC1	1.00E+00	5.84E-10	-6.53E-10	-5.57E-10	1.66E-10	-6.95E-10	-1.30E-10
IC2	5.84E-10	1.00E+00	-1.95E-10	-2.82E-10	1.04E-10	-2.78E-10	-2.19E-10
IC3	-6.53E-10	-1.95E-10	1.00E+00	1.05E-10	-5.42E-11	1.04E-10	1.02E-10
IC4	-5.57E-10	-2.82E-10	1.05E-10	1.00E+00	-6.03E-11	1.60E-10	1.28E-10
IC5	1.66E-10	1.04E-10	-5.42E-11	-6.03E-11	1.00E+00	-8.06E-11	-2.72E-11
IC6	-6.95E-10	-2.78E-10	1.04E-10	1.60E-10	-8.06E-11	1.00E+00	1.36E-10
IC7	-1.30E-10	-2.19E-10	1.02E-10	1.28E-10	-2.72E-11	1.36E-10	1.00E+00

перспективные зоны с интенсивностью от 0.6 до 1 в основном приурочены к мезозойским вулканогенно-осадочным комплексам, неоген-четвертичным отложениям, протяженным разломным зонам и контактам интрузивных тел (см. рис. 2). Также наблюдается повышенная концентрация перспективных зон (от 0.7 до 1) в пределах рудных узлов и лицензионных площадей (см. рис. 9) и приуроченность к ним большинства известных рудных объектов золотой, урановой, полиметаллической и флюоритовой минерализации, локализация которых, также контролируется протяженными разрывными нарушениями (см. рис. 9). Стоит отметить, что не всегда наблюдается согласованность между высоко-перспективными аномалиями (от 0.6 до 1), рудными узлами и рудными объектами: иногда аномалии расположены в стороне от рудных объектов или за пределами рудных узлов. Такое частичное совпадение, с одной стороны, говорит о том, что метод не является универсальным и должен быть использован наряду с традиционными методами проведения региональных прогнозно-поисковых исследований. А с другой стороны позволяет обратить внимание на участки, которые ранее не считались перспективными.

Помимо этого, был проведен пространственный анализ между известными зонами гидротермально-метасоматических изменений пород и предположительно перспективными зонами с интенсивности от 0.7 до 1. В ходе этого анализа была выявлена пространственная закономер-

ность в локализации этих зон в пределах областей гидротермально-метасоматических изменений, широко проявленных на исследуемой территории: аргиллизация, пропилитизация, серицитизация, окварцевание и грейзенетизация, скарнирование.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наше исследование было нацелено на оценку возможности проведения регионального геолого-минералогического картирования территории Юго-Восточного Забайкалья (Россия) на основе набора данных Landsat-8 в условиях резко-континентального климата, наличия умеренной растительности и альфегумусовых почв, влияющих в той или иной степени на спектральную кривую гидротермально измененных минералов или маскирующих гидротермально измененные зоны. Для минимизации отрицательно влияющих природных факторов при проведении геолого-минералогического картирования была использована безоблачная сцена с датой съемки, характеризующаяся наименьшей степенью влажности и растительности. Для устранения корреляции между спектральными каналами, выявления и удаления скрытых факторов, препятствующих геолого-минералогическому картированию, и, как итог, для классификации независимых друг от друга пикселей изображения, отражающих уникальную спектральную характеристику гидротермально измененных минералов или их групп, были ис-

