

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Камаев Артем Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НА ОСНОВЕ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

Специальность 1.6.20 – «Геоинформатика, картография»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
кафедры геологии и маркшейдерского дела,
чл.-корр. РАН В. Н. Татаринов

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) является одним из главных источников стратегического минерального сырья, включающего хромовые руды, титан, медь, олово, рассеянные элементы, платиноиды, золото, РЗЭ, апатитовые руды, алмазы и др. В *Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года* и *Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации до 2035 года* подчеркивается необходимость повышения эффективности геологического изучения недр. Развитие минерально-сырьевой базы в АЗРФ происходит в сложных инженерно-геологических условиях, экстремальном климате и слаборазвитой транспортной инфраструктуры. Указанные особенности приводят к значительному росту экономических и производственных затрат при выполнении геологического и структурно-тектонического картографирования, что определяет необходимость разработки эффективных дистанционных и геоинформационных методов исследования.

Геологическое и структурно-тектоническое картографирование является важнейшей частью геологического изучения недр. Данные о разломно-блоковом строении геологической среды используются на всех этапах поиска, разведки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Существующие подходы к картированию часто основаны на экспертном визуальном дешифрировании и использовании разрозненных наборов диагностических признаков, что придает результатам субъективность, ограничивает их воспроизводимость и существенно затрудняет формализацию и автоматизацию анализа при обработке данных на больших территориях.

В этих условиях методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационного моделирования становятся важнейшим инструментом получения пространственно согласованных данных о геологической среде на региональном и локальном уровнях. Современные спутниковые системы обеспечивают регулярное обновление данных даже на территории АЗРФ для задач геологического дешифрирования космических снимков. В то же время развитие вычислительных технологий позволяет переходить от экспертных интерпретаций к автоматизированным количественным процедурам анализа. На данный момент перспективным, но не в полной мере раскрытым направлением является комплексирование спектрометрического анализа (геологических спектральных индексов, композитов, методов выявления локальных контрастов) с текстурными подходами, включая расчет признаков на основе матриц совместных вероятностей уровней серого (Grey-Level Co-occurrence Matrix, GLCM). Комплексирование спектрометрического анализа с текстурными признаками GLCM позволяет учитывать не

только спектральные, но и пространственно-структурные характеристики геологических объектов, снижая неоднозначность и повышая устойчивость интерпретации. Это повышает точность выявления и классификации слабоконтрастных и структурно обусловленных геологических объектов.

В связи с этим разработка метода структурно-тектонического картографирования на основе комплексирования спектрального и текстурного анализа данных дистанционного зондирования Земли является актуальной научной и прикладной задачей. Ее решение имеет значение для повышения эффективности геологоразведочных работ, уточнения структурного строения территорий, выделения разломных зон и структурно-тектонических неоднородностей, а также для развития геоинформационных технологий анализа данных ДЗЗ в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

Объект исследования – структурно-тектонические неоднородности геологической среды, включая разломные зоны и связанные с ними пространственные различия поверхности, проявляющиеся в данных дистанционного зондирования Земли.

Предмет исследования – спектральные и текстурные признаки космических снимков, а также методы их геоинформационного анализа, применяемые для выявления и картографирования структурно-тектонических неоднородностей.

Цель работы состоит в разработке метода структурно-тектонического картографирования на основе комплексирования спектральных и текстурных признаков космических снимков и геоинформационного моделирования для повышения достоверности выявления и интерпретации структурно-тектонических неоднородностей в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

Идея работы заключается в том, что комплексное использование спектральных и текстурных признаков космических снимков в составе геоинформационной модели анализа пространственных данных ДЗЗ позволяет повысить достоверность выявления и интерпретации структурно-тектонических неоднородностей по сравнению с отдельным использованием этих признаков.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать современные подходы к структурно-тектоническому картографированию и определить их возможности и ограничения, в том числе для условий Арктической зоны Российской Федерации.
2. Исследовать информативность различных типов данных ДЗЗ для выявления структурных и литологических неоднородностей в районах поиска и разведки месторождений полезных ископаемых.

3. Обосновать комплекс признаков, объединяющий спектральные индикаторы (индексы/компози́ты, методы выявления яркостных контрастов) и текстурные показатели на основе матрицы совместной встречаемости уровня серого, позволяющих выделять структурно-тектонические неоднородности на космоснимках.

4. Разработать метод структурно-тектонического картографирования на основе спектрометрического и текстурного анализа данных ДЗЗ для условий Арктической зоны Российской Федерации. Разработать алгоритм практической реализации метода для обработки, интерпретации данных ДЗЗ, обеспечивающий автоматизированное дешифрирование разломных зон и структурно-тектонических неоднородностей.

5. Провести апробацию разработанного методического подхода и алгоритмов на примере месторождений АЗРФ и оценить его применимость для решения задач структурного дешифрирования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснован комплекс геологических спектральных индексов для геоинформационного моделирования, позволяющий при поиске и разведке месторождений в условиях Арктической зоны РФ выделять спектральные контрасты, ассоциированные с литологическими различиями и проявлениями структурно-тектонических неоднородностей.

2. Разработанный метод структурно-тектонического картографирования, основанный на комплексировании спектральных и текстурных признаков космических снимков, повышает достоверность выявления спектрально-текстурных контрастов, связанных с разломными зонами и структурными неоднородностями при исследовании геосистем в Арктической зоне Российской Федерации.

3. Реализация разработанного метода в виде алгоритмического аппарата обеспечивает адаптивное формирование интегрального спектрально-текстурного показателя I_{st} , формируемого на основе совместной оценки информативности спектральных и текстурных признаков космических изображений применительно к условиям Арктической зоны Российской Федерации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснован комплекс диагностических признаков структурно-тектонических неоднородностей для условий Арктической зоны Российской Федерации, включающий геологические спектральные индексы, эталонные спектральные образы и текстурные характеристики космических снимков, используемые в составе геоинформационной модели анализа пространственных данных ДЗЗ.

2. Разработан метод структурно-тектонического картографирования, основанный на комплексировании спектральных и текстурных признаков космических снимков и обеспечивающий выявление и интерпретацию спектрально-текстурных контрастов, связанных с разломными зонами и структурными неоднородностями геосистем Арктической зоны Российской Федерации.

3. Предложен алгоритмический аппарат реализации разработанного метода, обеспечивающий адаптивное формирование интегрального спектрально-текстурного показателя I_{st} на основе совместной оценки информативности спектральных и текстурных признаков на космических изображениях.

4. Разработана геоинформационная модель анализа пространственных данных ДЗЗ, обеспечивающая последовательный переход от расчета спектральных и текстурных признаков к структурно-тектонической интерпретации и картографированию неоднородностей геологической среды.

Соответствие диссертации паспорту специальности:

Исследование соответствует следующим направлениям паспорта специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография»:

п. 7. Картографические и геоинформационные методы и технологии анализа пространственных данных, моделирования пространственных явлений, объектов, процессов, отношений и систем.

