

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT-8 С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАЛОУРАЛЬСКОЙ ЗОНЫ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

© 2023 г. Ю. Н. Иванова^{a, b, *}, И. О. Нафигин^a

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.07.2022 г.

В ходе данного исследования был разработан подход, ориентированный на выявление вероятностных зон повышенной трещиноватости (областей с высокой плотностью линеаментов), рассматриваемых в качестве прогностического признака локализации рудной минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны (Полярный Урал). Эта площадь является перспективной на обнаружение рудопоявлений полиметаллического типа (Fe, Cu, Cu–Zn, Au–Cu). На основе разработанного подхода с учетом геологической информации, распределения минеральных ресурсов, данных дистанционного зондирования и результатов их обработки были построены схемы плотности линеаментов, прогнозные схемы распределения зон высокопроницаемых горных пород и выявлены перспективные участки на полиметаллической тип минерализации. Обработка данных дистанционного зондирования основывалась на выделении структур ручным и автоматическим способами и их интеграции на основе нечеткой логики. Морфоструктурные карты, полученные по данным космического аппарата Landsat-8, показывают, что известные в районе рудопоявления полиметаллической специализации расположены по периметру крупной морфоструктуры 1-го порядка, а также возле радиальных линеаментов протяженностью до 20 км СВ и реже – СЗ направлений. В результате сопоставления данных дистанционного зондирования с геологической картой территории исследования и известными рудопоявлениями было выделено шесть перспективных зон. Оконтуренные области показали пространственную согласованность с несколькими известными полиметаллическими рудопоявлениями, локализованными на площади исследования.

Ключевые слова: космические снимки, нечеткая логика, анализ плотности линеаментов, полиметаллические рудопоявления, ручное и автоматическое выделение линеаментов, морфоструктурные карты, Полярный Урал, Landsat-8, обработка данных дистанционного зондирования

DOI: 10.31857/S0205961423010062, **EDN:** MMWHEG

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия дистанционное зондирование (ДЗ) в геологии стало эффективным и важным инструментом для обнаружения месторождений полезных ископаемых (ПИ), а также мощным методом для распознавания гидротермально измененных групп минералов (Nawaz et al., 2019; Zoheir et al., 2019; Kumar et al., 2020), структур (Beygi et al., 2020; Moradpour et al., 2021), литологических разностей (Sekandari et al., 2020) и получения другой ценной информации на начальных этапах геолого-разведочных работ (Pour et al., 2021). С помощью мульти- и гиперспектральных спутниковых снимков ДЗ были успешно разведаны и обнаружены рудные месторождения различного типа: золоторудные, медно-порфиро-

вые, колчеданные, эпитермальные золоторудные и др. (Duuring et al., 2012; Bolouki et al., 2020; Sekandari et al., 2020).

Данные гипер- и мультиспектральных спутниковых изображений порой являются единственными источником информации в местах со сложными климатическими и географическими условиями (постоянный ледниковый покров, пустынные территории, болотистая местность и др.) и отсутствием инфраструктуры, и прежде всего, для слабоизученных и богатых на природные ресурсы районов Крайнего Севера, где существует большая вероятность обнаружения различных видов ПИ (Бортников и др., 2014).

Цель исследования – разработка подхода, ориентированного на выявление вероятностных зон

высокопроницаемых пород (областей с повышенной плотностью линеаментов) как прогнозного признака локализации рудной минерализации. На основе данного подхода с учетом геологической информации, распределения минеральных ресурсов и данных изображений космического аппарата (КА) ДЗ Земли Landsat-8 построены схемы плотности линеаментов, были схемы распределения зон высокопроницаемых пород и выявлены перспективные участки на полиметаллический тип минерализации. Обработка данных ДЗ основывалась на выделении структур ручным и автоматическим способами и их интеграции на основе нечеткой логики.

В ходе исследования была выбрана территория центральной части Малоуральской зоны (ЦЧМЗ) с Манюкую-Ворчатинским рудным узлом. Данная площадь перспективна для обнаружения полиметаллического (Fe, Cu, Cu–Zn, Au–Cu) типа минерализации. Этот участок в дальнейших работах будет использоваться в качестве реперного.

Текущее исследование направлено на выявление структурных и геолого-морфологических особенностей полиметаллической минерализации для исследуемой территории, поскольку подобные работы с использованием ГИС и методов ДЗ в регионе еще не проводились.

Предложенный подход может быть применен как для территории Полярного Урала, так и других северных областей.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Более подробное геологическое строение ЦЧМЗ, Манюкую-Ворчатинского рудного узла и прилегающих площадей можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Шишкин и др., 2007, Estrada et al., 2012, Кременецкий, 2012, Коновалов и др., 2014, Ремизов и др., 2014, Викентьев и др., 2017, Соболев и др., 2018 и др.). Тектоническая схема северной части Уральского складчатого пояса представлена на рис. 1.

ДАННЫЕ

Алгоритм для построения схемы вероятностного распределения зон повышенной трещиноватости показан на рис. 2.

В ходе исследования использовались следующие данные:

1. Космические снимки КА Landsat-8. В работе была использована безоблачная дневная сцена КА Landsat-8 LC08_L1TP_166013_20160821_20170322_01_T1 уровня обработки 1T (с поправкой на рельеф) снятая 21.08.2016 г. в 07:11:49 утра. Изображение было получено из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗ Земли (EOSDIS) ([https://search.earthdata.na-](https://search.earthdata.nasa.gov)

[sa.gov](https://search.earthdata.nasa.gov)). Для снимка была проведена радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция с целью адаптации сырых цифровых значений пикселей к отражающей способности дневной поверхности.

2. Геологическая информация была представлена в виде геологической карты и карты ПИ ЦЧМЗ масштаба 1 : 200000, составленных в рамках госзадания ВСЕГЕИ в 2005 г. (Шишкин и др., 2007).

3. Геофизические данные включали электро-, аэромагнито- и магнито-разведочную информацию. Эти работы проводил Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) в пределах Манюкую-Ворчатинского рудного поля с целью уточнения положения рудных зон и определения участка для выполнения буровых работ в масштабе 1 : 50000 (Кременецкий, 2012).

4. Полевые работы проводились в ходе нескольких экспедиций в составе ИГЕМ РАН (летние сезоны 2019 и 2021 гг.) на исследуемой территории (см. рис. 1).

Для полевых заверочных работ использовалась система глобального позиционирования (GPS) Garmin GPSmap 62s для определения точных местоположений структурных элементов. Была проведена полевая фотосъемка обнаженных разломов, вмещающих и интрузивных пород, минерализации, чтобы подтвердить их надежность в локальном масштабе (рис. 3, а, 3, б).

Закартированные разломные структуры хорошо коррелируют с тектоническими нарушениями, отраженными как на геологической карте, так и на структурных схемах предшественников.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели были использованы следующие методы:

1. Метод главных компонент (МГК) — это многомерный статистический метод, который выбирает 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; Schowengerdt, 2007). Первый главный компонент (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как он характеризуется наибольшей дисперсией в пространстве всех признаков (Jolliffe, 2002).

Основным преимуществом PC1 является структурная информативность, отражающая и подчеркивающая структурно-геоморфологические особенности ландшафта (рис. 4).