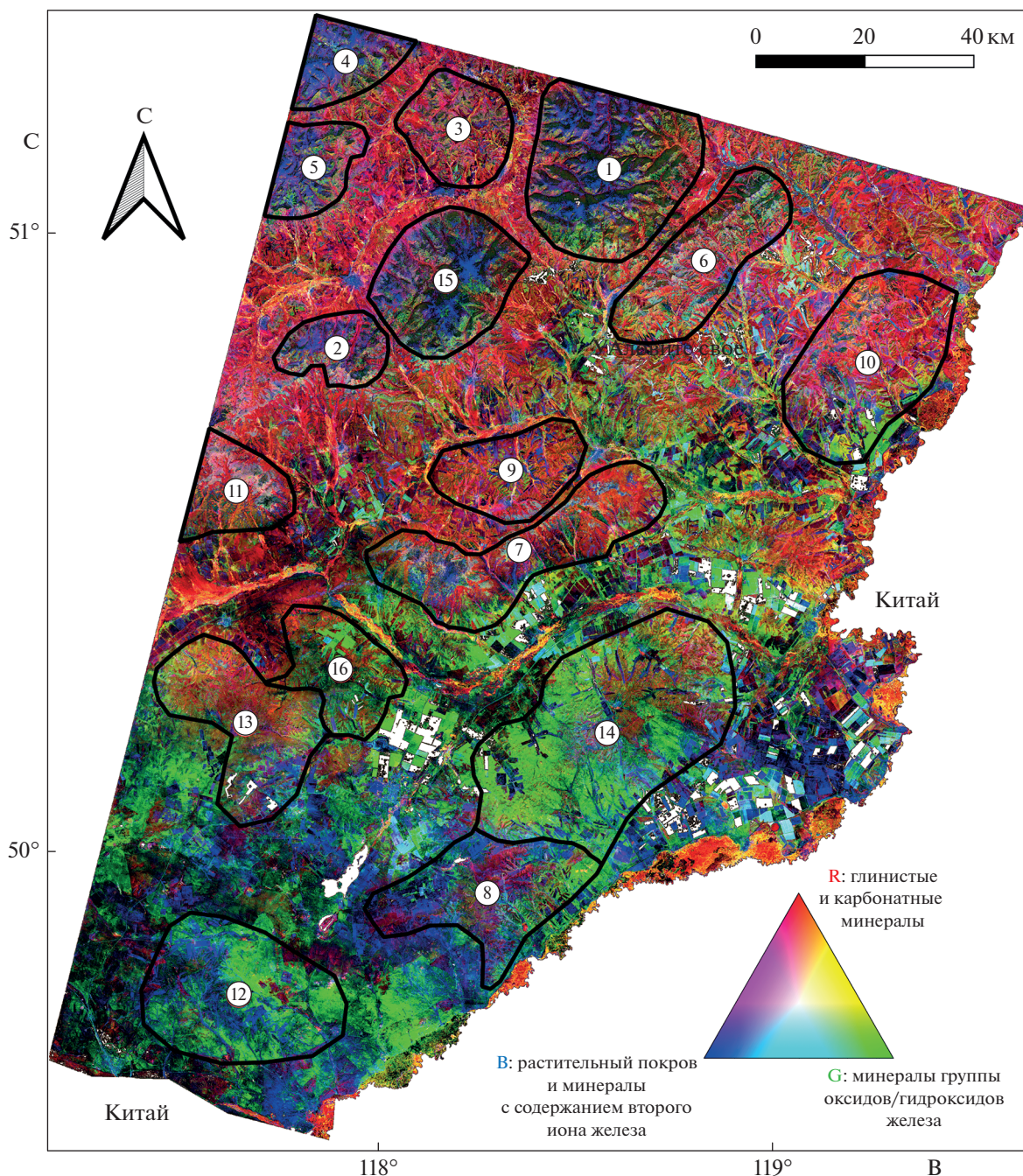


Рис. 8. ICA композит (R: IC2, G: IC3, B: IC5). 1–16 дешифрованные геолого-морфологические структуры.

пользованы статистически обоснованные методы обработки изображений, такие как PCA, MNF и ICA.

На первом этапе исследования был сгенерирован композит в ложных цветах из 2, 5 и 7 спектральных каналов Landsat-8 с целью оценки возможности проведения геологического картирования исследуемой территории. В результате было установлено, что из-за весьма сложного гео-

логического строения исследуемой территории, наличия растительного покрова, мощных четвертичных отложений, схожего вещественного состава основной массы горных пород и как следствие отсутствия их уникальных спектральных особенностей в пределах диапазонов сенсоров Landsat-8, невозможно произвести однозначной идентификации горных пород или их комплексов (формаций). Несмотря на это, на основе пространственного распределения выявленных групп