п. 24. Космическое картографирование и географическое дешифрирование аэрокосмических снимков. Использование данных аэрокосмических съемок и глобальных навигационных спутниковых систем для картографирования и исследования геосистем.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются анализом отечественных и зарубежных исследований в области дистанционного зондирования Земли и геоинформационного анализа, применением современных методов спектрального и текстурного анализа многоспектральных спутниковых данных, воспроизводимостью алгоритмов обработки, сопоставлением результатов с фактическими геологическими данными, а также апробацией основных результатов на научных конференциях и семинарах.

Методы исследований включают: анализ и обобщение отечественных и зарубежных научных данных в области геоинформатики, геологического дешифрирования и дистанционного зондирования Земли; методы спектрометрического анализа спутниковых данных; расчет геологических спектральных индексов; методы текстурного анализа изображений на основе матриц совместных вероятностей уровней серого; методы анализа главных компонент, геоинформационное моделирование и пространственный анализ с

использованием ГИС-технологий; методы статистической обработки и интерпретации пространственно распределенных данных. Вычисления, обработка и визуализация результатов выполнялись с применением программных средств Google Earth Engine, QGIS и языков программирования Python и JavaScript.

Практическое значение и реализация результатов работы определяется задачами развития минерально-сырьевой базы и освоения месторождений в условиях Арктической зоны Российской Федерации и расширением возможностей структурно-тектонического картографирования и геодинамической интерпретации территорий месторождений на основе дешифрирования космоснимков. Результаты работы могут быть использованы при проведении геологического и структурно-тектонического картографирования, планировании и оптимизации геологоразведочных работ, выделении участков, требующих детальной структурной проверки, а также при разработке и сопровождении геоинформационных схем анализа данных ДЗЗ для арктических территорий.

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы доложены: на научных конференциях молодых ученых и аспирантов Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (Москва, 6–7 ноября 2024 г.; 5–6 ноября 2025 г.); на VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 12–16 мая 2025 г.); на Международной конференции приуроченной к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, НИТУ «МИСиС», 29 января – 2 февраля 2024 г., 3–7 февраля 2025 г.).

Результаты исследования докладывались на семинарах кафедры геологии и маркшейдерского дела НИТУ МИСИС и семинарах лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН.

Благодарности. Диссертант выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, чл.-корр. РАН, д.т.н. Татаринovu В.Н. за ценные консультации, внимательное сопровождение работы на всех ее этапах и моральную поддержку. Автор выражает благодарность зав. каф. «Геология и маркшейдерское дело», доц., к.т.н. Ческидову В.В. и ст. преп. Маневичу А.И., а также всему коллективу кафедры за ценные советы в ходе исследования. Автор выражает особую признательность академику РАН, д.ф.-м.н. А.Д. Гвишиани, а также всем коллегам из Геофизического центра РАН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены современные подходы к применению данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для геодинамического картографирования месторождений в условиях Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Показано, что ДЗЗ обеспечивает как статический анализ (выявление структурно-тектонических особенностей, литологических различий и геоморфологических элементов), так и динамический анализ, ориентированный на мониторинг изменений природных и техногенных процессов во времени.

АЗРФ обладает высоким ресурсным потенциалом, однако ее системное картографическое и структурно-геодинамическое обоснование затруднено из-за слабой и крайне неравномерной геологической изученности: крупномасштабные работы выполнены локально, а значительные территории, особенно островные, остаются недостаточно изученными. Это повышает неопределенность при оценке геодинамических опасностей и планировании горных работ и делает актуальным переход к методам, способным обеспечивать охват больших площадей. Исследования и научно-методическое обеспечение освоения минерально-сырьевой базы Арктической зоны РФ ведутся прежде всего в контуре государственных организаций, работающих по линии недропользования и геологического картографирования: Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), АО «Росгеология», ФГБУ Институт им. А.П. Карпинского. Существенный вклад в изучение минеральных ресурсов Арктики и арктического шельфа вносит ФГБУ «ВНИИОкеангеология» им. акад. И.С. Грамберга. В части аналитики и мониторинга состояния минерально-сырьевой базы (включая арктические регионы) выделяется ФГБУ «ВИМС». Нельзя не отметить и отдельные научно-исследовательские прикладные геологоразведочные работы на арктических территориях выполняемые институтом Арктики и Антарктики (ААНИИ РАН), Институтом геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН).

Проанализированы спутниковые системы ДЗЗ и их применимость в Арктике: рассмотрены оптические (мульти- и гиперспектральные), тепловые и радарные платформы, их разрешение и периодичность съемки, а также ограничения высоких широт (облачность, сезонность, дефицит освещения, трудности калибровки и верификации). Показано, что в ряде задач требуется комбинирование зарубежных и отечественных данных, учитывая особенности наблюдений в условиях АЗРФ. Отмечен значительный вклад ведущих российских ученых в развитие методической базы геологического дешифрирования космических снимков, а также в развитие геоинформатики и внедрение информационных

методов в геологоразведку и горное дело: Лупяна Е.А., Барталева С.А., Петрова В.А., Толпина В.А., Милосердовой Л.В., Ершова Д.В., Митник Л.М., Заболотских Е.В., Пожидаева В.А., Кондратьева В.Г., Рязанцева С.А., Фролова А.Д., Шевырева С.Л., Устинова С.А., Минаева В.А., Гвишиани А.Д., Мосейкина В.В., Соловьева А.А., Бондура В.Г., Ческидова В.В., Михайлова В.О., Мельника В.В., Беленко В.В., Стадника Д.А., Стадника Н.М., Гончаренко С.Н., Еременко А.А., Абрамяна Г.О., Кошкарёва А.В., Агафонова В.В., Лурье И.К., Щекиной М.А., Батугина А.С., Коликова К.С., Писецкого В.Б., Пармонова С.С., Темкина И.О., Паршина А.В., Кириченко Ю.В., Мельниченко И.А. и других.

Систематизированы признаки дешифрирования геологических структур (прямые и косвенные) и рассмотрены направления автоматизации интерпретации: фильтрация и анализ градиентов, морфометрический анализ по цифровым моделям рельефа, а также методы машинного обучения для классификации/сегментации геодинамических объектов, позволяющие снизить субъективность визуального дешифрирования и повысить воспроизводимость результатов.

Методической основой структурно-тектонического картографирования в АЗРФ является комплексная интеграция ДЗЗ, геологической информации и ГИС-технологий, обеспечивающая исследование существенно больших масштабов территорий, чем при опоре только на полевые методы; обозначены ключевые сложности арктических условий, требующие специальных подходов обработки и интерпретации.

На основании проведенного анализа сформулированы цель, идея и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены и обобщены методы дешифрирования разломных зон и структурно-тектонических неоднородностей по данным ДЗЗ. Выполнен обзор аналитических подходов: визуальное (экспертное) дешифрирование, спектральный анализ и геологические индексы, методы выделения главных компонент/уменьшения размерности растровых данных, расчет геоморфометрических показателей по цифровым моделям высот, автоматизированное дешифрирование на основе алгоритмов машинного обучения.

Рассмотрены теоретические и методические основы выявления геодинамических структур по данным дистанционного зондирования Земли. Показано, что спектральные характеристики горных пород определяются прежде всего их минералогическим составом, степенью гидратации, текстурными особенностями и вторичными преобразованиями, что позволяет использовать материалы ДЗЗ для распознавания литологических различий, зон выветривания, гидротермальных изменений и тектонических нарушений.