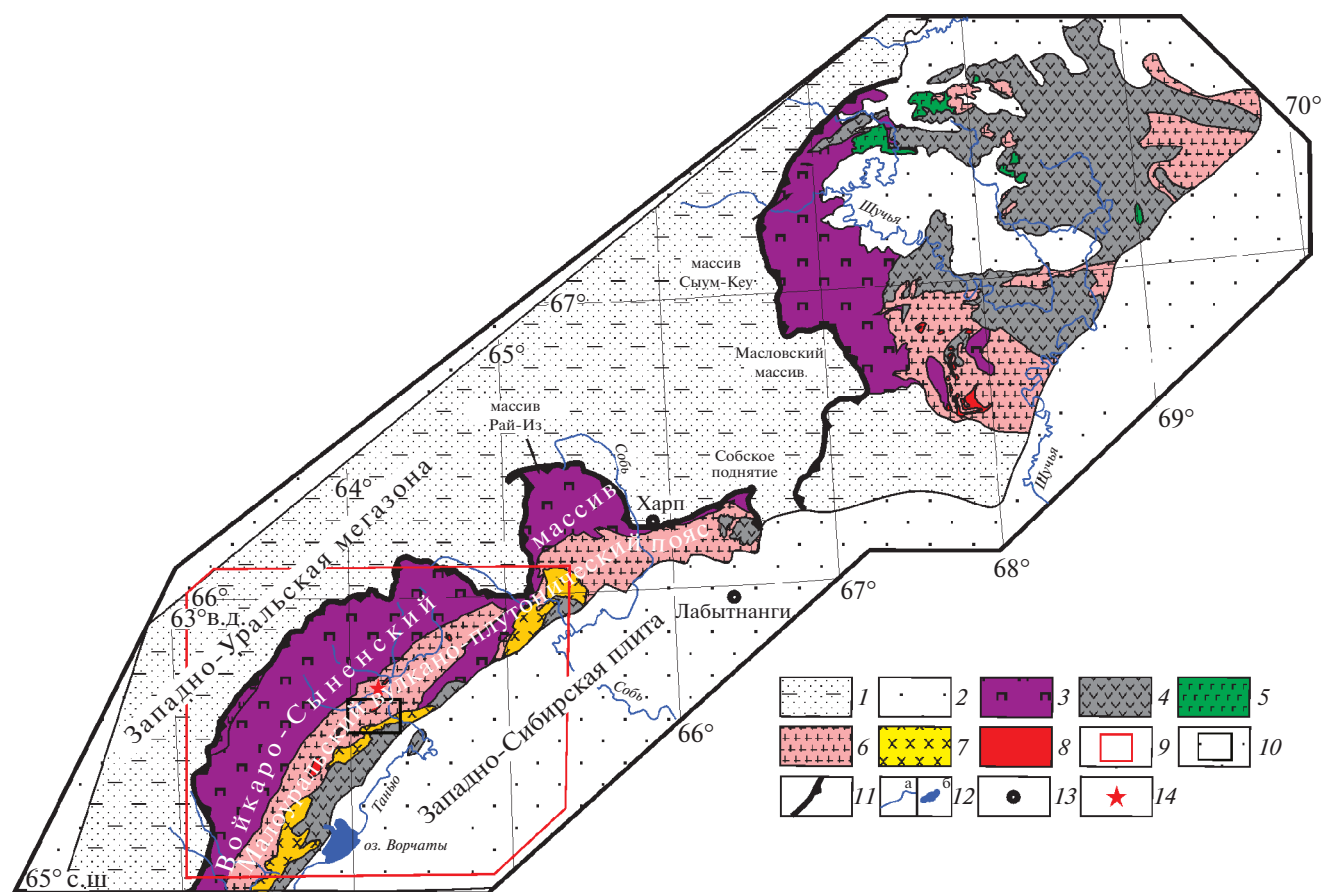


Рис. 1. Тектоническая схема северной части Уральского складчатого пояса (по Государственная..., 2007): 1 – поздне-кембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской структурной мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–9 – Восточно-Уральская мегазона (Шучинская – южная, Войкарская – северная); 3 – ордовикские метаморфизованные гипербазиты и габброиды; 4 – ордовикско-девонские вулканические и вулканогенно-осадочные образования; 5 – средне-позднеордовикские габброиды и плагитогранитоиды хойпейского комплекса; 6 – ранне-среднедевонские диориты и гранитоиды юнягинского и собского комплексов; 7 – ранне-среднедевонские габброиды, диориты и монцитонитоиды конгорского комплекса; 8 – средне-позднедевонские гранитоиды юрменекского и янослорского комплексов; 9–10 – границы ЦЧМЗ и Манюкую-Ворчатинского рудного узла; 11– Главный Уральский разлом; 12 – основные реки и озера; 13 – города, 14 – соответствует рис. 3.

МГК был применен к первым восьми спектральным каналам набора данных КА Landsat-8.

2. Направленная фильтрация создает оптический эффект тени, сфокусированный на изображении, как будто оно освещено косым светом (Marion, 1987). Она основана на операторе Собеля и применяется к изображениям с использованием процесса свертки посредством построения окна, как правило, размером 3 × 3 (табл. 1).

Этот тип фильтра широко используется для подготовки изображений с целью извлечения линейных элементов автоматическим методом, поскольку направленный характер оператора Собеля создает эффективный и быстрый способ оценки линейных элементов в четырех основных направлениях: С–Ю, СВ–ЮЗ, В–З и СЗ–ЮВ (Suzen, Toprak, 1998). Направленная фильтрация была применена к РС1 (рис. 5), а RGB композит, собранный из наи-

Таблица 1. Оператор Собеля для четырех основных направлений

С–Ю			СВ–ЮЗ			В–З			СЗ–ЮВ		
–1	0	1	–1.4	–0.7	0	–1	–1	–1	0	–0.7	–1.4
–1	0	1	–0.7	0	0.7	0	0	0	0.7	0	–0.7
–1	0	1	0	0.7	1.4	1	1	1	1.4	0.7	0

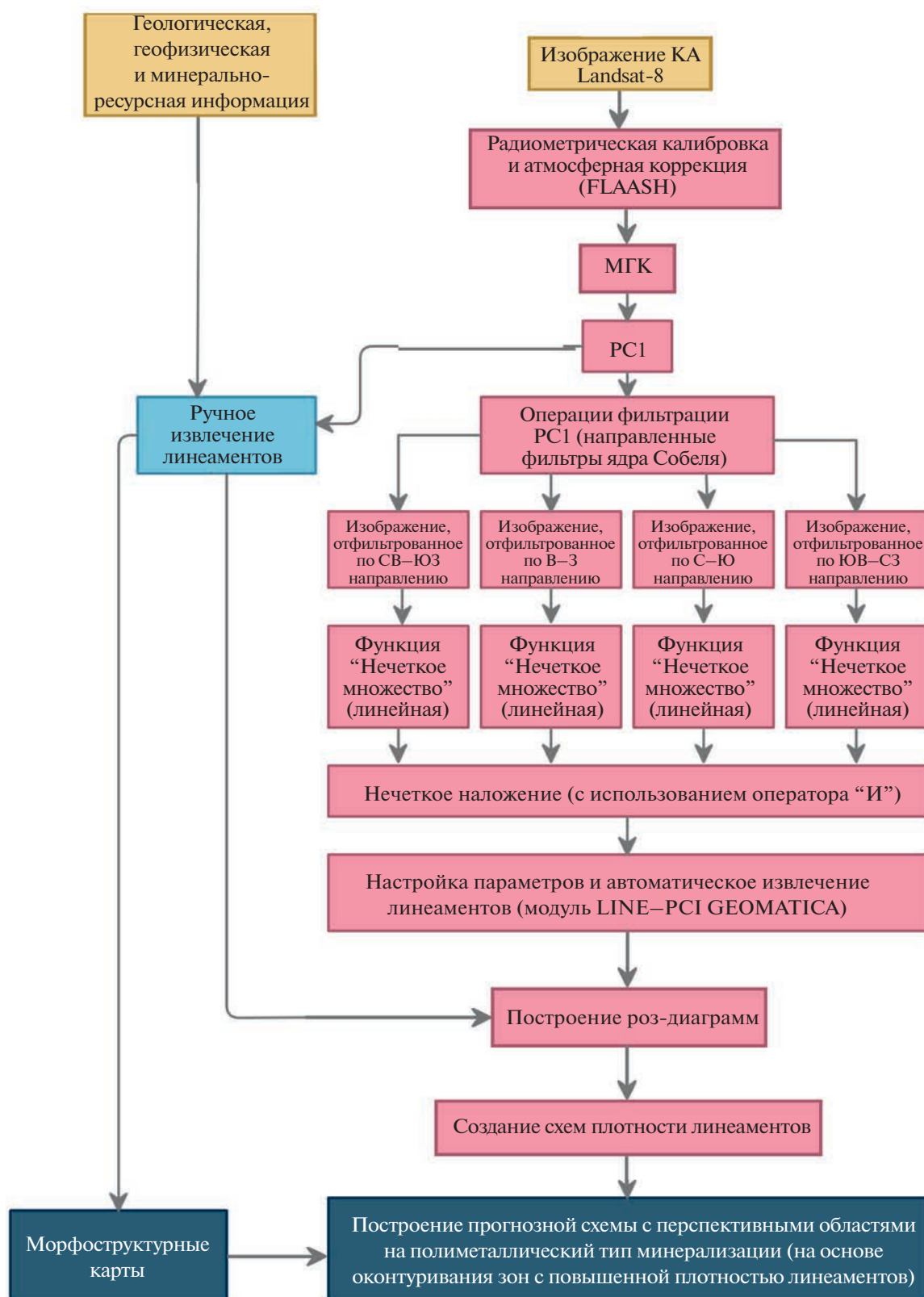


Рис. 2. Алгоритм для построения прогнозной схемы вероятностного распределения зон высокопроницаемых пород на полиметаллический тип минерализации, основанный на данных КА ДЗ Земли Landsat 8, геологической, геофизической и минерально-ресурсной информации.

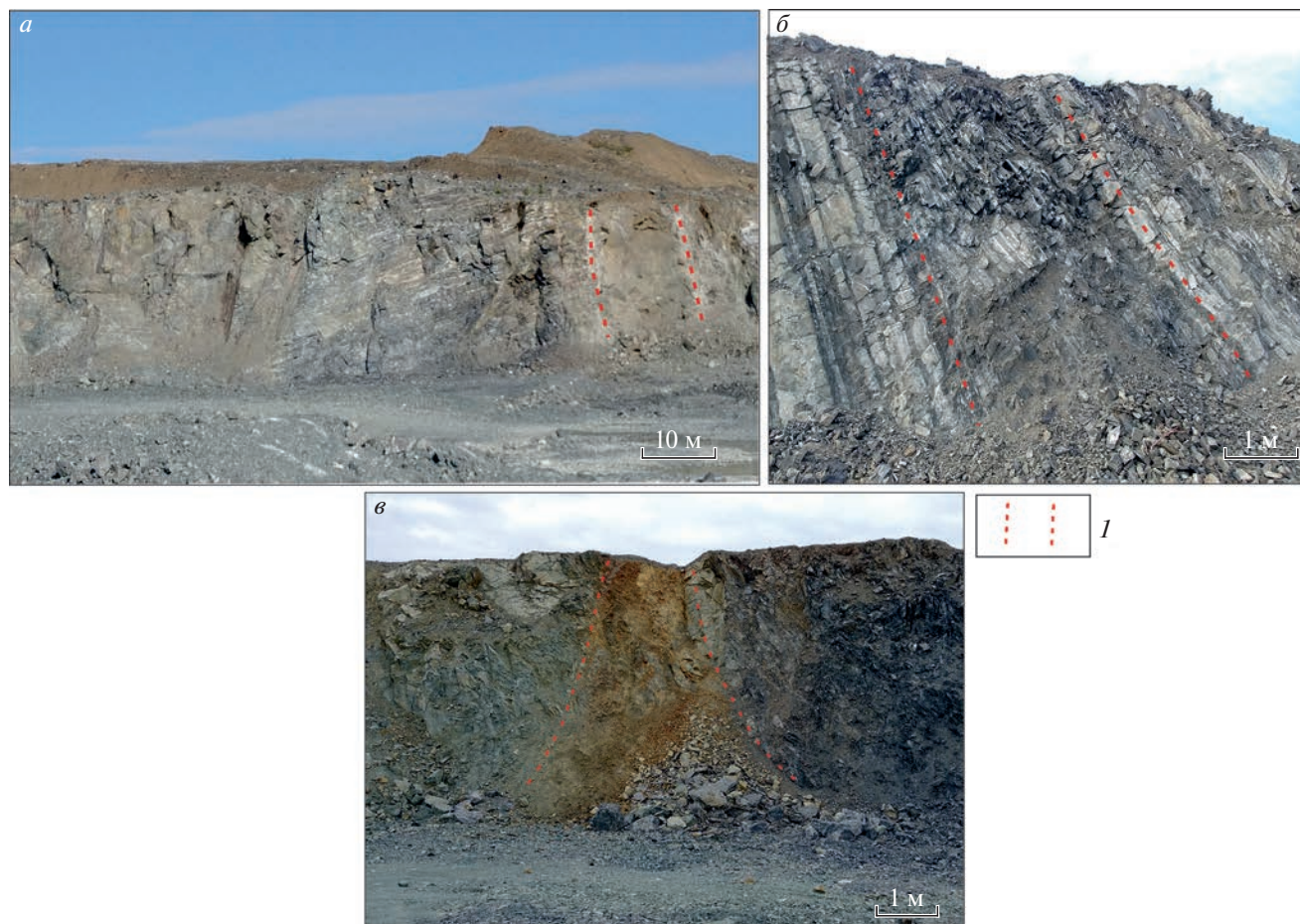


Рис. 3. Примеры разломов, вмещающих и интрузивных пород и минерализации (а–в), заверенных в ходе полевых работ: а – дайка сечет слоистую толщу, б – зона дробления и расщепления в слоистой толще, в – зона оруденения. Условные обозначения: I – границы: даек (а, б) и зона оруденения (в).

