

На правах рукописи

Купцова Олеся Витальевна



Разработка технологии дешифрирования изображений с использованием геофизических данных для выявления разрывных нарушений

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Мелкий Вячеслав Анатольевич.

Официальные оппоненты:

Шаповалов Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству», проректор по научной, инновационной деятельности и цифровому развитию;

Стыценко Екатерина Александровна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук, научный сотрудник лаборатории структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский университет геодезии и картографии».

Защита диссертации состоится 1 марта 2022 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/kuptsova-olesya-vitalevna/>

Автореферат разослан 21 января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 09.12.2021. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 171.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время активно осваиваются регионы с высокой сейсмической активностью, обусловленной смещениями блоков земной коры относительно друг друга. Зоны повышенной сейсмичности, как правило, приурочены к активным разломам, поэтому интерес к изучению разломных зон земной коры приобретает все большее значение в целях сейсмического районирования, обеспечения безопасности объектов промышленного и гражданского строительства.

В настоящее время при решении многих научно-практических задач при инженерно-геологических и гидрологических изысканиях ориентируются на исследования в области изучения дизъюнктивных нарушений. Однако, полевые исследования разломов очень трудоемкие, поэтому требуется разработка дистанционных методик и технологий.

Дешифрирование космических снимков, позволяющее определить наличие разломов, экономически выгодно, и, кроме этого, труднодоступные территории зачастую возможно исследовать только данным методом.

Имеющиеся методики дешифрирования разломов основаны на выделении линий, отражающих геологические структуры, на методах структурного дешифрирования. Концепция структурного дешифрирования заключается в том, что спутниковые изображения исследуемой территории отражают изменения в ландшафтах, обусловленные неотектоническими процессами. При визуальном дешифрировании разломов исследуют топографические карты, космические снимки. Некоторые исследователи занимаются визуальным дешифрированием без применения автоматизированных методов распознавания. Это обуславливает большой процент субъективности, зависимость результатов от опыта исследователя, невозможность сравнения материала, полученного разными учеными.

Хорошие результаты при дешифрировании с целью исследования геодинамики Земли получают с использованием автоматизированного линеаментного

анализа. Однако у имеющихся технологий дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений имеется ряд недостатков. Основные из них: ограниченность в количестве направлений для построения штрихов, использование одного или нескольких снимков для дешифрирования, зависимость результата от ввода субъективных параметров без оценки достоверности как исходных данных, так и полученных результатов.

В настоящей работе разработана технология дешифрирования изображений для выявления дизъюнктивных нарушений, основанная на опыте предыдущих исследователей и использующая принцип множественности и проверки достоверности результатов дешифрирования с применением геофизических данных. Представленные в работе материалы восполняют пробелы в изученности дизъюнктивных дислокаций, а их систематизация позволит проследить динамику разрывных нарушений, что определяет актуальность данного исследования.

Степень разработанности темы. Большое внимание методам поиска разрывных нарушений уделяли ученые Бачманов Д. М., Кожурин А. И., Трифонов В. Г., Лободенко И. Ю., Лунина О. В., которые, помимо методов полевых исследований, отдавали предпочтение визуальному дешифрированию. Хоббс В. ввел термин «линеаменты», как линии, отражающие глубинную структуру земной коры. Некоторыми учеными-исследователями, такими как Хоан Фам Суан, Бондур В. Г., Кац Я. Г., Полетаева А. И., Румянцева Э. Ф., Сим Л. А., доказана взаимосвязь между линиями, дешифрируемыми на спутниковых изображениях, и тектонической структурой исследуемой территории. Методы автоматизированного линеаментного анализа описаны в работах таких авторов, как Салов Г. И., Пяткин В. П., Асмус В. В., Бучнев А. А., Кровотынцев В. А., Чернова И. Ю., Швырев С. Л., Златопольский А. А., Долгополов Д. В., Зверев А. В., Зверев А. Т. Однако в методиках этих авторов есть некоторые недостатки, такие как субъективизм задаваемых величин, от которых зависит результат, использование малого количества снимков при исследовании, а также отсутствие оценки достоверно-

сти. Таким образом, необходима разработка технологии дешифрирования изображений для выявления разрывных нарушений, основанная на принципах «множественности», «комплексности», последовательном дешифрировании и суммировании результатов дешифрирования, подтверждающая свою достоверность с использованием геофизических данных.