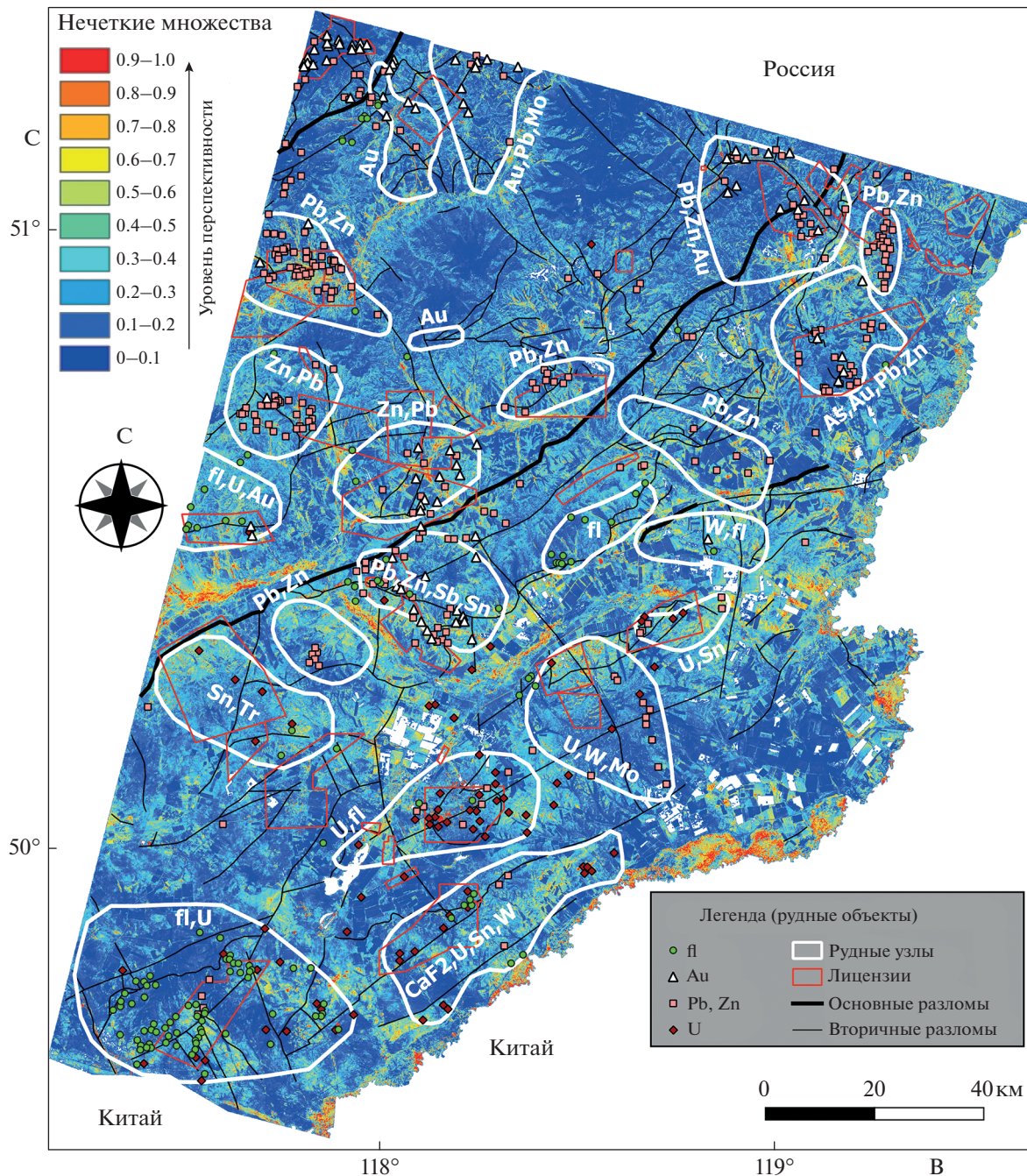


Рис. 9. Схемы распределения перспективных областей на гидротермально-метасоматическую минерализацию.

гидротермально измененных минералов, наблюдается строгое разделение между осадочными и магматическими/метаморфическими горными породами (см. рис. 3, 4, 6, 8). Помимо этого, на основе анализа ландшафтных и структурно-геоморфологических условий, цветовой гаммы и градиентных переходов псевдоцветного RGB изображения, пространственного распределения групп гидротермально измененных минералов, было выявлено 16 областей, соответствующих, соглас-

но геологической карте (Шивохин и др., 2010), гранито-гнейсовые и гранит-гранодиоритовые комплексы горных пород.

Второй этап исследований состоял в статистической обработке набора данных Landsat-8 методами PCA, MNF и ICA и установлении соответствия между их компонентами и группами гидротермально-измененных минералов на основе анализа матриц собственных векторов и построения двумерных корреляционных графиков. На-

грузки в матрицах собственных векторов для выбранных тематических каналов имеют достаточно высокие значения (см. табл. 1 и 2), а двумерные корреляционные графики отражают уверенный линейный тренд (см. рис. 5 и 7). По результатам каждой из трансформаций был сгенерирован RGB композит из тематических слоев групп гидротермально-измененных минералов.

В ходе третьего этапа исследования на основе модели нечеткой логики была построена интегральная схема перспективности на обнаружение полезных ископаемых, полученная из информативных тематических слоев, идентифицированных после PCA, MNF и ICA преобразований (см. табл. 3, рис. 9). Пространственное распределение благоприятных на выявление рудной минерализации областей интенсивностью от 0.6 до 1 хорошо согласуются с продуктивностью этапов рудогенеза, протекавших в интервале от протерозоя до голоцена включительно.

Наиболее продуктивные минерагенические события происходили в мезозойскую эру, когда в процессе внутримитной тектономагматической активизации формировались субщелочные магматиты с Au-, Cu–Mo-, Pb–Zn–Ag-металлогенической специализацией, вулканоплутонические комплексы кальдер с Mo–U, Pb–Zn и флюоритовыми рудами, а затем редкометальные граниты с Sn–W–Li–Ta спектром минерализации (Петров и др., 2017). В связи с проявлением мезозойского магматизма происходили и процессы гидротермально-метасоматических изменений пород от магнезиальных и известковых скарнов, калишпатитов, грейзенов и березитов до гидрослюдазитов и аргиллизитов (Андреева и др., 2020). На заключительных стадиях активизационных событий и в процессе пенепленизации территории формировались крупные месторождения угля, сидеритов и цеолитов (Шивохин и др., 2010). На протяжении всей истории развития рудогенетических процессов ключевую роль в тепломассопереносе играли разломные зоны разного ранга, которые служили проницаемыми каналами для магмы и рудоносных растворов, а также имели важное рудо локализирующее значение.

Высоко перспективные зоны с интенсивностью от 0.8 до 1 также наблюдаются в ореолах развития неоген-четвертичных отложений, сложенных преимущественно песчаниками, каолинит-гидрослюдастыми и аргиллитоподобными глинами, и представляют собой продукты переотложения палеогеновых кор выветривания, которые потенциально могут рассматриваться как строительное сырье (Шивохин и др., 2010).