Различные литотипы пород обладают характерными спектральными подписями в видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах. Наибольшей информативностью при этом обладают области спектра, связанные с проявлением гидроксильных групп, молекулярной воды, карбонатных и железосодержащих соединений. Это позволяет использовать спектральные различия пород как основу для их дистанционного распознавания и для выделения участков, потенциально связанных с геодинамически активными зонами.

Вторичные процессы, включая метаморфизм, выветривание и гидротермальные преобразования, существенно изменяют исходную спектральную сигнатуру пород. В условиях тектонической нарушенности такие преобразования нередко усиливаются за счет повышенной проницаемости разломных зон и циркуляции флюидов, что приводит к формированию минералогических ореолов, фиксируемых по спектральным признакам. Следовательно, геодинамические структуры в материалах ДЗЗ проявляются не только как морфологические или линейные элементы, но и как зоны измененного спектрального отклика.

Спектральные индексы представляют собой важный класс производных признаков, позволяющих повысить информативность космических снимков при решении геологических задач. Их применение дает возможность выделять области, обогащенные оксидами железа, глинистыми минералами, карбонатами и сульфатами, что особенно важно при интерпретации разломных зон, областей изменения пород и минерализованных участков. Наибольший эффект достигается не при изолированном использовании отдельных индексов, а при их совместном анализе в составе цветовых композитов, усиливающих яркостные и минералогические контрасты.

Методы уменьшения размерности многоканальных данных, прежде всего метод главных компонент, позволяют существенно сократить избыточность исходной информации, подавить межканальную корреляцию и повысить контрастность геологически значимых объектов. Это делает PCA и сходные методы эффективным этапом предварительной обработки материалов ДЗЗ перед дешифрированием, классификацией и интеграцией с другими источниками данных.

В третьей главе представлено описание разработки метода структурно-тектонического картографирования на основе данных ДЗЗ, реализованного в виде воспроизводимого алгоритма, обеспечивающего последовательный переход от отбора исходных данных и их предварительной подготовки к формированию промежуточных аналитических слоев и итоговой интерпретационной схемы.

Алгоритм практической реализации метода включает несколько последовательных этапов: определение области исследования (ROI), отбор пригодных спутниковых сцен по сезонным и качественным критериям, маскирование неинформативных пикселей, формирование рабочего композита, расчет спектральных и текстурных признаков, нормирование полученных растровых слоев, их последующее комплексирование и геологическую интерпретацию.

В структуре метода выделены два взаимодополняющих модуля – спектральный и текстурный.

Спектральный модуль основан на применении адаптивного оценщика когерентности ACE (*Adaptive Coherence Estimator*), который позволяет выявлять участки повышенного спектрального сходства с заданным эталонным образом с учетом статистической структуры фоновой среды. Результатом работы данного модуля является не итоговая карта геологических объектов, а промежуточный слой спектральных контрастов, используемый для первичной геологической селекции территории.

В общем виде показатель ACE рассчитывается по формуле:

$$ACE(x) = \frac{(s^T K^{-1} x)^2}{(s^T K^{-1} s)(x^T K^{-1} x)},$$

где s – вектор целевого спектра, T – операция транспонирования, K^{-1} – обратная ковариационная матрица фонового сигнала, x – набор значений по каналам спутниковой съемки.

Значения ACE изменяются от 0 до 1, где 0 соответствует отсутствию сходства, а 1 – полному совпадению спектров с учетом фоновой статистики.

Опробовать детектор ACE было решено на Хибинском массиве, расположенном на Кольском полуострове в пределах Фенноскандинавского щита, и относящемся к Кольской щелочной провинции.

В работе были задействованы девять каналов – B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 и B12 – которые относятся к отражающей способности земной поверхности. Рабочий композит формировался из коллекции сцен, отобранных по пространственному положению, временному интервалу и общему уровню облачности. Из коллекции COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED были отобраны снимки за летне-осенний период (июль-сентябрь 2021 г.) с облачностью <40 % для территории Хибинского массива. Из отобранных сцен был сформирован безоблачный медианный композит.

Для расчета ACE использовалась облачная геоинформационная платформа Google Earth Engine (GEE) и реализуемый в ней язык JavaScript. Платформа обеспечивает доступ к архивам многоспектральных снимков Sentinel-2 и позволяет выполнять обработку данных без их предварительной локальной загрузки, используя встроенные средства линейной алгебры, статистики и фильтрации.

В качестве эталонного спектра s использовались лабораторные значения отражательной способности монацита – минерала-носителя редкоземельных элементов, широко распространённого в щелочных и щелочно-ультраосновных комплексах и рассматриваемого как индикатор потенциально перспективных редкоземельных проявлений, из открытой спектральной библиотеки USGS, адаптированные к спектральным каналам Sentinel-2 MSI методом свертки с функциями спектрального отклика сенсора (рисунок 1).

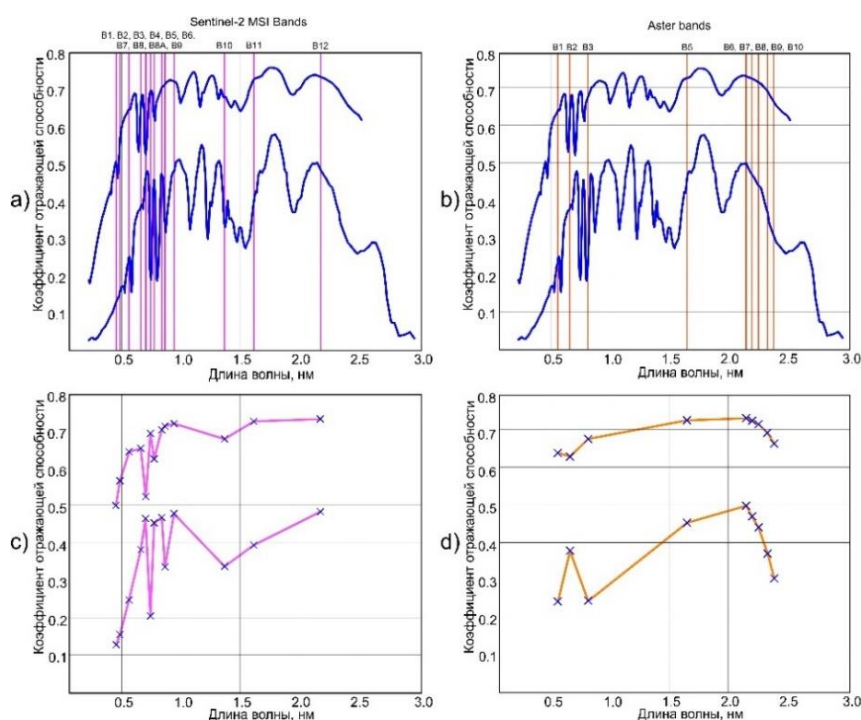


Рисунок 1 – а, б – лабораторные спектры монацита [Kokaly et al., 2017] и положения каналов Sentinel-2 MSI и ASTER, вертикальные линии указывают положения центров диапазонов каналов; с, d – спектры монацита, свернутые под спектральную дискретизацию Sentinel-2 MSI и ASTER

Наибольшие средние значения вектора фоновой среды μ_b , характеризующего усредненное состояние фоновой поверхности в каналах Sentinel-2 и используемого как опорный при вычислении отклонений спектра каждого пикселя от фонового уровня, отмечены в каналах ближнего инфракрасного и red-edge диапазонов, тогда как в видимом и коротковолновом инфракрасном диапазонах они ниже, что свидетельствует об

адекватности рассчитанного вектора для описания мультиспектральной структуры сцены (рисунок 2).