более информативных направлений С–Ю, СВ–ЮЗ и В–З, показан на рис. 6.

3. Нечеткая логика основана на теории нечетких множеств, предложенной (Zadeh, 1965). Она применяется для картирования перспективных зон минерализации (Carranza, 2008; Zhang et al., 2017; Kim et al., 2019) и включает следующие этапы: (1) фаззификация (введение нечеткости); (2) логическая интеграция фаззифицированных данных с помощью инструмента “Нечеткое наложение”; (3) дефаззификация выходной информации для облегчения ее интерпретации (Carranza, 2008).

Фаззификация – процесс или процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных. Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным (обычно – численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей термина входной переменной.

После завершения этого этапа для всех входных переменных должны быть определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из термов, которые используются в под-условиях базы правил системы нечеткого вывода. Дефаззификация – это обратный процесс фаззификации, при котором отображение выполняется для преобразования нечетких результатов в четкие.

Определение классов в классификации и не-точность в сортировке явлений по классам могут повлиять на результаты работы и принятие решений. Инструменты “Нечёткого наложения” помогают в устранении этих неточностей или их учету в анализе данных (Геоинформационные технологии..., 2012).

На вход инструмента “Нечеткое наложение” было отправлено четыре отфильтрованных и фаззифицированных изображения. Для их оптимальной комбинации был использован нечеткий оператор “И” (Bonham-Carter, 1994; Nykanen et al., 2008) (рис. 7).

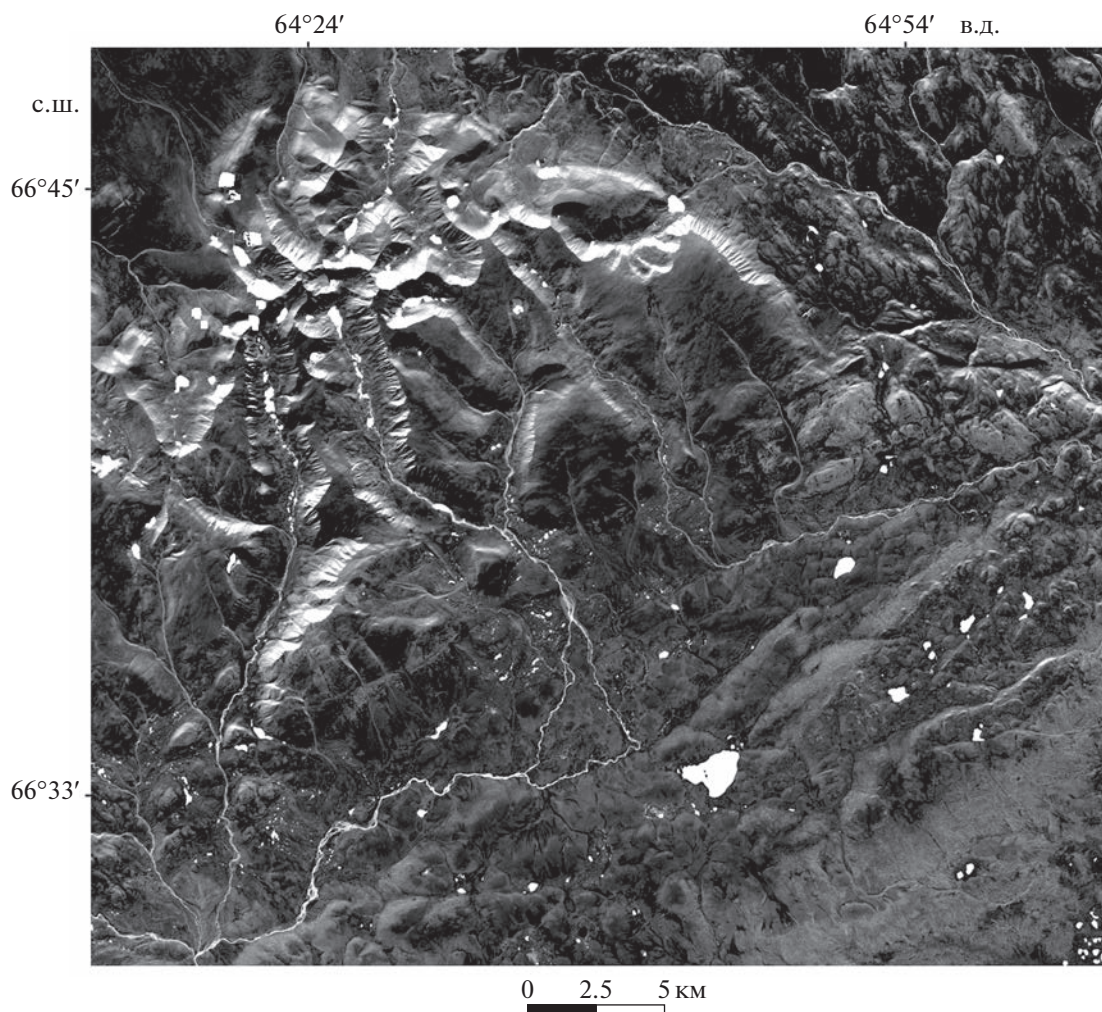


Рис. 4. Изображение после применения PC1 в черно-белом градиенте для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

4. Ручное и автоматическое извлечение линеаментов. Линеаменты — это прямолинейные или приблизительно линейные формы рельефа, которые распространены на поверхности Земли и связаны со структурными элементами (Ekneligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Abdullah et al., 2010; Thannoun, 2013), выделения морфологической системы кальдер (Verdiansyah, 2017, Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализации (Hubbard et al., 2012) и др.

Ручное извлечение. Первым этапом ручного выделения линеаментов является статистическая обработка данных КА Landsat-8 МГК с целью улучшения структурной информативности, которая содержится в PC1. На втором этапе оператором по структурно-геоморфологическим критериям проводится оцифровка и интерпретация линеаментов. Данный способ широко используется для заверки линеаментов, извлеченных авто-

матическим способом, и зачастую дополняет его (Kocal et al., 2004). Однако ручное выделение структурной информации может быть сложной задачей, требующей много времени и сильно зависит от опыта оператора (Masoud, Koike, 2006). На рис. 8 представлена морфоструктурная карта Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

Преимущества и недостатки ручного и автоматического способов выделения линеаментов можно найти в работах (Hung et al., 2002; Ramli et al., 2010).

Автоматическое выделение линеаментов выполнялось посредством модуля LINE, встроенного в ПО PCI Geomatica. Модуль LINE извлекает линейные объекты из изображения и преобразует их в векторные сегменты (полилинии) (рис. 9). Модуль включает в себя несколько показателей, которые связаны с характеристиками выделяемых линеаментов и цифрового изображения (масштаб, разрешение) (Sarp, 2005).