Северная, более расчлененная часть территории характеризуется повышенным наличием почвенно-растительного покрова, который перекрывает коренные рудомещающие породы. Это

делает территорию практически не пригодной для минералогического картирования, хотя она и имеет высокие перспективы на выявление крупных золоторудных, медно-молибденовых и полиметаллических месторождений. С другой стороны, геоботанические аномалии в почвах можно рассматривать как индикатор наличия гидротермально измененных горных пород. Однако, такое предположение может способствовать ориентировке на ложные аномалии наряду с аномалиями, которые действительно связаны с рудной минерализацией. В связи с этим использование, например, мультиспектральных космических данных дистанционного зондирования земли с повышенным пространственным и спектральным разрешением, таких как Aster или WorldView-3, применение разнообразного набора методов обработки ДДЗ, их интеграция и более тщательный выбор даты съемки сцены смогут повысить качество результатов геолого-минералогического картирования на территориях с повышенной плотностью растительного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует применение статистических методов обработки данных дистанционного зондирования Земли на примере VNIR и SWIR диапазонов спектральных каналов Landsat-8 с целью оценки пригодности территории Юго-Восточного Забайкалья (Россия) для проведения более детального геолого-минералогического картирования в пределах рудных узлов, лицензионных площадей и известных месторождений. Анализ матриц собственных векторов и двумерных корреляционных графиков позволил установить взаимосвязь между результатами статистической обработки данных Landsat-8 и спектральными характеристиками, связанными с оксидами/гидроксидами железа (Fe^{3+} и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$), глинистыми (Al–OH и Fe, Mg–OH) и карбонатными (CO_3^{2-}) группами минералов гидротермально-измененных пород, являющихся индикаторами процессов гидротермального рудообразования. На основе полученных тематических слоев с использованием модели нечеткой логики была сгенерирована схема перспективности на обнаружение полезных ископаемых. Интенсивность градиента (от синего – 0 к красному – 1) полученной схемы отражает предполагаемые, наиболее благоприятные участки локализации гидротермальной минерализации. На основе пространственного анализа геологической информации и результатов обработки ДДЗ установлена приуроченность предполагаемых аномалий преимущественно к мезозойским плутоническим и вулканогенно-осадочным комплексам, а также неоген-четвертичным отложе-

ниям, протяженным разломным зонам и контактам интрузивов. Опираясь на информацию о продуктивности этапов рудообразования, предложено повысить перспективность аномалий с интенсивностью от 0.7 до 1, пространственно связанных с тектоническими нарушениями разного порядка и развитых в пределах позднемезозойских вулcano-плутонических комплексов и платформенных неоген-четвертичных отложений. Также выявлена тесная пространственная взаимосвязь между аномалиями прогнозной схемы интенсивностью от 0.7 до 1 с рудными объектами, вмещающими U, Ag, Pb, Zn и флюоритовую минерализацию, которая контролируется тектоническими нарушениями и развита преимущественно в пределах рудных узлов и лицензионных площадей. На основе полученных результатов и геологических критериев локализации продуктивного оруденения можно наметить перспективные участки как в пределах известных рудных узлов, так и за их пределами.

В целом, результаты проведенного исследования позволяют сделать положительный вывод о пригодности использования дистанционных методов для проведения более детального геолого-минералогического картирования территории со сложными условиями континентального климата. При этом необходимо отметить, что данный вывод делается с учетом некоторых пространственных ограничений, снижающих достоверность картирования, а именно районы с повышенным растительным и почвенным покровом, водными объектами и затронутые антропогенной деятельностью.

В рамках дальнейших исследований планируется использовать данные спутников Aster, Sentinel-2 и коммерческого WorldView-3, так как они обеспечивают более благоприятные пространственные и спектральные характеристики VNIR, SWIR и TIR диапазонов для выявления геологических особенностей территории и проведения более детального геолого-минералогического картирования.