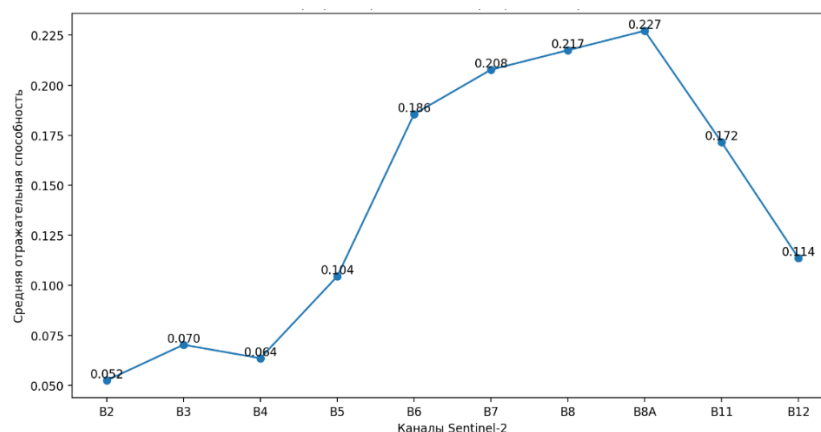


Рисунок 2 – Профиль среднего вектора фоновой среды

Для сопоставления фонового состояния сцены и эталонного спектра был построен сравнительный график среднего фонового спектра и целевого спектра монацита, приведенного к спектральной дискретизации каналов Sentinel-2 (рисунок 3). Анализ показал, что различия между ними распределены по нескольким каналам, наиболее заметно проявляясь в B12, B5, B4, B7 и B8. Это указывает на то, что разделение пикселей методом ACE обеспечивается совокупностью межканальных различий, а не отдельным спектральным диапазоном, и подтверждает достаточную контрастность выбранного эталонного спектра.

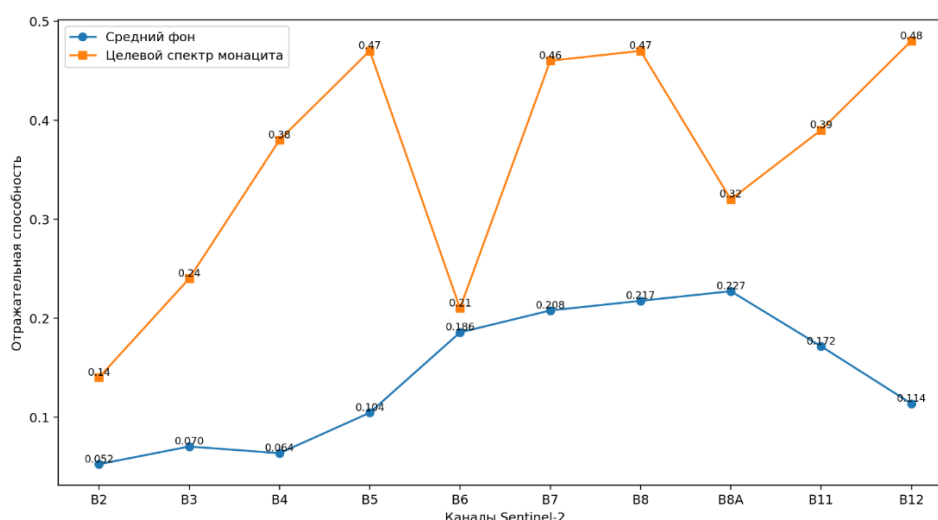


Рисунок 3 – Сопоставление среднего фонового спектра и целевого спектра монацита

Для анализа многомерной структуры фоновой среды была построена тепловая карта ковариационной матрицы K (рисунок 4). Наибольшая изменчивость фона выявлена в red-

edge-, NIR- и SWIR-каналах, прежде всего B7, B8A, B8, B11 и B12. Наиболее выраженные положительные ковариации характерны для каналов B6, B7, B8A и B8, что отражает их согласованное поведение в пределах сцены. Полученные результаты показывают, что фоновая среда обладает выраженной многомерной спектральной структурой, которую необходимо учитывать при расчете ACE.

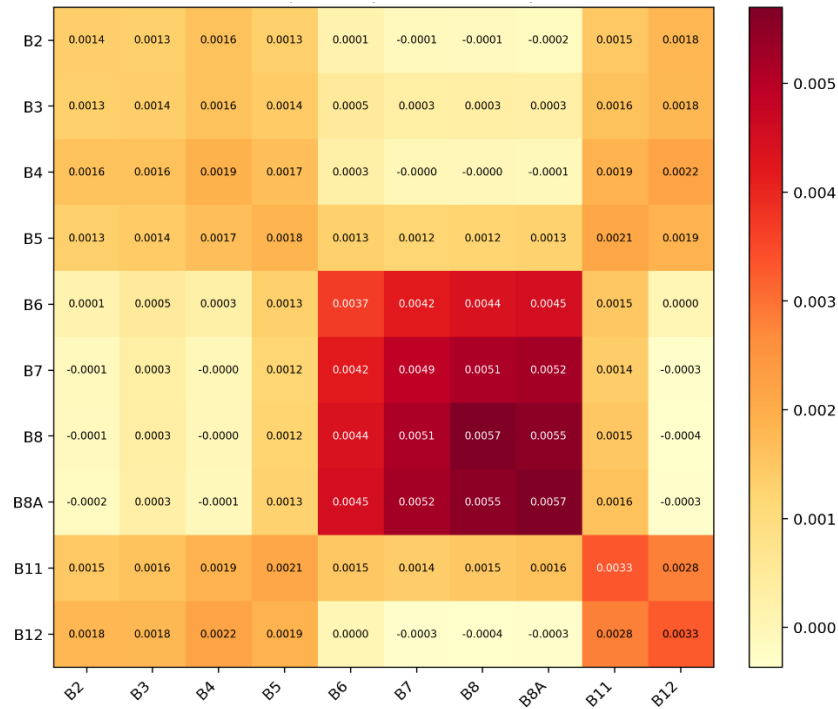


Рисунок 4 – Тепловая карта ковариационной матрицы K

После расчета непрерывного поля значений ACE в пределах рабочей области была выполнена его классификация по уровням спектрального контраста. Классификация площадей выполнялась на основе предварительного ранжирования непрерывного поля ACE по интервалам спектрального контраста. Сначала каждому валидному пикселю присваивался класс в зависимости от величины ACE, после чего для каждого класса формировалась бинарная маска и рассчитывалась суммарная площадь входящих в него пикселей с использованием функции площади пикселя.