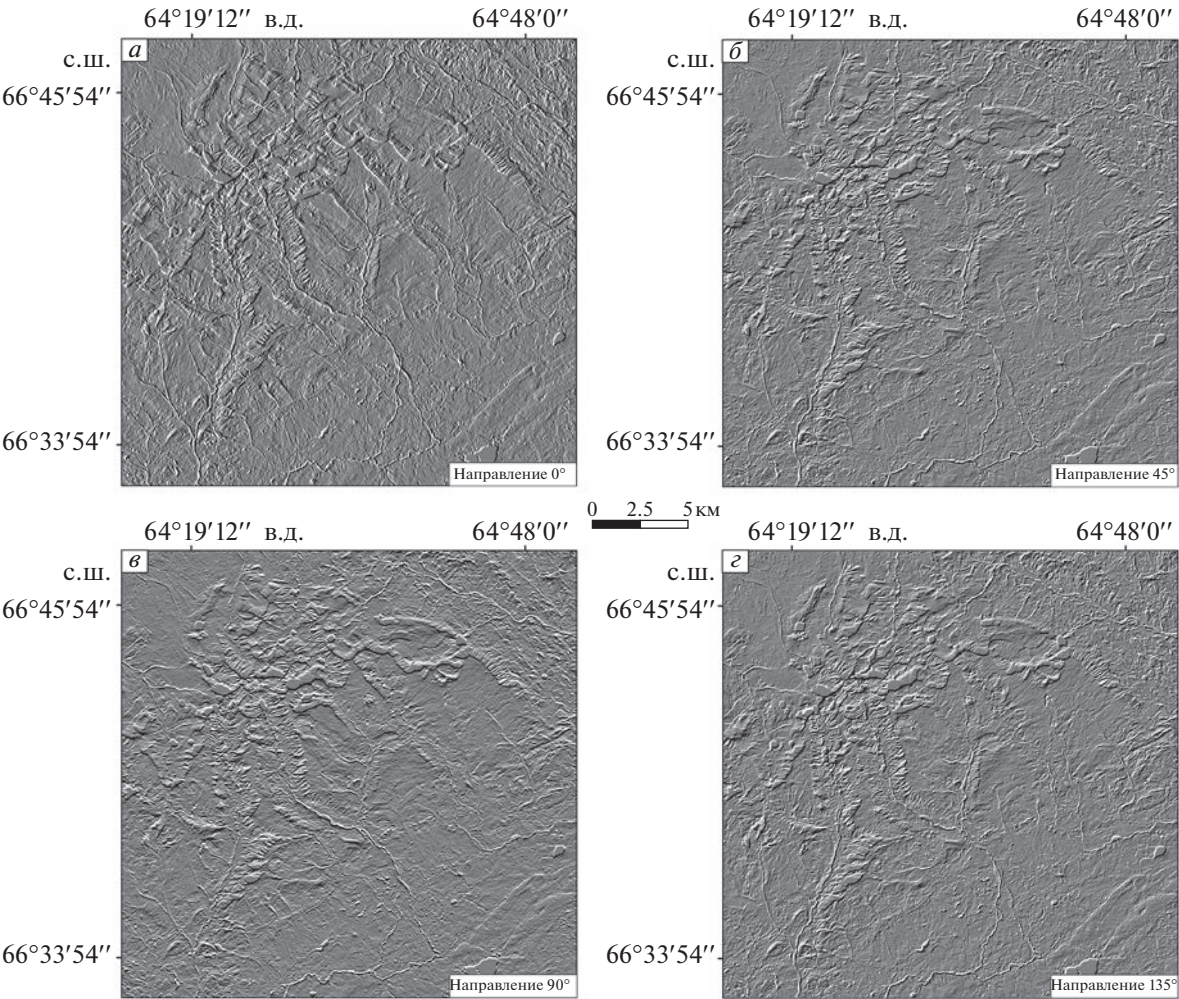


Рис. 5. Изображение, отфильтрованное по четырем основным направлениям, для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории: *а* – направление С–Ю (0), *б* – направление СВ–ЮЗ (45), *в* – В–З направление (90), *г* – направление СЗ–ЮВ (135).

Более подробную информацию о данном способе можно получить в статьях (Mallast et al., 2012; Rahnama, Gloaguen, 2014). В настоящем исследовании аналитическим методом подобраны оптимальные параметры для благоприятного выделения линеаментов из полученного изображения с помощью нечеткой логики (табл. 2).

На рис. 9 показаны результаты автоматического выделения линеаментов.

Направление линеаментов анализируется путем создания диаграмм-роз для каждой из линеаментных схем, которые отражают их количество и ориентацию. На основе роз-диаграмм для линеа-

Таблица 2. Параметры модуля LINE, используемые при выделении линеаментов

Параметр, аббревиатура	Описание	Значения по умолчанию	Подобранные параметры
РФ	Радиус фильтра (в пикселях)	10	5
ПГП	Порог градиентного перехода (в пикселях)	100	60
ПДК	Порог длины кривой (в пикселях)	30	10
ПОА	Порог ошибки аппроксимации (в градусах)	3	2
ПОУ	Порог образующего угла (в градусах)	30	30
ПРСП	Порог расстояния между связующими пикселями (в пикселях)	20	20

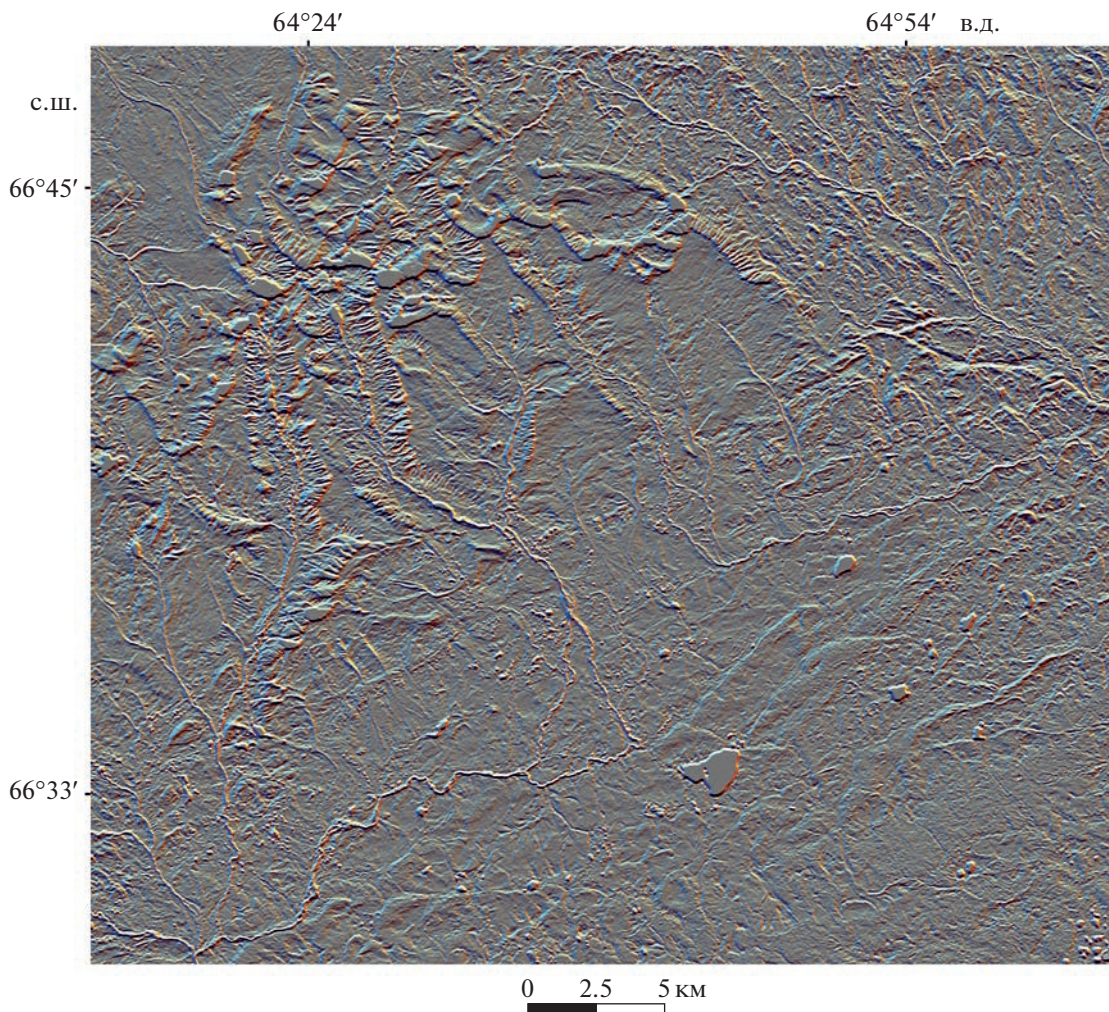


Рис. 6. RGB композит, составленный из трех наиболее информативных направлений (R: 0°, G: 45° и B: 90°) для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

ментов, выделенных автоматическим способом, были определены основные направления структур – СЗ и СВ (второстепенные) (рис. 10, а). Доминирующие ориентировки СВ направления получены для линеаментов, извлеченных ручным способом (рис. 10, б).

Роза-диаграмма для объединённых линеаментов отражает тренд преимущественно СВ направления, при этом тренд СЗ ориентации, выявленный ручным способом, проявлен слабо, что обусловлено малым количеством линеаментов (рис. 10, в). Следовательно, при анализе систем вероятностных структурных нарушений необходимо рассматривать отдельно каждый из способов.

Пространственный анализ ГИС состоит из трех основных этапов: (1) построение схем плотности линеаментов, (2) их сопоставление с известными рудопроявлениями полиметаллической специализации и (3) выделение перспективных участков на данный тип минерализации.

Построение схем плотности линеаментов. Схема плотности линеаментов – параметр, используемый для корреляционного анализа с другой геологической информацией при анализе линеаментов и картографических исследованиях (Zhumabek et al., 2017). Данные схемы представляют собой информацию о концентрации линеаментов на единицу площади. В настоящем исследовании схемы плотности линеаментов были построены по результатам ручного и автоматического способов, а также их объединения (рис. 11, а, 11, б, 12).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 7 для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории отражены 3 вида линеаментов, полученных при помощи ручного метода выделения на основе РС1 и геофизических данных, а также тектонические структуры, снятые с геологической карты. Ана-