Особенности применения аэроснимков и космических снимков для дешифрирования геологических объектов рассмотрены в работах Шаповалова Д. А., Амурского В. Г., Серебрякова Е. В., Брюханова В. Н., Гука А. П., Добрынина Н. Ф., Зятьковой Л. К., Карпика А. П., Лисицкого Д. В., Межеловского Н. В., Мелкого В. А., Стыценко Е. А., Панкрушина В. К., Трубиной Л. К., Уставича Г. А., Хлебниковой Т. А., Шевырёва С. Л. Значительный вклад в развитие методики изучения активных разломов в различных регионах и геодинамических ситуациях внесли Мазуров Б. Т., Скобелев С. Ф., Смекалин О. П., Стром А. Л., Хорошилов В. С., Шерман С. И. и др. Особенности структуры и тектонического строения исследуемой территории острова Сахалин отражены в работах Ганешина Г. С., Несмеянова С. А., Прыткова А. С., Рождественского В. С., Соловьёва В. В., Терещенкова А. А. и др. В книгах зарубежных коллег, например «Механика землетрясений и разломов» Шольца К., «Палеосейсмология» под редакцией Мак Калпина, подробно описываются и систематизируются практические и методические основы изучения активных разломов.

Цель и задачи научного исследования.

Целью исследования является разработка технологии дешифрирования изображений для выявления разрывных нарушений с использованием геофизических данных, позволяющих повысить достоверность их обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Выполнить анализ современных методик и технологий по изучению и картографированию разрывных нарушений, определить цель и задачи исследования.

2 Разработать технологию дешифрирования, основанную на принципах «множественности», «комплексности» и последовательном дешифрировании линеаментов с целью выявления разрывных нарушений.

3 Выполнить адаптацию и экспериментальные исследования разработанной технологии на территории острова Сахалин и построить актуальные карты разломов исследуемой территории, адекватно отображающие современное состояние блоков земной коры.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования являются разрывные нарушения территории о. Сахалин.

Предметом исследования является технология дешифрирования космических снимков для обнаружения разрывных нарушений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– для дешифрирования космических снимков предложено технологическое решение, заключающееся в использовании принципа множественности материалов для их обработки, принципа комплексности локальных оптимальных алгоритмов, как обусловленных, так и не зависящих от контекстуальной информации, с проверкой достоверности результатов дешифрирования, основанной на анализе расположения точечных объектов (землемерений), сопутствующих линеаментам;

– на основе разработанной технологии создана актуализированная карта дизъюнктивных нарушений территории о. Сахалин масштаба 1 : 500 000, отображающая новейшие зоны разрывных нарушений исследуемой территории и являющаяся основой для сейсмического районирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость: дано теоретическое обоснование комплексного подхода к технологическому процессу по дешифрированию космических снимков для проведения мониторинга разрывных нарушений в зонах высокой сейсмической активности соответствующих регионов Российской Федерации.

Практическая значимость работы заключается в том, что созданная актуальная карта разрывных нарушений острова Сахалин масштаба 1 : 500 000 дает возможность использования этих данных для оценки условий освоения территории, сейсмического районирования, безопасности строительства, прогноза и разведки полезных ископаемых, охраны недр.

Разработанная технологическая схема выявления разломных зон реализована в программном комплексе ArcGIS и QGIS, что позволяет широко использовать технологию. Разработанная технология внедрена в учебный процесс дисциплины «Землеустройство, кадастр и мониторинг земель» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», построенные по разработанной технологии карты внедрены в работу Дальневосточного производственно-геологического объединения.

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использована совокупность базовых методов цифровой обработки космических снимков, выделения границ и линейных объектов, координатной привязки, методы автоматизированного дешифрирования, математической обработки геодезических измерений и моделирования. Для решения поставленных задач с целью выявления и отображения разломов использованы математические алгоритмы Кэнни, морфологического сужения (эрозии) и алгоритм преобразования Хафа. В качестве эмпирической базы исследования выступали серии космических снимков, полученных со спутника Landsat 8, а также данные SRTM.