Классификация строилась по правилу:

$$C(x) = \begin{cases} 0, & ACE(x) < T_1 \\ 1, & T_1 < ACE(x) < T_2 \\ 2, & T_2 < ACE(x) < T_3 \\ 3, & ACE(x) \geq T_3 \end{cases}$$

где $C(x)$ – класс пикселя, а T_1, T_2, T_3 – пороги ранжирования, заданные как:

$$T_1 = 0.10, T_2 = 0.20, T_3 = 0.35.$$

На этой основе была сформирована таблица площадей классов спектрального контраста, по которой были построены графики площадей и их долей в общей валидной площади. Параллельно была составлена общая таблица статистик ACE, из которой были извлечены ключевые описательные характеристики распределения, включая минимум, процентильные уровни, медиану, среднее значение и максимум.

Площадное распределение классов спектрального контраста показывает, что основная часть территории относится к фоновому классу: его площадь составляет 1206,18 км², или 70,8% валидной поверхности. Слабый контраст охватывает 277,94 км² (16,3%), умеренный – 161,70 км² (9,5%), высокий – 73,48 км² (4,3%). Таким образом, суммарная доля умеренного и высокого контраста составляет около 13,8%, что указывает на локальный, а не повсеместный характер спектрально значимых участков. Это свидетельствует о том, что спектральный модуль не переоценивает неоднородность сцены, а выделяет ограниченные зоны, потенциально представляющие геологический интерес.

Статистическое распределение значений ACE подтверждает локальный характер повышенного контраста. При минимуме, близком к нулю, медиана составляет 0,04100, среднее – 0,08734, 75-й процентиль – 0,12303, а 95-й – 0,33006 при максимуме 0,93286. Превышение среднего над медианой и резкий рост значений в верхней части распределения указывают на выраженную правостороннюю асимметрию и наличие правого хвоста. Это означает, что большинство пикселей характеризуется низким фоновым уровнем спектрального сходства, тогда как высокие значения сосредоточены в ограниченном числе локальных участков.

В целом результаты расчета ACE для Хибинского массива характеризуются статистической и площадной согласованностью. Доминирование фонового класса при ограниченной доле умеренного и высокого контраста подтверждает, что спектральный модуль решает задачу предварительного отбора потенциально значимых участков и служит основой для их дальнейшего уточнения в рамках комплексного анализа.

Текстурный модуль основан на расчете признаков матрицы совместной встречаемости уровней серого GLCM (*Grey-Level Co-occurrence Matrix*). В отличие от спектрального анализа, фиксирующего различия в отражательной способности, GLCM-признаки характеризуют пространственную организацию изображения: локальные перепады яркости, мозаичность, направленность, неоднородность и степень фрагментации поверхности. В работе рассмотрены такие показатели, как контраст, диссимилиарность, однородность, энергия, энтропия, дисперсия и корреляция. Их использование позволяет выделять зоны повышенной текстурно-структурной неоднородности, потенциально связанные с разломами, трещиноватостью и границами геологических блоков.

В разработанном алгоритме текстурный модуль выступает вторым обязательным блоком, компенсирующим ограничения спектрального анализа. Если спектральный модуль выявляет участки, сходные с эталонным спектральным образом, и потому чувствителен преимущественно к минералого-литологическим различиям, то он не описывает пространственную организацию поверхности. Между тем при структурно-тектоническом дешифрировании важны именно пространственные характеристики изображения: направленность яркостных переходов, степень фрагментации, мозаичность и взаимное расположение элементов. Поэтому GLCM-анализ рассматривается как самостоятельный модуль, переводящий описание изображения из спектрального пространства в пространство статистически выраженных пространственных отношений.

По результатам расчета текстурных GLCM-признаков по композиту Sentinel-2 на примере Павловского месторождения выделены наиболее информативные признаки – контраст, однородность, энтропия, энергия, дисперсия, диссимиларность и корреляция (рисунок 5, таблица 1). По данным признакам произведен синтез главных компонент и составлена карта предполагаемых разломов (основных и вторичных) (рисунок 6).

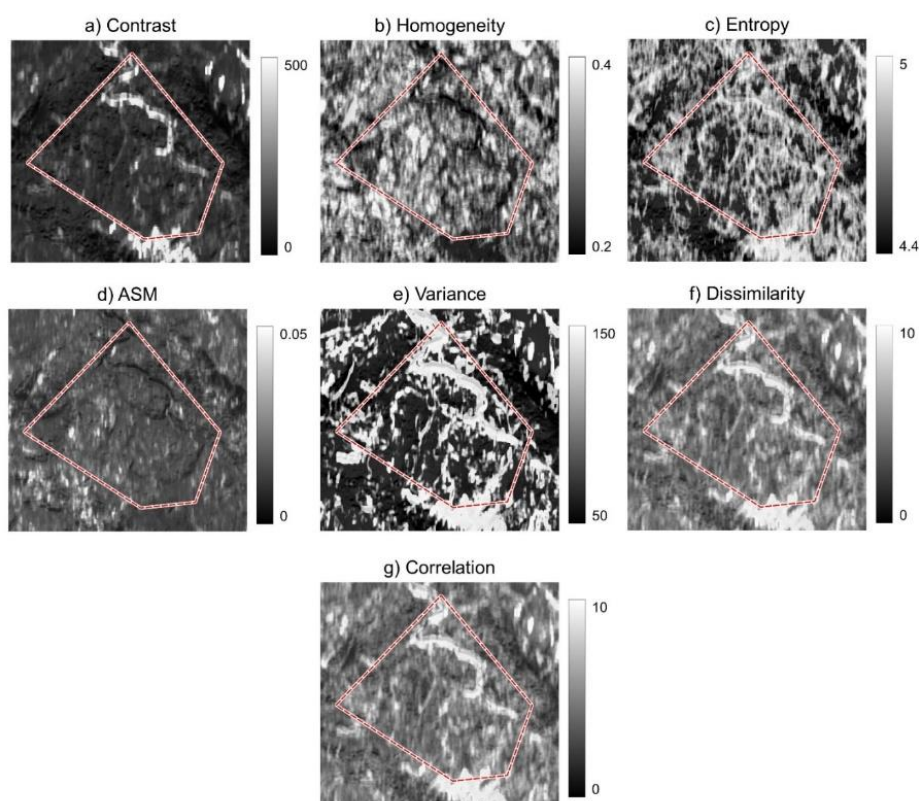


Рисунок 5 – Матрица GLCM-признаков (табл. 1), извлеченных из композита спутникового снимка Sentinel-2 в районе Павловского месторождения: а – контраст; б – однородность; с – энтропия; д – энергия; е – дисперсия; ф – диссимиларность; г – корреляция.