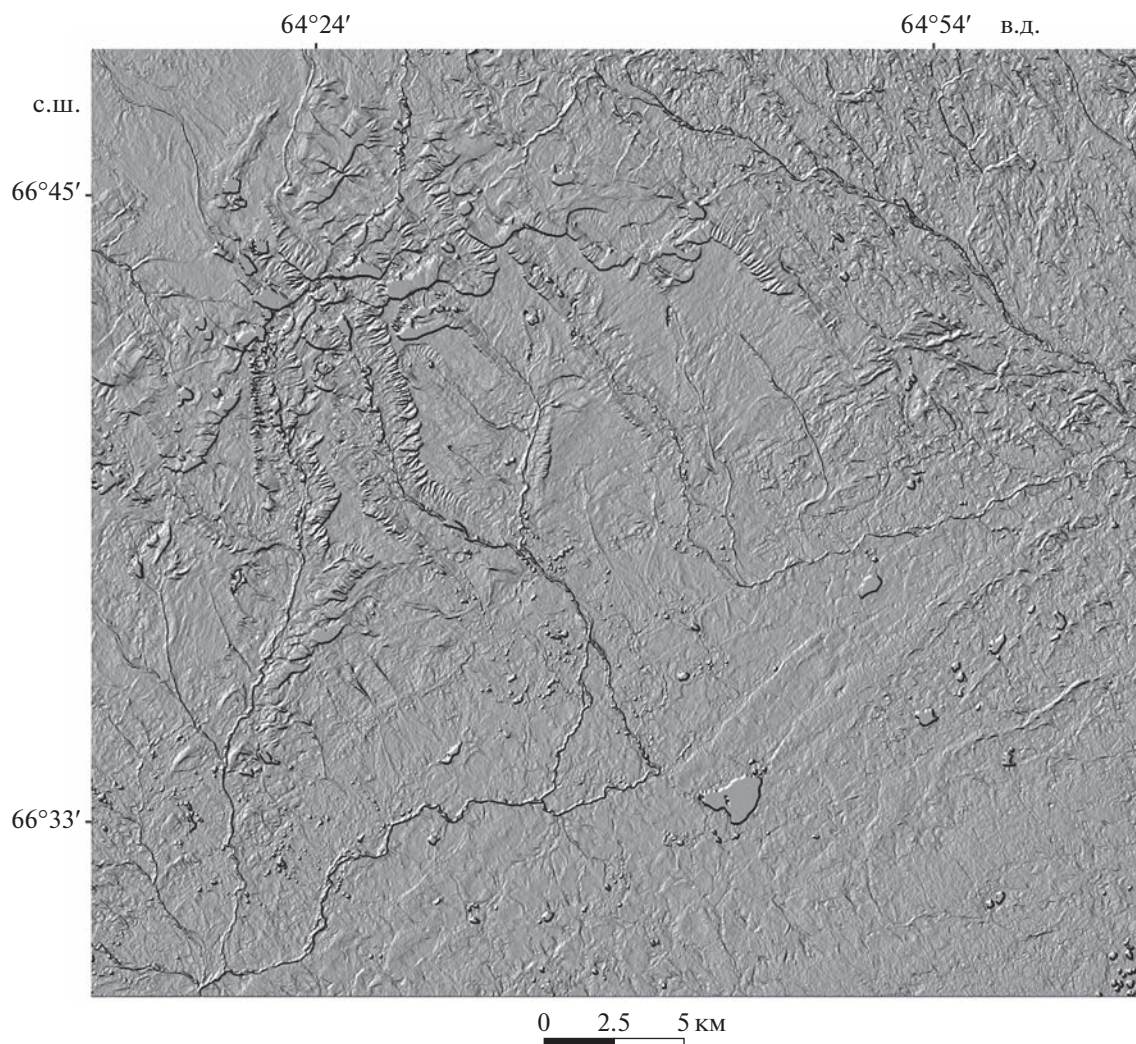


Рис. 7. Результат применения инструмента “Нечеткое наложение” для Маниую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

лиз полученных результатов показал, что на СЗ площади локализована крупная полукольцевая структура (морфоструктура) 1-го порядка диаметром около 26 км. На СЗ и СВ изображения доминируют структуры СЗ направления. В ЮЗ области преобладают линеаменты СВ и СЗ ориентировок. В восточной части — СВ направления. Протяженные структуры (до 20 км), вероятно, отражают дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории и играют рудоконтролирующую роль. Известные в районе рудопроявления полиметаллической специализации расположены по периметру данной полукольцевой морфоструктуры, к которой приурочены рудопроявления Fe—Ti—V минерализации.

По результатам автоматического метода выделения в СЗ и СВ частях изображения преобладают структуры СВ и СЗ ориентировок (см. рис. 9).

В ЮЗ части изображения доминируют линеаменты СВ направления. В восточной части — только СВ ориентировки.

Нижняя часть рисунка характеризуется большим количеством структур как для автоматического, так и ручного способов, соответственно. Видимо, это связано с мощным чехлом четвертичных отложений до 15 м (Гессе и др., 1975).

Несогласие в преобладающих ориентировках линеаментов (в СЗ, ЮЗ и СВ областях изображения) для двух методов, скорее всего, связано с (1) большим количеством структур, выделенные автоматическим методом; (2) линеаментами, которые могли быть не учтены в ходе ручного выделения. Следовательно, полученные результаты необходимо рассматривать совместно.

Известные рудопроявления и точки минерализации полиметаллической специализации

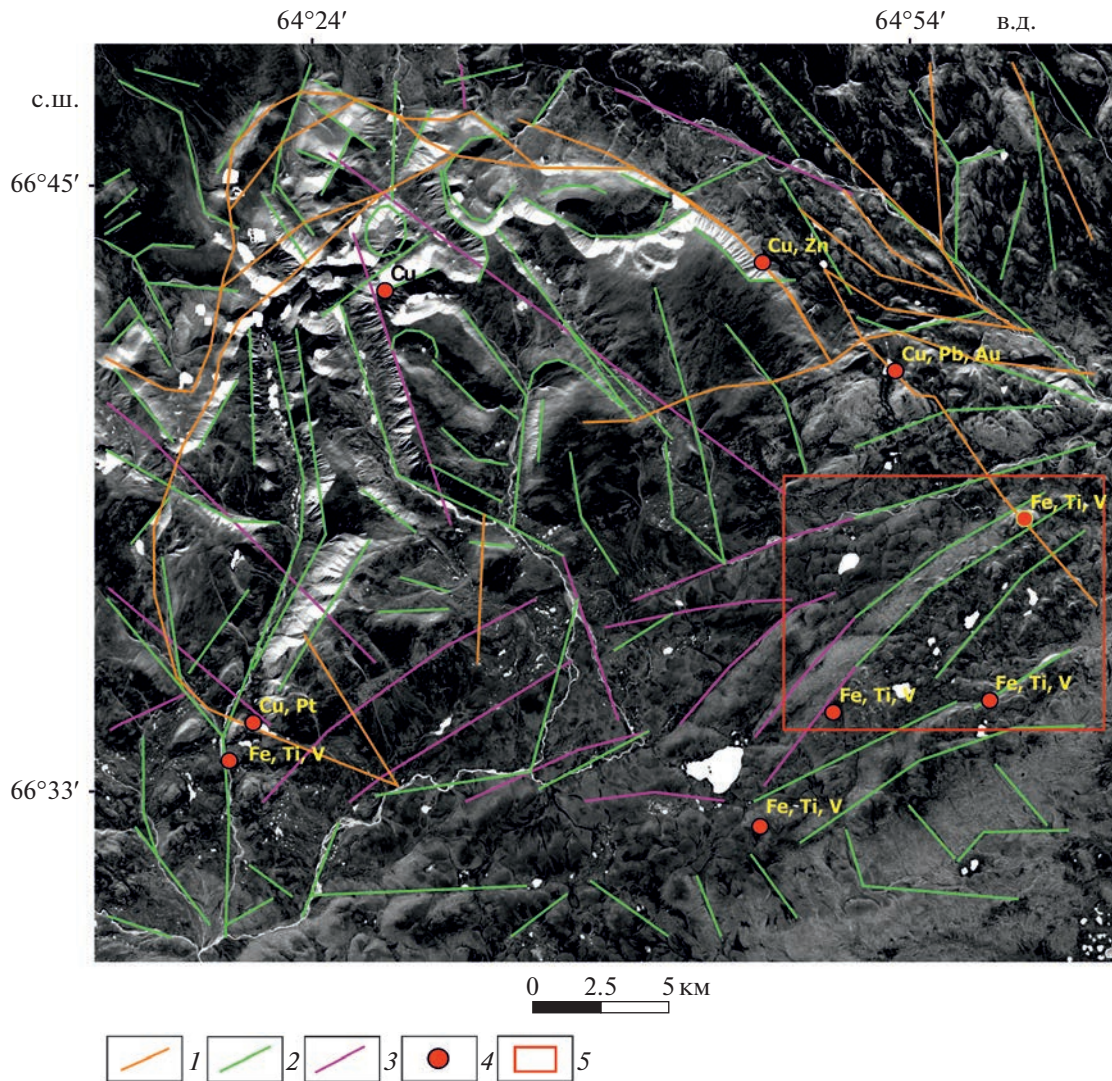


Рис. 8. Морфоструктурная карта (ручное выделение линеаментов) по РС1 для Манюкю-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Условные обозначения: 1–2 – разломы: 1 – взятые с геологической карты по (Шишкин и др., 2007); 2 – извлеченные по геофизическим данным (Гессе и др., 1975), 3 – линеаменты, выделенные на основе РС1; 4 – известные в районе рудопроявления полиметаллической минерализация, 5 – границы Манюкю-Варчатинского рудного узла.

принадлежат красным и оранжевым зонам (зоны с наиболее высокой плотностью линеаментов) как для автоматического, так и ручного способа выделения. Это связано с тем, что эти объекты локализованы в горной области, где дешифрируемость является наиболее благоприятной. При этом рудопроявления Fe–Ti–V минерализаций локализуются преимущественно в зонах с минимальной плотностью. Схемы плотности линеаментов, полученные автоматическим и ручным способами, коррелируются.

На рис. 12 показана объединенная схема плотности линеаментов (ручной и автоматический способы) и наложенная на нее морфоструктурная карта. Большая часть высоких значений плотности линеаментов локализовано в ЮЗ, СЗ и СВ ча-

стях изображения. Центральная часть характеризуется слабой плотностью, вероятно, из-за мощного чехла четвертичных отложений.

На схемах плотности линеаментов (см. рис. 11, а, 11, б) значения концентрации плотности отражено сине-красным градиентом, где наименьшие значения имеют синий цвет, а максимальные – красный.