Результаты, продемонстрированные в исследовании, представляют значительный вклад в область разработки способов применения спутниковых мультиспектральных данных дистанционного зондирования для региональной разведки полезных ископаемых. Данная работа может быть полезна для ученых, исследователей, горнодобывающих и геологоразведочных компаний, применяющих мультиспектральные и гиперспектральные данные дистанционного зондирования на различных этапах разведки полезных ископаемых.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Мезозойские кислые магматиты юго-восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76–104.
<https://doi.org/10.31857/S0016777020010013>
- Ищукова Л.П., Игошин Ю.А., Авдеев Б.В., Губкин Г.Н., Филипенко Ю.А., Попова А.И., Рогова В.П., Макушин М.Ф., Хоментовский Б.Н., Спиринов Э.К. Геология Урулунгурского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля / Под ред. Ищуковой Л.П., Наумовой С.С. М.: ЗАО “Геоинформмарк”. 1998. 529 с.
- Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Смирнов М.Ю. Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных // Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 82–90.
- Новикова М.С. Экономико-географические особенности освоения юго-восточных районов Забайкальского края / Под ред. В.Ф. Задорожного. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2014. 161 с.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445–469.
<https://doi.org/10.1134/S1075701517060034>
- Сахновский М.Л., Бороздин А.П., Виноградов Л.А. Методические рекомендации по организации и проведению геолого-минералогического картирования масштабов 1 : 500 000 и 1 : 200 000. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 280 с.
- Смирнова И.О., Кирсанов А.А., Камышиникова Н.В. Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 9–27.
- Шивохин Е.А., Озерский А.Ф., Артамонова Н.А., Духовский А.А., Карасев В.В., Куриленко А.В., Надеждина Т.Н., Павленко Ю.В., Раутина Н.И., Шор Г.М. Объяснительная записка: Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист М–50 (Борзя). СПб.: Издательство картофабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.
- Acharya T., Yang I. Exploring Landsat 8 // Int. J. Eng. Appl. Sci. 2015. № 4(4). P. 4–10.
- Adiri Z., Harti A.El., Jellouli A., Maacha L., Azmi, Zouhair M., Bachaoui M. Mineralogical mapping using Landsat-8 OLI, Terra ASTER and Sentinel-2A multispectral data in Sidi Flah Bouskour inlier, Moroccan Anti-Atlas // J. Spat. Sci. 2019. № 65. P. 147–171.
<https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1490213>
- Amer R., Kusky T., Ghulam A. Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data // J. Afr. Earth Sci. 2010. № 56(2). P. 75–82.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004>

- Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C.* MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN. U.S.C. Geophys. Lab. tech. rep. 1989. № 89(122). P. 44.
- Bishta A.* Lithologic Discrimination Using Selective Image Processing Technique of Landsat 7 Data, Um Bogma Environs Westcentral Sinai, Egypt // J. King Abdulaziz Univ. Mar. Sci. 2009. № 20(1). P. 193–213.
<https://doi.org/10.4197/Ear.20-1.10>
- Bonham-Carter, G.F.* Geographic information systems for geoscientists. Modeling with GIS. Pergamon. Elsevier. 1994. P. 402.
- Carranza E.J.M.* Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Amsterdam. Elsevier. 2008. P. 347.
[https://doi.org/10.1016/S0168-6275\(08\)X0001-7](https://doi.org/10.1016/S0168-6275(08)X0001-7)
- Clark R.N., Swayze G.A.* Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder Algorithm // Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. CO: U.S. Geological Survey. 1995. P. 39–40.
- Chukwu G.U., Ijeh B.I., Olunwa K.C.* Application of Landsat imagery for Landuse/Landcover analyses in the Afikpo sub-basin of Nigeria // Int. Res. J. Geol. Min. 2013. № 3(2). P. 67–81.
- Colby J.D.* Topographic normalization in rugged terrain // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. № 57(5). P. 531–537.
- Cooley T., Anderson G.P., Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowski A.J., Chetwynd J.H., Gardner J.A., Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Berk A., Bernstein L., Acharya P.K., Miller D., Lewis P.* FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation // Int. Geosci. Remote Sens. Symp. 2002. № 3. P. 1414–1418.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026134>
- Comon P.* Independent component analysis, A new concept // Signal Process. 1994. № 36(3). P. 287–314.
[https://doi.org/10.1016/0165-1684\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9)
- Corumluoglu O., Vural A., Asri I.* Determination of Kula basalts (geosite) in Turkey using remote sensing techniques // Arab. J. Geosci. 2015. № 8(11). P. 10105–10117.
<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1914-4>
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. 1996. № 58(3). P. 257–266.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gabr S., Ghulam A., Kusky T.* Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // Ore Geol. Rev. 2010. № 38. P. 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.007>
- Ghanbari Y., Hezarkhani A., Ataei M., Pazand K.* Mineral potential mapping with fuzzy models in the Kerman-Kashmar Tectonic Zone, Central Iran // Appl. Geomat. 2012. № 4. P. 173–186.
<https://doi.org/10.1007/s12518-012-0090-4>
- Green A.A., Berman M., Craig M.D.* A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1988. № 26(1). p. 65–74.
<https://doi.org/10.1109/36.3001>
- Hunt G.R., Ashley R.P.* Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared // Econ Geol. 1979. № 74(7). P. 1613–1629.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.7.1613>
- Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R.* Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar // J. Afr. Earth Sci. 2003. № 37(1–2). P. 59–72.
[https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00071-X)
- Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A.* 2012. The next Landsat satellite; the Landsat Data Continuity Mission // Remote Sens. Environ. 2012. № 122. p. 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>
- Kim Y.H., Choe K.U., Ri R.K.* Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea // Ore Geol. Rev. 2019. № 107. P. 239–247.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.026>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // In Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. 10–14 December 1973. Washington, USA, 1973. P. 309–317.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T.; Barloon P.J., Goetz A.F.H.* The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // Remote Sens. Environ. 1993. № 44. P. 145–163.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
- Lawrence R.C., Mars J.C., Simpson C.J.* Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) // Remote Sens. Environ. 2005. № 99. P. 105–126.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.021>
- Loughlin W.P.* Principal component analysis for alteration mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. № 9. P. 1163–1169.
- Mars J.C., Rowan L.C.* ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonate volcano, Afghanistan // Geosphere. 2011. № 7. P. 276–289.
<https://doi.org/10.1130/GES00630.1>
- Mwaniki M.W., Matthias M.S.M., Schellmann G.* Application of remote sensing technologies to map the structural geology of central Region of Kenya // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2015. № 8(4). P. 1855–1867.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2395094>
- Novák V., Perfilieva I., Mockor J.* Mathematical Principles of Fuzzy Logic. New York. Kluwer Academic Publishers. 1999. P. 320.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5217-8>
- Ourhizif Z., Algouti A.* Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Aster multispectral data in Imini-Ounilla district South high Atlas of Marrakech. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2019. XLII-2/W13. P. 1255–1262.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1255-2019>
- Pour B.A., Hashim M.* Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining dis-