Таблица 1 – Текстурные признаки спутникового изображения

Признак GLCM	Характеристика и интерпретация
Контраст (<i>contrast</i>)	Мера локальных перепадов яркости: принимает высокие значения при наличии резких границ, контуров и линейных объектов на изображении. Характеризует выраженность структурных линий (разломов, трещин): чем более контрастна текстура, тем отчетливее структурный элемент на снимке.
Однородность (<i>homogeneity</i>)	Обратна контрасту: тем выше, чем более однородна область изображения и меньше различия между соседними пикселями. Высокая однородность характерна для равномерных поверхностей (например, сплошных участков поверхности, сложенных однородным песчаником, без выраженной трещиноватости и показывающие равномерную отражательную способность), низкая – для пересеченных структурными линиями территорий.
Энтропия (<i>entropy</i>)	Мера неопределенности (хаотичности) текстуры: высокие значения соответствуют сложным, неоднородным изображениям с большим разбросом значений яркости пикселей. Высокая энтропия отмечается, например, на мозаичных ландшафтах, разломанных зонах, где чередуются разные породы.
Энергия (<i>ASM, Angular Second Moment</i>)	Мера упорядоченности текстуры (квадрат суммы вероятностей): высока для регулярных, повторяющихся текстур, низка для случайных. Высокая энергия наблюдается на однородных объектах (например, базальтовое плато без трещин), низкая – там, где текстура разнородна (области тектонической дробления).
Дисперсия (<i>variance</i>)	Отражает разброс значений яркости относительно среднего; по смыслу близка к контрасту. Высокая дисперсия указывает на присутствие ярких и темных элементов, повышенную текстурность поверхности. Например, для расчлененного рельефа (ярко освещенные склоны и тени) дисперсия велика.
Диссимилярность (<i>dissimilarity</i>)	Учитывает модуль разности яркостей. Высокие значения означают, что соседние пиксели часто имеют разные уровни серого. Применима для выделения линейных объектов: зоны разломов часто проявляются чередованием темных и светлых пикселей, дающим высокую диссимилярность.
Корреляция (<i>correlation</i>)	Характеризует степень линейной зависимости между значениями яркости соседних пикселей. При регулярных текстурах (например, чередование полос или слоев) корреляция высокая, при случайной структуре – низкая или отрицательная. В геологии высокая корреляция может указывать на ориентированный рисунок трещиноватости или слоистости.

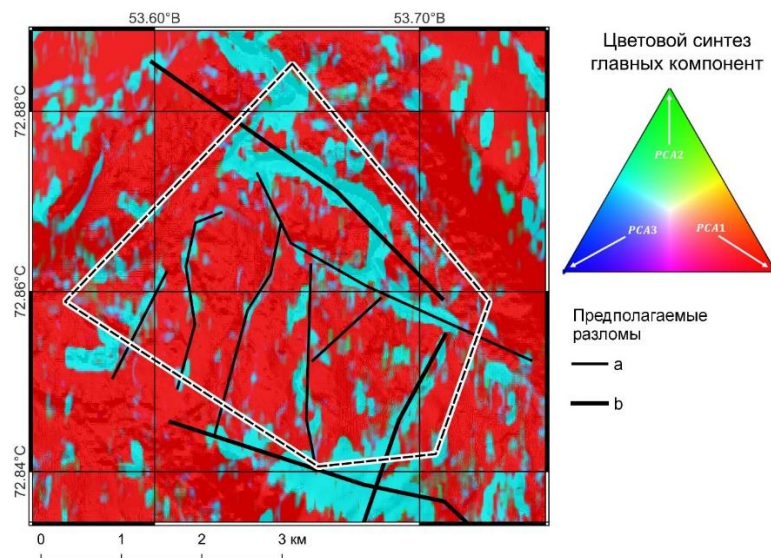


Рисунок 6 – Анализ главных компонент GLCM-признаков и дешифрирование возможных тектонических нарушений в районе Павловского месторождения: а – второстепенные разломы; б – крупные разломы.

Особое внимание уделено принципам комплексирования спектральных и текстурных признаков. Показано, что итоговая интерпретация должна строиться не на механическом наложении растровых слоев, а на их согласованном сопоставлении. Для этого был введен интегральный спектрально-текстурный показатель I_{st} , формируемый на основе нормированных значений ACE и выбранного текстурного признака:

$$I_{st} = \alpha \cdot ACE_n + (1 - \alpha) \cdot T_{tex,n},$$

где I_{st} – интегральный спектрально-текстурный показатель; ACE_n – нормированное значение спектральной компоненты; $T_{tex,n}$ – нормированное значение текстурной компоненты; α – весовой коэффициент спектрального показателя, принимающий значения в интервале от 0 до 1.

Определены условия применимости и ограничения разработанного метода. Его использование наиболее эффективно на территориях с частично обнаженной поверхностью, выраженной спектрально-текстурной неоднородностью и ограниченным влиянием маскирующих факторов. Надежность интерпретации снижается при плотном растительном покрове, снежно-ледовом перекрытии, переувлажнении, сильной техногенной трансформации поверхности и недостаточном пространственном разрешении

исходных данных. Полученные аналитические слои требуют последующего сопоставления с геологическими, структурными и картографическими материалами.

В четвертой главе представлены результаты апробации разработанного метода структурно-тектонического картографирования на Колмозерском месторождении лития, расположенном в пределах зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья на северо-востоке Кольского полуострова. Месторождение представлено редкометалльными пегматитами альбит-сподуменового типа, главным рудным минералом которых является сподумен. Рудные тела имеют выраженную структурную приуроченность и связаны с системой разломов и трещин северо-западного простирания, что делает данный объект репрезентативным для проверки разработанного метода на участке с установленным структурным контролем оруденения.

Для анализа использован летний композит Sentinel-2 из коллекции COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED с минимальной облачностью. В качестве эталонного спектрального образа был принят спектр альбит-сподуменового пегматита, приведенный к спектральной дискретизации каналов Sentinel-2. Его выбор обусловлен тем, что рудные тела Колмозерского месторождения представлены альбит-сподуменовыми пегматитами, а сопоставление с материалами базы GREENPEG и аналогом Ленстерского пегматитового пояса (Ирландия) показало принадлежность выбранного спектрального образа к близкому сподуменсодержащему типу редкометалльных пегматитов

На первом этапе апробации был рассчитан показатель ACE, по результатам которого сформирован слой спектральных контрастов (рисунок 7). Данный слой отражает участки повышенного спектрального сходства с эталонным пегматитовым образом. Пространственное распределение ACE показало, что повышенные значения локализуются неравномерно и формируют ограниченные по площади зоны спектрального контраста. Общая площадь рассматриваемого полигона составила 12.716 км², при этом валидная площадь после маскирования неинформативных пикселей достигла 12.599 км², или 99.08 % площади исследуемого участка.

Фоновый класс занял 10.562 км², или 83.83 % валидной площади, слабый контраст – 1.530 км² (12.14 %), умеренный – 0.463 км² (3.68 %), а высокий – лишь 0.074 км² (0.59 %). Совокупная площадь умеренных и высоких контрастов составила 0.538 км², то есть 4.27 % анализируемой территории. Это указывает на локальный характер спектральных контрастов и показывает, что показатель ACE выполняет функцию первичной спектральной селекции, а не сплошной классификации всей площади месторождения.