Экспериментальные исследования выполнены с применением современного программного обеспечения: комплекса геоинформационных программных продуктов ArcGIS, программы для детектирования линеаментов LEFA, свободной кроссплатформенной геоинформационной системы QGIS.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанная технология дешифрирования изображений для выявления разрывных нарушений с использованием геофизических данных позво-

ляет определить разрывные нарушения и повысить достоверность получаемых результатов;

– карты разрывных нарушений, созданные по разработанной технологии, позволяют проводить анализ тектонической активности в местах новых и ранее выявленных разрывов и зон трещиноватости, что необходимо учитывать при оценке условий освоения территории, сейсмическом районировании, планировании строительства, прогноза и разведки полезных ископаемых, охраны недр.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 3 – Теория, технология и технические средства сгущения по аэрокосмическим снимкам геодезических сетей, создания и обновления топографических, землеустроительных, экологических, кадастровых и иных карт и планов; 4 – Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (19–21 мая 2021 г., Новосибирск) и на Международной конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС 27. «Геоинформационная поддержка устойчивого развития территорий» (21–23 августа 2021 г., Апатиты), IV всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (6–10 сентября 2021 г., Южно-Сахалинск), III национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефтегазовый комплекс: Проблемы и решения» (2–4 декабря 2020 г., Южно-Сахалинск), LVIII международной научно-практической конференции № 10 «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» (октябрь 2020 г., Новосибирск), XXV Международном

симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (1–5 июля 2019 г., Новосибирск) и других.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в семи научных работах, две из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна опубликована в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 132 страницы машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 153 наименования, содержит 5 таблиц, 12 рисунков и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, научные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследований, структура диссертации.

В первом разделе представлены общие сведения об исследовании разрывных нарушений, их дешифрировании и картографировании, проведены обзор и анализ основных методов выявления разрывных нарушений и существующих тематических карт исследуемой территории, отмечена тенденция использования космических снимков в качестве основы для построения карт геотектоники. В качестве перспектив применения карт разрывных нарушений выступает область оценки территорий для оценки условий освоения территории, сейсмического районирования.

В настоящее время при создании карт разрывных нарушений исследователями предпринимаются попытки поиска различных методик и технологий дешифрирования, повышающих достоверность получаемых результатов. Наиболее распространенным подходом является визуальное дешифрирование без использования автоматизированных методов обработки. Недостатком такого подхода является высокая субъективность. Большинство исследователей разрывных нарушений при дешифрировании находили подходящее изображение для визуального дешифрирования и по одному многозональному или монохромному снимку, охватывающему определенную территорию исследования, определяли местоположение разломов, опираясь, в основном на результаты полевых геологических и геодезических исследований. Для более достоверных результатов необходимо применять принцип комплексности, или множественности, космических исследований, предусматривающий использование серий снимков, различающихся по спектральному диапазону, времени съемки, разрешению, масштабу и обзорности. Многие исследователи предпочитают использовать автоматизированный линеаментный анализ, который дает более объективные результаты, основанные на методах математических алгоритмов.

Методы автоматизированного линеаментного анализа позволяют повысить распознаваемость разрывных нарушений различного ранга. Некоторые исследователи проводили линеаментный анализ с помощью программы Lessa, основанной на статистическом анализе линейных элементов. Он основан на выделении штрихов восьми различных направлений, которые на следующем этапе объединяются в спрямленные протяженные линии. Данный метод исключает выявление штрихов в более чем восьми направлениях. В программе Lessa необходимо задать величину порога (предела обобщения) линеаментов, что является весьма затруднительным и субъективным подходом, так как от этой величины зависит, будут ли выделенные линеаменты максимально соответствовать разломам, выделенным с помощью геодезических и геофизических данных. Таким образом, для каждого снимка и территории можно задать разную величину порога, чтобы «подогнать» результаты под

данные предыдущих исследований. Методы, используемые для распознавания ли-
нементов в различных программных пакетах, существенно отличаются. Особен-
ности методик известных программных пакетов хорошо описаны Зверевым А. В.
Программный комплекс PlanetaMonitoring, широко используемый исследовате-
лями, проводит выявление линементов с помощью контролируемой классифика-
ции (основанной на байесовской стратегии максимального правдоподобия) и кла-
стеризации (основанной на алгоритме К-средних).