- trict, south-eastern Islamic Republic of Iran // J. Taibah Univ. Sci. 2015. № 9(2). P. 155–166.
<https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.008>
- Pour A.B., Hashim M., Park Y., Hong J.K. Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data // Geocarto Int. 2018a. № 33(12). P. 1281–1306.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1347207>
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., Hong J.K., Hashim M., Woo J. Ayooobi I. Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018b. № 16. P. 23–46.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- Rajendran S., Nasir S. ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // Ore Geol. Rev. 2019. № 108. P. 33–53.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014>
- Richards, J.A., Xiuping J. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Germany: Berlin. Springer. 2006. p. 440.
- Rockwell, B.W., Hofstra, A.H. Identification of quartz and carbonate minerals across Northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data, implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas // Geosphere. 2008. № 4. P. 218–246.
<https://doi.org/10.1130/GES00126.1>
- Ruiz-Armenta J.R., Prol-Ledesma R.M. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico // Int. J. Remote Sens. 1998. № 19(10). P. 1981–2000.
<https://doi.org/10.1080/014311698215108>
- Sabins, F.F. Remote Sensing: Principles and Applications. Long Grove. Waveland Press. 2007.
- Sekandari M., Masoumi I., Pour A.B. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // Remote Sens. 2020. № 12(8). P. 1239.
<https://doi.org/10.3390/rs12081239>
- Wambo J.D.T., Pour A.B., Sylvestre Gannon S., Asimow, P.D., Zoheir, B., Rodrigo dos ReisSalles, Nzenti J.P., Pradhan B., Muslim A.M. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon // Ore Geol. Rev. 2020. № 122. P. 103530.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530>
- Zadeh L.A. Fuzzy sets // Inf. Control. 1965. № 8(3). P. 338–353.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Territory Suitability Assessment for Conducting Detailed Geological and Mineralogical Mapping Based on Statistical Methods of Remote Sensing Data Processing Landsat-8: A Case Study in the Southeastern Transbaikalia, Russia

I. O. Nafigin¹, V. T. Ishmuhametova¹, S. A. Ustinov¹, V. A. Minaev¹, and V. A. Petrov¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, Russia*

The work considers the suitability of using multispectral satellite remote sensing data Landsat-8 for conducting regional geological and mineralogical mapping of the territory of south-eastern Transbaikalia (Russia) in conditions of medium- low-mountain relief and continental climate. The territory was chosen as the object of study due to its diverse metallogenic specialization (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, fluorite). Diversity in composition and age of ore-bearing massifs of intrusive, volcanogenic and sedimentary rocks are also of interest. Statistical processing algorithms to increase spectral information content of satellite data Landsat-8 were used; they include: principal component analysis (PCA); minimum noise fraction (MNF) and independent component analysis (ICA). Eigenvector matrices analysed on the basis of statistical processing results and two-dimensional correlation graphs were built to compare thematic layers with geological material classes: oxide/hydroxide group minerals containing transition iron ions (Fe^{3+} and $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$); a group of clay minerals containing $\text{Al}-\text{OH}$ and Fe , $\text{Mg}-\text{OH}$; minerals containing Fe^{2+} and vegetation cover. Pseudo-coloured RGB composites representing the distribution and multiplication of geological materials classes was generated and interpreted. Integration of informative thematic layers with using fuzzy logic model was carried out to construct a prospectivity map. Received map was compared with geological information, and positive conclusions about territory suitability for further remote mapping research of hydrothermally altered zones and hypergenesis products in order to localize areas promising for identifying hydrothermal-metasomatic mineralization were made.