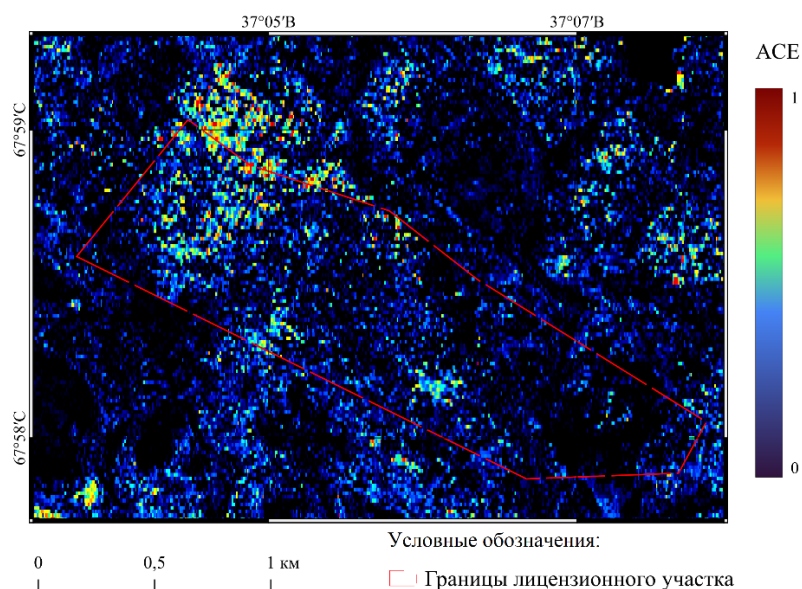


Рисунок 7 – Схема распределения значений ACE на территории Колмозерского месторождения

На следующем этапе выполнен расчет текстурных признаков GLCM и оценена их информативность для структурно-тектонической интерпретации территории с использованием критерия разделения. В качестве наиболее диагностически значимой текстурной компоненты был выбран нормированный показатель диссимilarity $dissimilarity_n$, характеризующий локальные различия яркости соседних пикселей и чувствительный к границам, чередованию контрастных участков, линейным нарушениям и неоднородности поверхности (рисунок 8).

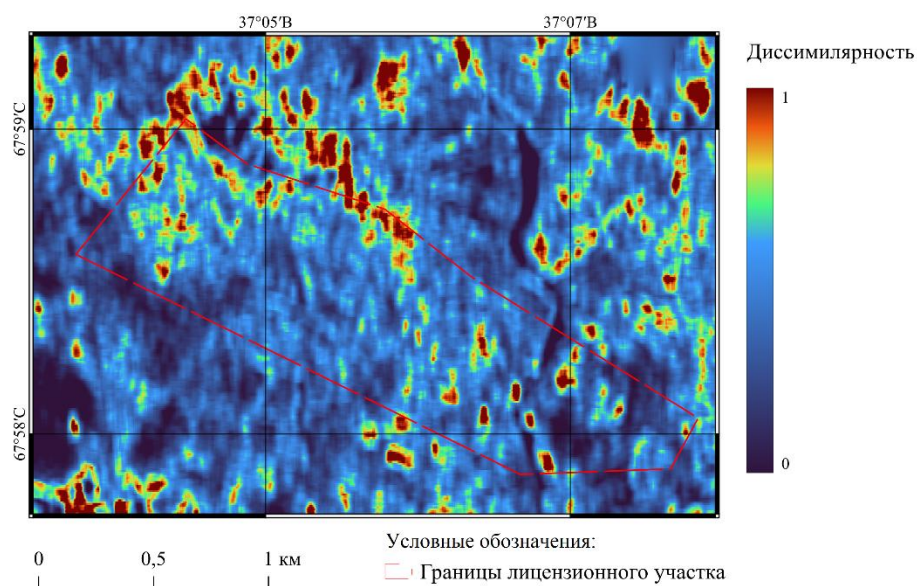


Рисунок 8 – Распределение диссимilarity на исследуемой территории

После выбора спектральной и текстурной компонент был выполнен подбор весовых коэффициентов интегрального спектрально-текстурного показателя I_{st} . В расчетах рассматривались значения веса спектральной компоненты α от 0.3 до 0.7, что позволило оценить варианты соотношения ACE и текстурной составляющей при сохранении вклада каждого из признаков. Максимальное значение критерия разделения было получено при соотношении весов 0.4 / 0.6, то есть при несколько большем вкладе текстурной компоненты. Это показывает, что для Колмозерского месторождения наилучший результат достигается не при изолированном использовании ACE или GLCM, а при их совместном применении.

Итоговая схема распределения I_{st} показала, что повышенные значения интегрального показателя формируют локальные кластеры в пределах и вблизи зоны развития известных рудных тел. Наиболее выраженные участки приурочены к центральной и северо-западной частям лицензионной площади и пространственно согласуются с вытянутой системой рудных тел северо-западного простирания. При этом результат интерпретируется как выделение структурно-тектонических зон, в которых спектральная близость к эталонному пегматитовому образу сочетается с выраженной текстурной неоднородностью поверхности.

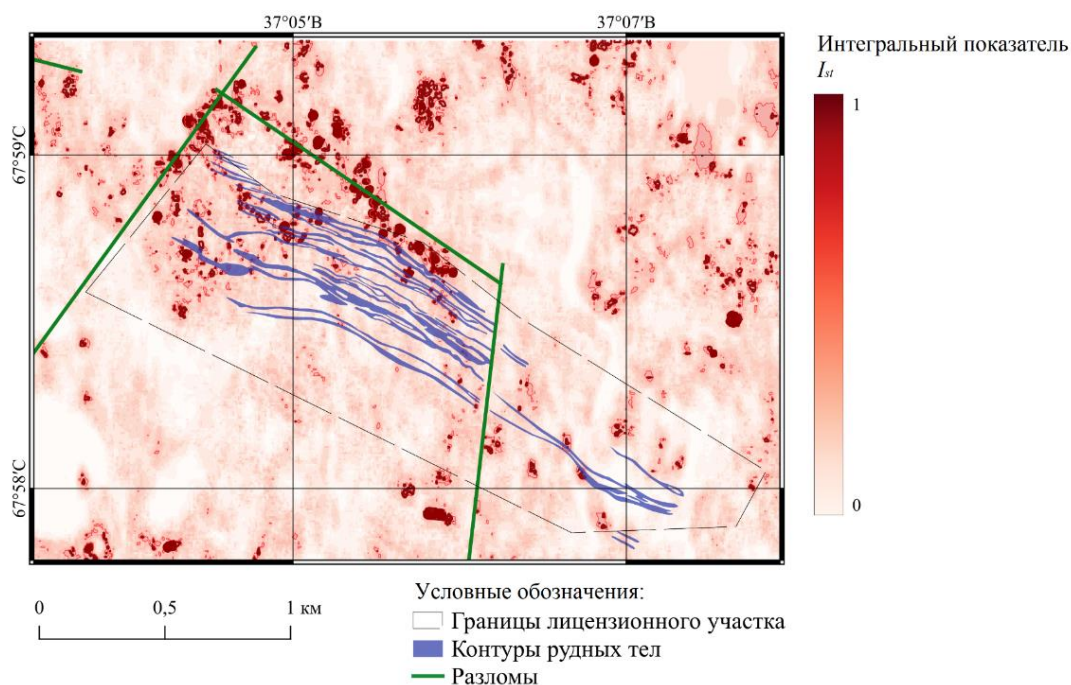


Рисунок 9 – Схема распределения интегрального спектрально-текстурного показателя I_{st} на территории Колмозерского месторождения лития с наложением контуров рудных тел, разломов и границы лицензионного участка

Апробация на Колмозерском месторождении подтвердила применимость разработанного метода для выявления и картографирования структурно-тектонических зон по спектрально-текстурным проявлениям на космических изображениях. Полученные результаты могут использоваться при уточнении положения рудоконтролирующих элементов, предварительном выделении участков, требующих детальной структурной проверки, и развитии геоинформационных схем анализа данных ДЗЗ для арктических территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, решена задача разработки и методического обоснования **метода структурно-тектонического картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли**, ориентированного на выявление разломных зон, границ блоков и участков структурной нарушенности в пределах Арктической зоны Российской Федерации. Актуальность выполненного исследования определяется высокой ресурсной значимостью арктических территорий, сложностью их геологического изучения в условиях ограниченных полевых наблюдений, а также необходимостью перехода от преимущественно экспертного визуального дешифрирования к воспроизводимым геоинформационным процедурам анализа космических снимков.