Высокие значения плотности линеаментов и крупная полукольцевая морфоструктура 1-го порядка в сочетании с протяжёнными линеаментами СВ и СЗ направлений указывают на благоприятные условия для обнаружения на исследуемой территории данного типа минерализации. Выявленные ранее рудопроявления также локализуются в зонах с высокими значениями плотности и связаны со структурами, играющими рудокон-

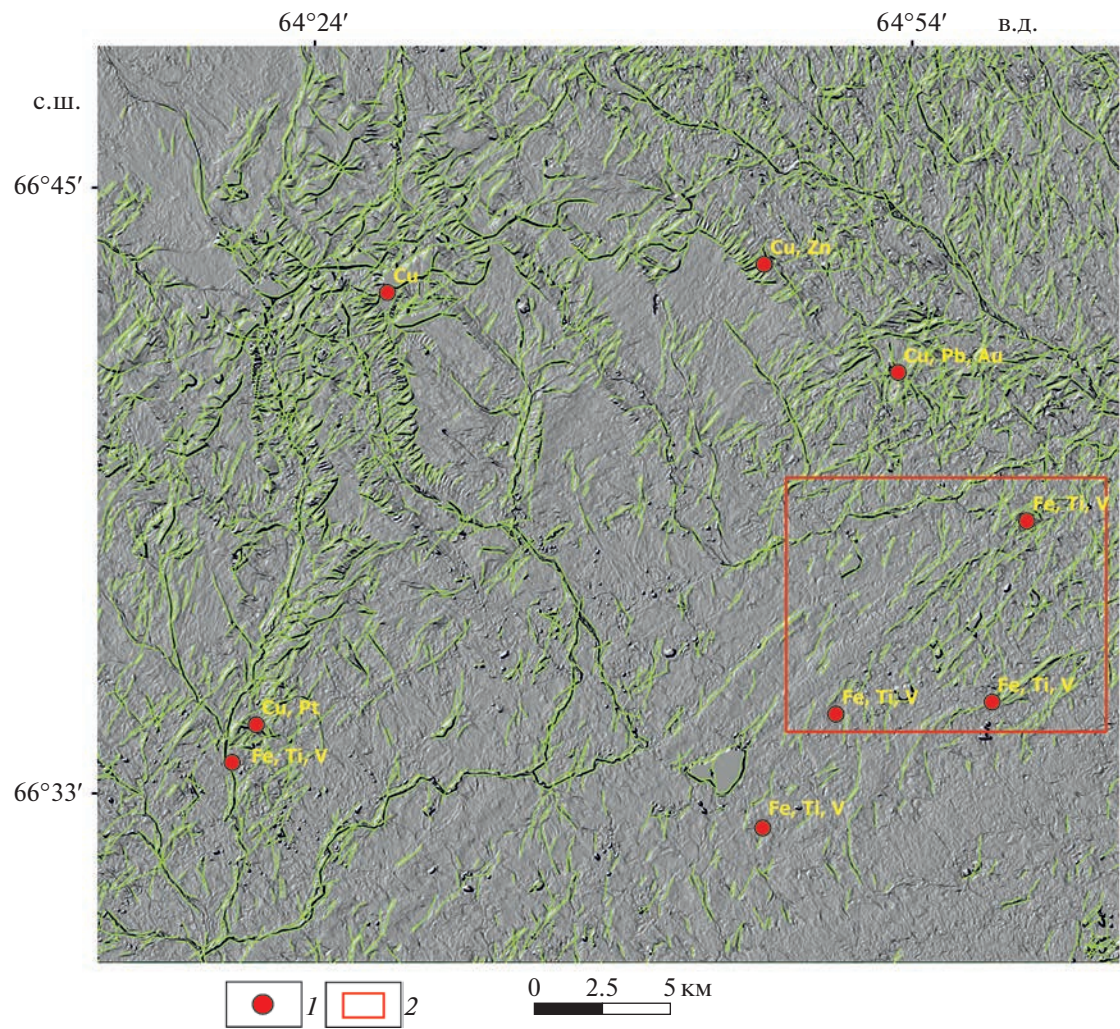


Рис. 9. Карта, полученная с помощью автоматического выделения линеаментов модулем LINE, для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Условные обозначения 1 и 2 соответствуют рис. 8.

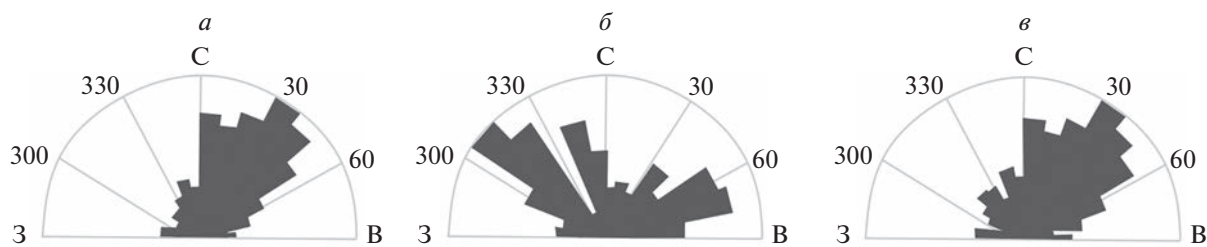


Рис. 10. Розы-диаграммы, выделенные автоматическим (а), ручным (б) и объединенным (в) способами, для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

тролирующую роль. В результате было выделено 6 перспективных участков. Известные в районе рудопроявления и пункты минерализации входят в околорудные области, например, в площади №1 локализуется Cu-Pt рудопроявление. Это говорит о выборе правильного подхода к прогнозированию рудной минерализации.

ВЫВОДЫ

В результате применения подхода к ЦЧМЗ, основанного на выявлении зон с высокой плотностью линеаментов, рассматриваемых в качестве прогнозного признака локализации рудной минерализации, можно сделать следующие выводы:

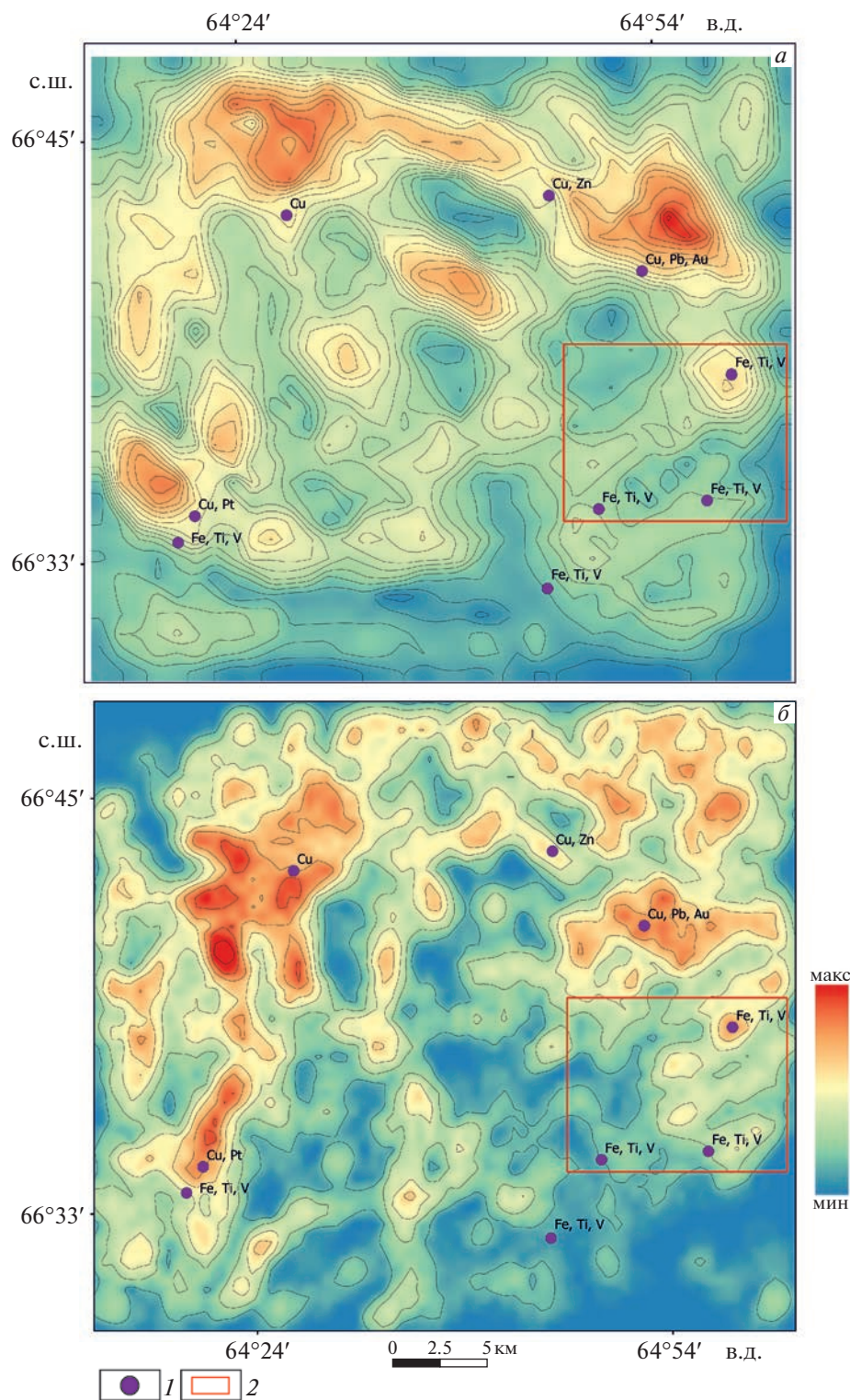


Рис. 11. Схемы плотности линеаментов, полученные ручным (а) и автоматическим способами (б), для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Условные обозначения 1 и 2 соответствуют рис. 8.