Keywords: geological mapping, mineralogical mapping, principal component method (PCA), minimum noise content (MNF), independent component analysis (ICA), statistical methods, remote sensing, hydrothermal mineralization, altered rocks, prospectivity map

REFERENCES

- Andreeva O.V., Petrov V.A., Poluektov V.V.* Mezozoiskie kislye magmatity yugo-vostochnogo Zabaikal'ya: petrogeokhimiya, svyaz' s metasomatizmom i rudoobrazovaniem [Mesozoic felsic magmatites of southeastern Transbaikalia: petrogeochemistry, connection with metasomatism and ore formation] // *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2020. T. 62. № 1. P. 76–104. (In Russian).
https://doi.org/10.31857/S0016777020010013.
- Ishchukova L.P., Igoshin Yu.A., Avdeev B.V., Gubkin G.N., Filipchenko Yu.A., Popova A.I., Rogova V.P., Makushin M.F., Khomentovskii B.N., Spirin E.K.* Geologiya Urulyunguevskogo rudnogo raiona i molibden-uranovykh mestorozhdenii Strel'tsovskogo rudnogo polya [Geology of the Urulyunguevsky ore region and molybdenum-uranium deposits of the Strel'tsovsky ore field] / Pod red. Ishchukovoi L.P., Naumovoi S.S. M.: ZAO "Geoinformmark". 1998. P. 529. (In Russian).
- Kirsanov A.A., Lipiyainen K.L., Smirnov M.Yu.* Vyyavlenie ploshchadei, perspektivnykh na zolotoe orudnenie, na osnove rezul'tatov obrabotki aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannyykh [Identification of areas perspective for gold mineralization based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2019. № 78. P. 82–90. (In Russian).
- Novikova M.S.* Ekonomiko-geograficheskie osobennosti osvoeniya yugo-vostochnykh raionov Zabaikal'skogo kraia [Economic and geographical features of the development of the south-eastern regions of the Trans-Baikal Territory] / Pod red. V.F. Zadorozhnogo. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo", 2014. P. 161. (In Russian)
- Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V.* Tektonomagmaticheskie tsikly i geodinamicheskie obstanovki formirovaniya rudonosnykh sistem Yuzhnogo Priargun'ya [Tectonomagmatic cycles and geodynamic settings for the formation of ore-bearing systems in the Southern Argun region] // *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2017. T. 59. № 6. P. 445–469. (In Russian).
https://doi.org/10.1134/S1075701517060034
- Sakhnovskii M.L., Borozdin A.P., Vinogradov L.A.* Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii i provedeniyu geologo-mineragenicheskogo kartirovaniya masshtabov 1 : 500000; 1 : 200000 [Guidelines for organizing and evaluating geological and mineralogical mapping at scales of 1 : 500000 and 1 : 200000]. SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2009. P. 280. (In Russian).
- Smirnova I.O., Kirsanov A.A., Kamyshnikova N.V.* Obzor zarubezhnykh dostizhenii za poslednie pyat' let v oblasti ispol'zovaniya mul'ti- i giperspektral'nykh sputnikovyykh dannyykh i sovremennykh metodov ikh obrabotki v geologicheskikh issledovaniyakh [A review of the past 5 years of international advances in multi- and hyperspectral satellite data application and processing techniques in geological research] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. T. 17. № 1. P. 9–27. (In Russian).
- Shivokhin E.A., Ozerskii A.F., Artamonova N.A., Dukhovskii A.A., Karasev V.V., Kurilenko A.V., Nadezhdina T.N., Pavlenko Yu.V., Raitina N.I., Shor G.M.* Ob'yasnitel'naya zapiska: Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'ye pokolenie) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation)]. List M–50 (Borzya). SPb.: Izdatel'stvo kartofabrik VSEGEI, 2010. P. 553. (In Russian).
- Acharya T., Yang I.* Exploring Landsat 8 // *Int. J. Eng. Appl. Sci.* 2015. № 4(4). pp.4–10.
- Adiri Z., Harti A.El., Jellouli A., Maacha L., Azmi, Zouhair M., Bachaoui M.* Mineralogical mapping using Landsat-8 OLI, Terra ASTER and Sentinel-2A multispectral data in Sidi Flah Bouskour inlier, Moroccan Anti-Atlas // *J. Spat. Sci.* 2019. № 65. P. 147–171.
https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1490213
- Amer R., Kusky T., Ghulam, A.* Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data // *J. Afr. Earth Sci.* 2010. № 56(2). P. 75–82.
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004
- Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C.* MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN. U.S.C. Geophys. Lab. tech. rep. 1989. № 89(122). P. 44.
- Bishta A.* Lithologic Discrimination Using Selective Image Processing Technique of Landsat 7 Data, Um Bogma Environs Westcentral Sinai, Egypt // *J. King Abdulaziz Univ. Mar. Sci.* 2009. № 20(1). P. 193–213.
https://doi.org/10.4197/Ear.20-1.10
- Bonham-Carter G.F.* Geographic information systems for geoscientists. Modeling with GIS. Pergamon. Elsevier. 1994. P. 402.
- Carranza E.J.M.* Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Amsterdam. Elsevier. 2008. P. 347.
https://doi.org/10.1016/s0168-6275(08)x0001-7
- Clark R.N., Swayze G.A.* Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder Algorithm // *Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*. CO: U.S. Geological Survey. 1995. P. 39–40.
- Chukwu G.U., Ijeh B.I., Olunwa K.C.* Application of Landsat imagery for Landuse/Landcover analyses in the Afikpo sub-basin of Nigeria // *Int. Res. J. Geol. Min.* 2013. № 3(2). P. 67–81.
- Colby J.D.* Topographic normalization in rugged terrain // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. № 57(5). P. 531–537.
- Cooley T., Anderson G.P., Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowski A.J., Chetwynd J.H., Gardner J.A., Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Berk A., Bernstein L., Acharya P.K., Miller D., Lewis P.* FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation // *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 2002. № 3. P. 1414–1418.
https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026134
- Comon P.* Independent component analysis, A new concept // *Signal Process.* 1994. № 36(3). P. 287–314.
https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9
- Corumluoglu O., Vural A., Asri I.* Determination of Kula basalt (geosite) in Turkey using remote sensing techniques // *Arab. J. Geosci.* 2015. № 8(11). P. 10105–10117.
https://doi.org/10.1007/s12517-015-1914-4
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sens. Environ.* 1996. № 58(3). P. 257–266.
https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Gabr S., Ghulam A., Kusky T.* Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // *Ore Geol.*