В ходе исследования установлено, что существующие подходы к геологическому дешифрированию данных ДЗЗ обладают значительным аналитическим потенциалом, однако при изолированном применении спектральных, морфометрических и текстурных признаков не обеспечивают достаточной надежности структурно-тектонической интерпретации в условиях высокой природной неоднородности арктических ландшафтов. Показано, что решение данной задачи требует не простого суммирования разнородных индикаторов, а их функционально организованного комплексирования в рамках единой процедуры обработки и интерпретации.

На основе анализа литературы и сопоставления спектральных свойств различных литотипов, вторично измененных пород и спектральных эффектов тектонической переработки установлено, что данные ДЗЗ содержат информативные признаки, отражающие как литологические различия, так и проявления структурной нарушенности геологической среды. При этом показано, что спектральные проявления тектонических нарушений связаны не с существованием некоего «спектра разлома» как самостоятельного объекта, а с совокупностью процессов дробления, милонитизации, выветривания, окисления, гидротермальной и метасоматической переработки пород, изменяющих форму

спектральной кривой и распределение отражательной способности в диапазонах VIS, NIR и SWIR.

В результате выполненной работы разработан метод структурно-тектонического картографирования, основанный на последовательном применении двух взаимодополняющих аналитических модулей – спектрального и текстурного.

Одним из главных результатов стало методическое обоснование принципов комплексирования спектральных и текстурных признаков. Установлено, что итоговая структурная интерпретация должна строиться на согласованном сопоставлении тематических слоев, при котором спектральная компонента выполняет функцию геологической селекции, а текстурная – функцию морфолого-структурной конкретизации.

Апробация разработанного метода на Колмозерском месторождении лития показала его практическую работоспособность для решения задач структурно-тектонического картографирования.

Получены основные научные результаты:

1. Проведен анализ современного состояния геологического изучения Арктической зоны Российской Федерации и показано, что данные ДЗЗ являются одним из наиболее перспективных источников пространственной информации для задач структурно-тектонического картографирования в условиях ограниченности полевых работ, высокой пространственной протяженности исследуемых территорий и необходимости применения геоинформационных методов анализа пространственных данных.

2. Обоснован комплекс диагностических признаков, включающий геологические спектральные индексы космических снимков, эталонные спектральные образы и текстурные характеристики на основе GLCM, пригодный для выявления структурно-тектонических неоднородностей и связанных с ними литологических различий при поиске и разведке месторождений в Арктической зоне Российской Федерации.

3. Разработан метод структурно-тектонического картографирования, основанный на комплексировании спектральных и текстурных признаков космических снимков и включающий алгоритм отбора пригодных сцен, предварительной обработки данных, формирования слоя спектральных контрастов, формирования слоя текстурно-структурных неоднородностей и их последующего объединения в рамках единой геоинформационной схемы анализа.

4. Методически обосновано, что совместная интерпретация спектральных и текстурных признаков обеспечивает выявление и интерпретацию спектрально-текстурных контрастов, связанных с разломными зонами и структурными неоднородностями при исследовании геосистем в Арктической зоне Российской Федерации, а также позволяет

снизить количество ложноположительных выделений и повысить достоверность картографической интерпретации.

5. Показано, что реализация разработанного метода в виде алгоритмического аппарата обеспечивает адаптивное формирование интегрального спектрально-текстурного показателя I_{st} , основанного на совместной оценке информативности спектральных и текстурных признаков на космических изображениях применительно к условиям Арктической зоны Российской Федерации.

6. Выполнена апробация разработанного метода на Колмозерском месторождении лития, подтвердившая его применимость для выявления и картографирования структурно-тектонических зон по их спектрально-текстурным проявлениям на космических изображениях и для последующей геологической интерпретации рудоконтролирующих элементов.

Разработанный метод может быть использован при проведении геологического и структурно-тектонического картографирования, при планировании геологоразведочных работ, при выделении участков, требующих детальной структурной проверки, а также при развитии геоинформационных схем анализа пространственных данных ДЗЗ для арктических и субарктических территорий.

Перспективы дальнейшего развития работы связаны с расширением спектральной базы эталонных образов, адаптацией метода к гиперспектральным данным, совершенствованием процедур выбора текстурных признаков, использованием многовременных композитов и расширением круга объектов апробации. В дальнейшем это позволит повысить универсальность метода и уточнить его место в системе современных геоинформационных технологий геологического дешифрирования космических снимков.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы:

В научных журналах, рекомендованных ВАК и/или индексируемых в системе Scopus:

1. **Камаев А.А.**, Маневич А.И., Антошин В.В. Геологическое дешифрирование данных ДЗЗ на примере месторождения Колмозерское Мурманской области // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 122–125. DOI 10.30686/1609-9192-2024-3-122-125.

2. **Kamaev A.A.** Analysis of Spectral Remote Sensing Data for Geological Mapping of Rare Earth Elements (Case Study of the Kola Peninsula) // Russian Journal of Earth Sciences. – 2025. – No. 6. – ES4004. DOI: 10.2205/2025ES001077.

3. Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Лосев И.В., **Камаев А.А.** Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности //

Горная промышленность. – 2025. – № 6 – С. 97–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-97-104.

4. **Камаев А.А.**, Маневич А.И., Татаринцов В.Н., Одинцова А.А. Геологическое картографирование на основе текстурного анализа матриц совместных вероятностей (GLCM) спутниковых изображений // Геодезия и картография. – 2025. – №. 12 – С. 36–46. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1026-12-38-46.

Прочие публикации:

5. **Камаев А.А.** Применение дистанционного зондирования земли в решении геолого-экологических задач // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов. Москва, ИФЗ РАН, 6–7 ноября 2024 г. М.: ИФЗ РАН, 2024. – 71 с.

6. **Камаев А.А.** Перспективы использования спектральных данных дистанционного зондирования для геологического картирования редкоземельных элементов // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – 429 с.

7. **Камаев А.А.** Использование метода адаптивного косинусного оценителя (АСЕ) для дистанционного картирования редкоземельных элементов // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов. Москва, ИФЗ РАН, 5–6 ноября 2025 г. М.: ИФЗ РАН, 2025. – 68 с.

8. Маневич А.И., Кочубей К.А., Лосев И.В., **Камаев А.А.** «Программа для расчета и визуализации градиентов геополей растровых данных geotiff». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025681636 от 15 августа 2025 г.

9. Кочубей К.А., **Камаев А.А.**, Лосев И.В., Нанов М.И. «Программа для вычисления и визуализации градиентных морфометрических параметров рельефа в среде Google Earth Engine». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025681633 от 15 августа 2025 г.