1. Пространственный анализ морфоструктурной карты, построенной на основе результатов ручного метода выделения линеаментов по РС1 и

геофизическим данным, показывает, что известные в районе рудопроявления и пункты минерализации полиметаллической специализации контро-

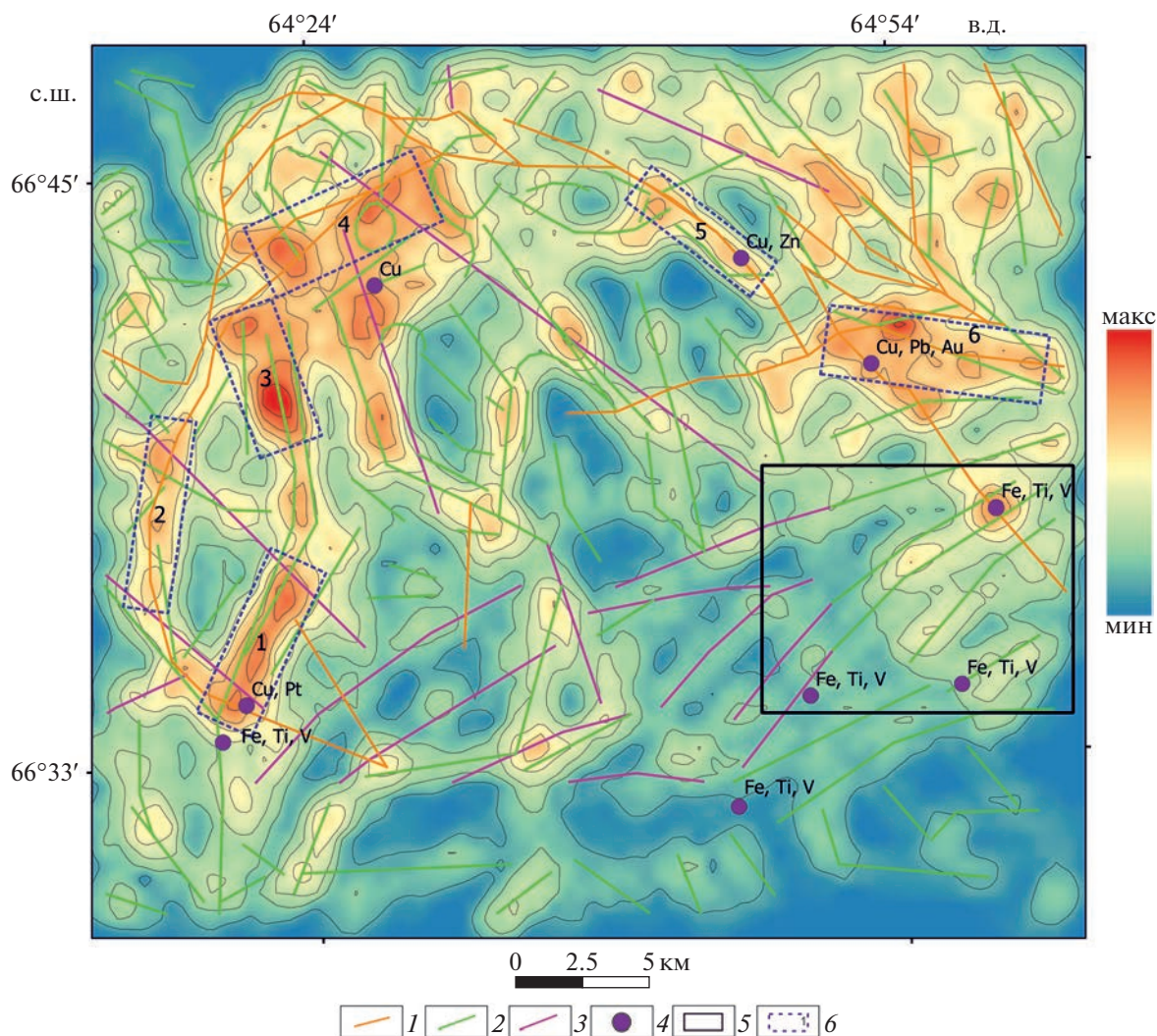


Рис. 12. Объединенная схема плотности линеаментов (ручной и автоматический способы) и морфоструктурная карта с выделенными границами перспективных участков на полиметаллический тип минерализации для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Обозначения 1–4 соответствуют рис. 8; 5–6 – границы: 5 – Манюкую-Варчатинского рудного узла, 6 – перспективные для выявления полиметаллической минерализации.

лируются протяженными структурами (до 20 км) преимущественно СВ и СЗ простирания и расположены вдоль полукольцевой морфоструктуры 1-го порядка.

2. Несогласие в преобладающих ориентировках линеаментов (в СЗ, ЮЗ и СВ областях изображения) для ручного и автоматического методов обусловлено (1) большим количеством структур, выделенные автоматическим методом; (2) линеаментами, не учтенными при ручном выделении. Следовательно, полученные результаты необходимо рассматривать совместно.

3. Созданная схема плотности линеаментов позволила выявить закономерность в локализации рудных объектов, расположенных вдоль ру-

доконтролирующих протяженных структур (выделенных ручным способом), а также выделить шесть перспективных участков для прогноза полиметаллической минерализации.

Предложенный подход, используемый в данном исследовании, может быть применен к другим полярным и арктическим регионам для выявления зон полиметаллического оруденения с использованием информации КА Landsat-8 и других более детальных наборов данных ДЗ Земли.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В., Галямов А.Л., Мурашов К.Ю. Арктические ресурсы золота в глобальной перспективе // Арктика: экол. и экон. 2014. № 4(16). С. 28–37.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др. Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геол. руд. местор. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Гессе В.Н., Дембовский У.С., Монастырь У.С. и др. Карта четвертичных образований. Мас. 1 : 200000 (1-е изд.). Уральская сер. Лист Q-41 – Воркута. ВСЕГЕИ. 1975.
- Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. Межвузовский научный сборник. Уфа. 2012. 193 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Мас. 1 : 1000000 (3-е поколение). Уральская серия. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Коновалов А.Л., Зылёва Л.И., Казак А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (3-е покол.). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Кременецкий А.А. Обоснование поисковых и поисково-ревизионных работ на рудное золото в пределах Манюкую-Варчатинского рудного узла (рудопоявления: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное). Мас. 1 : 10000. М.: ФГУП ИМГРЭ, 2012. 45 с.
- Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000 (2-е изд., цифровое). Серия Полярно-Уральский. Лист Q-41-XVI (Хордюз). Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Шишкин В.А., Астапов А.П., Кабатов Н.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 3-е покол.). Уральская сер. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Abdullah A., Akhir J. M., Abdullah I. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia // Electr. J. Geotech. Engin. 2010. V. 15(6). P. 949–958.
<https://doi.org/10.1039/CS9962500401>
- Beygi S., Talovina I., Tadayon M., et al. Alteration and structural features mapping in Kacho Mesqal zone Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration // Intern. Jour. of Image and Data Fusion. 2020. 12(1).
<https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1838628>
- Bolouki S.M., Ramazi H.R., Maghsoudi A., et al. Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran // Remote Sens. 2020. 12. 105.
<https://doi.org/10.3390/rs12010105>
- Bonham-Carter G.F. Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists, 1994. 416 p.
- Carranza E.J.M. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, 2008. V. 11. 351 p.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. J. Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
<https://doi.org/10.1080/01431160600606882>
- Duuring P., Hagemann S.G., Novikova, Y., et al. Targeting iron Ore in banded iron formations using ASTER data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia // Econ. Geol. 2012. V. 107. P. 585–597.
- Ekneligoda T.C., Henkel H. Interactive spatial analysis of lineaments // J. Comp. and Geos. 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.-P., et al. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals // Z. Deutschen Ges. Geowissenschaften. Bd 2012. V. 163. № 1. P. 9–41.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Gupta R.P. Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- 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. Available at:
<http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>.
- Hung L., Batelaan O., Dinh N.Q., et al. Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La-NW Vietnam) // J. Cave Karst Stud. 2002. V. 64. P. 23–33.
- Hung Q., Batelaan O., De Smedt F. Lineament extraction and analysis, comparison of Landsat ETM and Aster imagery // Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, Proc. of SPIE. 2005. 5983, 5983. P. 1–12.
- Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd edn., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T. Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, Uk, 2-d edition., 2002. 487 p.
- 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. V. 107. P. 239–247.
- Kocal A., Duzgun H., Karpuz C. Discontinuity Mapping with Automatic Lineament Extraction from High Resolution Satellite Imagery // In Proc. of the XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turkey. P. 2–6.
- 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. // Intern. J. Rem. Sen. 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>
- Mallast U., Gloaguen R., Geyer S. et al. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012. V. 15. P. 2665–2678.
- Marion A. Introduction aux techniques de traitement d'images. Eyrolles, Paris, 1987. P. 127–167.

- Masoud A., Koike K. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *J. Afr. Earth Sci.* 2006. V. 45. P. 467–477.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.07.010>
- Moradpour H., Paydar G.R., Feizizadeh B. et al. Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran // *Intern. J. Image and Data Fusion*. 2021. <https://doi.org/10.1080/19479832.2021.1915395>
- Nawaz A., Magiera J. Remote sensing based geological mapping and mineral exploration of the area of North Waziristan // 15th SGA Meeting. Glasgow. UK. 2019. V. 3. P. 1378–1381.
- Nykänen V., Groves D.I., Ojala V.J. et al. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – Gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland // *Aust. J. Earth Sci.* 2008. V. 55. P. 25–38.
- Pour A.B., Park Tae-Yoon S., Park Y. et al. Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the North-eastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // *Rem. Sens.* 2019. 11(20), 2430. <https://doi.org/10.3390/rs11202430>
- Pour A.B., Sekandari M., Rahmani O. et al. Identification of Phyllosilicates in the Antarctic Environment Using ASTER Satellite Data: Case Study from the Mesa Range, Campbell and Priestley Glaciers, Northern Victoria Land // *Rem. Sens.* 2021. 13(1). 38. <https://doi.org/10.3390/rs13010038>
- Pour A.B., Zoheir B., Pradhan B. et al. Editorial for the Special Issue: Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Data for Mineral Exploration and Environmental Monitoring of Mined Areas // *Rem. Sens.* 2021. 13, 13, 519. <https://doi.org/10.3390/rs13030519>.
- Rahnama M., Gloaguen R. A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction // *Rem. Sens.* 2014. 6. P. 5938–5958. <https://doi.org/10.3390/rs6075938>
- Ramli M.F., Yusof N., Yusoff M.K. et al. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2010. 69. P. 215–233.
- Sarp G. Lineament Analysis From Satellite Images, North-West Of Ankara. Msc thesis, Middle East Technical University, 2005. 76 p.
- Schowengerdt R.A. Remote sensing: models and methods for image processing, sample correlation coefficient for image enhancement // *Int. J. Remote Sens.* 2007. V. 27(16). *Sets Syst.* 4 (1). P. 37–51.
- Süzen M.L., Toprak V. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey // *Intern. J. Rem. Sen.* 1998. 19(6). P. 1101–1114.
- 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. J. 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 J. Geography*. 2019. 51, 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>.
- Verdiansyah O. Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *J. Teknologi Technoscienti*, 2017. 9(2).
- Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Inf. Control*. 1965. V. 8(3). P. 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241)
- Zhang N., Zhou K., Du X. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China // *J. Afr. Earth Sc.* 2017. 128. P. 84–96.
- Zhumabek Z., Bibossinov A.A. Fremd Automated lineament analysis to assess the geodynamic activity areas // *Procedia Computer Science*. 2017. V. 121. P. 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.091>
- Zoheir B., Emam A., Abdel-Wahed M. et al. Multispectral and Radar Data for the Setting of Gold Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt // *Remote Sens.* 2019. V. 11. 1450.