- Rev. 2010. № 38. P. 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.007>
- Ghanbari Y., Hezarkhani A., Ataei M., Pazand K. Mineral potential mapping with fuzzy models in the Kerman-Kashmar Tectonic Zone, Central Iran // *Appl. Geomat.* 2012. № 4. P. 173–186.
<https://doi.org/10.1007/s12518-012-0090-4>
- Green A.A., Berman M., Craig M.D. A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1988. № 26(1). P. 65–74.
<https://doi.org/10.1109/36.3001>
- Hunt G.R., Ashley R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared // *Econ Geol.* 1979. № 74(7). P. 1613–1629.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.7.1613>
- Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R. Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar // *J. Afr. Earth Sci.* 2003. № 37(1–2). P. 59–72.
[https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00071-X)
- Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A., 2012. The next Landsat satellite; the Landsat Data Continuity Mission // *Remote Sens. Environ.* 2012. № 122. P. 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>
- Kim Y.H., Choe K.U., Ri R.K. Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea // *Ore Geol. Rev.* 2019. № 107. P. 239–247.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.026>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. 10–14 December 1973. Washington, USA, 1973. P. 309–317.
- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J., Goetz A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // *Remote Sens. Environ.* 1993. № 44. P. 145–163.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
- Lawrence R.C., Mars J.C., Simpson C.J. Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) // *Remote Sens. Environ.* 2005. № 99. P. 105–126.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.021>
- Loughlin W.P. Principal component analysis for alteration mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. № 9. P. 1163–1169.
- Mars J.C., Rowan L.C. ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonate volcano, Afghanistan // *Geosphere*. 2011. № 7. P. 276–289.
<https://doi.org/10.1130/GES00630.1>
- Mwaniki, M.W., Matthias, M.S.M., Schellmann, G. Application of remote sensing technologies to map the structural geology of central Region of Kenya // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2015. № 8(4). P. 1855–1867.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2395094>
- Novák V., Perfilieva I., Mockor J. *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*. New York. Kluwer Academic Publishers. 1999. P. 320.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5217-8>
- Ourhizif Z., Algouti A. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Aster multispectral data in Imini-Ounilla district South high Atlas of Marrakech. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019. XLII-2/W13. P. 1255–1262.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1255-2019>
- Pour B.A., Hashim M. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran // *J. Taibah Univ. Sci.* 2015. № 9(2). P. 155–166.
<https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.008>
- Pour A.B., Hashim M., Park Y., Hong J.K. Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data // *Geocarto Int.* 2018a. № 33(12). P. 1281–1306.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1347207>
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., Hong J.K., Hashim M., Woo J. Ayoobi I. Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // *Polar Sci.* 2018b. № 16. P. 23–46.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- Rajendran S., Nasir S. ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // *Ore Geol. Rev.* 2019. № 108. P. 33–53.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014>
- Richards J.A., Xiuping J. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Germany: Berlin. Springer. 2006. P. 440.
- Rockwell B.W., Hofstra A.H. Identification of quartz and carbonate minerals across Northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data, implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas // *Geosphere*. 2008. № 4. P. 218–246.
<https://doi.org/10.1130/GES00126.1>
- Ruiz-Armenta J.R., Prol-Ledesma R.M. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico // *Int. J. Remote Sens.* 1998. № 19(10). P. 1981–2000.
<https://doi.org/10.1080/014311698215108>
- Sabins F.F. *Remote Sensing: Principles and Applications*. Long Grove. Waveland Press. 2007.
- Sekandari M., Masoumi I., Pour A.B. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // *Remote Sens.* 2020. № 12(8). P. 1239.
<https://doi.org/10.3390/rs12081239>
- Wambo J.D.T., Pour A.B., Sylvestre Gannon S., Asimow P.D., Zohair B., Rodrigo dos Reis Salles, Nzenti J.P., Pradhan B., Muslim A.M. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon // *Ore Geol. Rev.* 2020. № 122. P. 103530.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530>
- Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Inf. Control.* 1965. № 8(3). P. 338–353.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)