Application of Landsat-8 Satellite Data to Predict Ore Mineralization for the Northern Territories on the Example of the Central Part of the Maloural Zone (The Polar Urals)

J. N. Ivanova^{1, 2} and I. O. Nafigin¹

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*

A new approach was developed during this study. It is focused on identifying probabilistic zones of increased fracturing (zones with a high density of lineaments), considered as a predictive feature for the localization of ore mineralization in the central part of the Malouralskaya zone (part the Polar Urals). This area is promising for the identification of ore occurrences of the polymetallic type (Fe, Cu, Cu–Zn, Au–Cu). Density maps of lineaments were built basis on the developed approach. In addition, predictive schemes for the distribution of highly permeable rock zones and promising areas for the polymetallic mineralization was identified, taking into account geological information, the distribution of mineral resources, and the outcome of remote sens-

ing data processing. The last is based on identifying structures by manual and automatic approaches and their integration using the theory of fuzzy logic. Morphostructure maps were obtained from Landsat-8 data. These maps show that the known polymetallic ore occurrences in the region (Cu, Cu–Zn, Cu–Pb–Au, Fe–Ti–V, Cu–Pt) are located along the perimeter of a large morphostructure of the 1st order, or near extended tectonic structures for up to 20 km with mainly NE and less often NW trends. We identified six prospective zones by comparing remote sensing results with the geological map of the studied territory and known ore occurrences. The highlighted areas showed spatial consistency with several known polymetallic ore occurrences.

Keywords: satellite images, fuzzy logic, lineament density analysis, polymetallic occurrence, manual and automatic lineaments extraction, morphostructure map, the Polar Urals, Landsat-8, remote sensing data processing

REFERENCES

- Abdullah A., Akhir J. M., Abdullah I.* Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia // *Electr. J. Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958.
<https://doi.org/10.1039/CS9962500401>.
- Beygi S., Talovina I., Tadayon M. et al.* Alteration and structural features mapping in Kacho Mesqal zone Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration // *Intern. J. Image and Data Fusion.* 2020. V. 12(1).
<https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1838628>.
- Bolouki S.M., Ramazi H.R., Maghsoudi A. et al.* Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran // *Remote Sens.* 2020. V. 12. 105.
- Bonham-Carter G.F.* Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists, 1994. 416 p.
- Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Volkov A.V., Galyamov A.L., Murashov K.Yu.* Arctic gold resources from a global perspective // *Arctic: ecology and economy.* 2014. № 4(16). P. 28–37. (In Russian).
- Carranza E.J.M.* Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, 2008. V. 11. 351 p.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. J. Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
<https://doi.org/10.1080/01431160600606882>
- Duuring P., Hagemann S.G., Novikova Y. et al.* Targeting iron Ore in banded iron formations using ASTER data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia // *Econ. Geol.* 2012. V. 107. P. 585–597.
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // *J. Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.-P. et al.* Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals // *Z. Deutschen Ges. Geowissenschaften.* Bd 2012. V. 163. № 1. P. 9–41.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Geoinformation technologies in the design and creation of corporate information systems. Interuniversity scientific collection. Ufa. 2012. 193 p.
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Hesse V.N., Dembovsky Yu.S., Monastyrshin Yu.S. et al.* Map of Quaternary formations. Scale 1: 200000 (1st edition). Ural Series. Sheet Q-41 – Vorkuta. VSEGEI. 1975. (In Russian).
- 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. Available at:
<http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>.
- Hung L., Batelaan O., Dinh N.Q. et al.* Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La-NW Vietnam) // *J. Cave Karst Stud.* 2002. V. 64. P. 23–33.
- Hung Q., Batelaan O., De Smedt F.* Lineament extraction and analysis, comparison of Landsat ETM and Aster imagery // Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, *Proc. of SPIE.* 2005. 5983. P. 1–12.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd edn., 2005. P. 276–287, 296–301.
- Jolliffe I.T.* Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, Uk, 2-d edition., 2002. 487 p.
- 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. V. 107. P. 239–247.
- Kocal A., Duzgun H., Karpuz C.* Discontinuity Mapping with Automatic Lineament Extraction from High Resolution Satellite Imagery // In *Proc. of the XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turkey*, p. 2–6.
- Konovalov A.L., Zylova L.I., Kazak A.P. et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Series West Siberian. Sheet Q-42 – Salekhard: Explanatory note. Saint-Petersburg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian).
- Kremenetsky A.A.* Justification of search and prediction and audit works on gold within the Manukuyu-Varchatinsky ore cluster (the Polyarnaya Nadezhda, the Geokhimicheskoe, and the Blagodatnoye ore occurrence). Scale 1 : 10000. Moscow: FSUC IMGRE. 2012. 45 p. (In Russian).
- 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 // *Intern. J. Rem. Sen.* 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>.
- Mallast U., Gloaguen R., Geyer S. et al.* Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic ex-

- traction of lineaments from remote sensing data // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 15. P. 2665–2678.
- Marion A.* Introduction aux techniques de traitement d'images. Eyrolles, Paris, 1987. P. 127–167.
- Masoud A., Koike K.* Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *J. Afr. Earth Sci.* 2006. V. 45. P. 467–477.
- 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.
- Moradpour H., Paydar G.R., Feizizadeh B. et al.* Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran // *Intern. J. Image and Data Fusion*. 2021. <https://doi.org/10.1080/19479832.2021.1915395>
- Nawaz A., Magiera J.* Remote sensing based geological mapping and mineral exploration of the area of North Waziristan // 15th SGA Meeting. Glasgow. UK. 2019. V. 3. P. 1378–1381.
- Nykänen V., Groves D.I., Ojala V.J. et al.* Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – Gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland // *Aust. J. Earth Sci.* 2008. V. 55. P. 25–38.
- Pour A.B., Park Tae-Yoon S., Park Y. et al.* Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the North-eastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // *Rem. Sens.* 2019. 11(20), 2430. <https://doi.org/10.3390/rs11202430>
- Pour A.B., Sekandari M., Rahmani O., et al.* Identification of Phyllosilicates in the Antarctic Environment Using ASTER Satellite Data: Case Study from the Mesa Range, Campbell and Priestley Glaciers, Northern Victoria Land // *Rem. Sens.* 2021. V. 13(1). 38. <https://doi.org/10.3390/rs13010038>
- Pour A.B., Zoheir B., Pradhan B. et al.* Editorial for the Special Issue: Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Data for Mineral Exploration and Environmental Monitoring of Mined Areas // *Rem. Sens.* 2021. 13, 13, 519. <https://doi.org/10.3390/rs13030519>
- Rahnama M., Gloaguen R.* A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction // *Rem. Sens.* 2014. 6. P. 5938–5958. <https://doi.org/10.3390/rs6075938>
- Ramli M.F., Yusof N., Yusoff M.K. et al.* Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2010. 69. P. 215–233.
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I., Stepunin A.V. et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. Saint Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014, 256 p. (In Russian).
- Sarp G.* Lineament Analysis From Satellite Images, North-West Of Ankara. Msc thesis, Middle East Technical University, 2005. 76 p.
- Schowengerdt R.A.* Remote sensing: models and methods for image processing, sample correlation coefficient for image enhancement // *Int. J. Remote Sens.* 2007. 27(16), Sets Syst. 4(1). P. 37–51.
- Shishkin M.A., Astapov A.P., Kabatov N.V. et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (3rd gen.). The Ural series. Q41 – Vorkuta sheet: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. 541 p. (in Russian).
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V. et al.* Devonian island-arc magmatism of the Voikar zone in the Polar Urals // *Geotectonics*. 2018. V. 52. № 5. P. 531–563.
- Süzen M.L., Toprak V.* Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey // *Intern. J. Rem. Sen.* 1998. 19 (6). P. 1101–1114.
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (3rd generation). Ural Series. Sheet Q-41 – Vorkuta. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007, 541 p. (In Russian).
- 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. J. 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 J. Geography*. 2019. 51, 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Verdiansyah O.* Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *J. Teknologi Technosci*, 2017. V. 9(2).
- Vikentyev I.V., Ivanova Y.N., Tyukova E.E. et al.* Porphyry-Style Petropavlovskoe Gold Deposit, the Polar Urals: Geological Position, Mineralogy, and Formation Conditions // *Geol. Ore Dep.* 2017. V. 59(6). P. 482–520.
- Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Inf. Control*. 1965. V. 8(3). P. 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241)
- Zhang N., Zhou K., Du X.* Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China // *J. Afr. Earth Sc.* 2017. 128. P. 84–96.
- Zhumabek Z., Bibossinov A.A.* Fremd Automated lineament analysis to assess the geodynamic activity areas // *Procedia Computer Scien.* 2017. V. 121. P. 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.091>
- Zoheir B., Emam A., Abdel-Wahed M. et al.* Multispectral and Radar Data for the Setting of Gold Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt // *Remote Sens.* 2019. V. 11. 1450.