Однако ввод всех параметров довольно субъективен и требует от исследова-
теля огромного опыта в дешифрировании изображений и знания большого числа
программных алгоритмов для выявления разрывных нарушений с учетом особен-
ностей каждой исследуемой территории и изображения. Отсутствие открытого ис-
ходного кода в программах является значительным минусом, осложняющим интер-
претацию результатов. Шевырев С. Л. разработал программу LEFA с открытым ис-
ходным кодом и алгоритмами, широко используемыми в компьютерном зрении,
наиболее подходящими для исследования линементов. Однако анализ имеющейся
литературы в области данных исследований показал, что нет разработанной техно-
логии дешифрирования для выявления разрывных нарушений, использующей сов-
местно локальные оптимальные алгоритмы (основанные на анализе соседних пик-
селей, не зависящие от контекстуальной информации), «контекстуальные» алго-
ритмы обнаружения границ, основанные на вычислении производных второго по-
рядка, алгоритмы, основанные на фрактальной геометрии, и алгоритмы оценки до-
стоверности, основанные на анализе расположения точечных объектов (земляре-
сий), сопутствующих разлому.

Таким образом, необходима разработка технологии дешифрирования изобра-
жений для выявления разрывных нарушений, базирующаяся на принципе множе-
ственности, который предусматривает использование серий снимков различного
масштаба, обзорности, разрешения, спектрального диапазона и времени съемки, и
принципе комплексности, предусматривающем совместное использование основ-
ных локальных оптимальных алгоритмов, как обусловленных, так и не зависящих

от контекстуальной информации, включающих в себя анализ соседних пикселей, вычисление производных второго порядка, алгоритмы фрактальной геометрии и алгоритмы, основанные на анализе расположения точечных объектов (землетрясений), сопутствующих линеаменту, которая является наиболее перспективной для повышения достоверности обработки с целью выявления разломов. Также установлено, что алгоритмов оценки достоверности, основанных на анализе расположения точечных объектов (землетрясений), сопутствующих линеаментам, не разработано.

Во втором разделе приведено теоретическое и методологическое обоснование разработанной усовершенствованной технологии дешифрирования для составления карт разрывных нарушений.

Технология основана на принципе множественности, включающем в себя интегрированный анализ данных цифровой модели рельефа, спутниковых снимков различной обзорности, времени съемки, разрешения, масштаба, спектрального диапазона и геофизических данных. На основе дешифрирования и комплексирования данных SRTM, спутниковых снимков в одиннадцати каналах электромагнитного спектра спутника Landsat 8, с разрешениями 30, 60, 90, 120, 150, 180 м и геофизических данных были выявлены как исследованные ранее, так и не известные разрывные дислокации. В качестве входных данных для выявления линеаментов, указывающих на зоны разрывных нарушений, были использованы 16-битные одноканальные изображения спутника Landsat 8, прошедшие первый уровень обработки, и данные цифровой модели рельефа SRTM VoidFilled формата GeoTIFF.

Линеаментный анализ проводился с помощью программы LEFA, которая работает с данными до 1 000 пикселей. Изменен размер, пространственное разрешение снимков для удаления шумов, мешающих линеаментному анализу, что позволило извлечь линеаментные особенности материалов дешифрирования, определяемые их параметрами и пространственным разрешением.

Для выбора наиболее подходящего канала дешифрирования разломов проводились экспериментальные исследования северной части Сахалина во всех имеющихся зонах спектра.

Анализ результатов дешифрирования (более 3 500 модифицированных изображений) показал, что для выявления линейных элементов лучше всего подходит инфракрасный диапазон электромагнитного спектра. В трех каналах спутника Landsat 8, 4-м (красном), 7-м (инфракрасном) и 8-м (панхроматическом), линейные элементы отражают основные разломы, подтвержденные геофизическими и геологическими данными (рисунок 1).

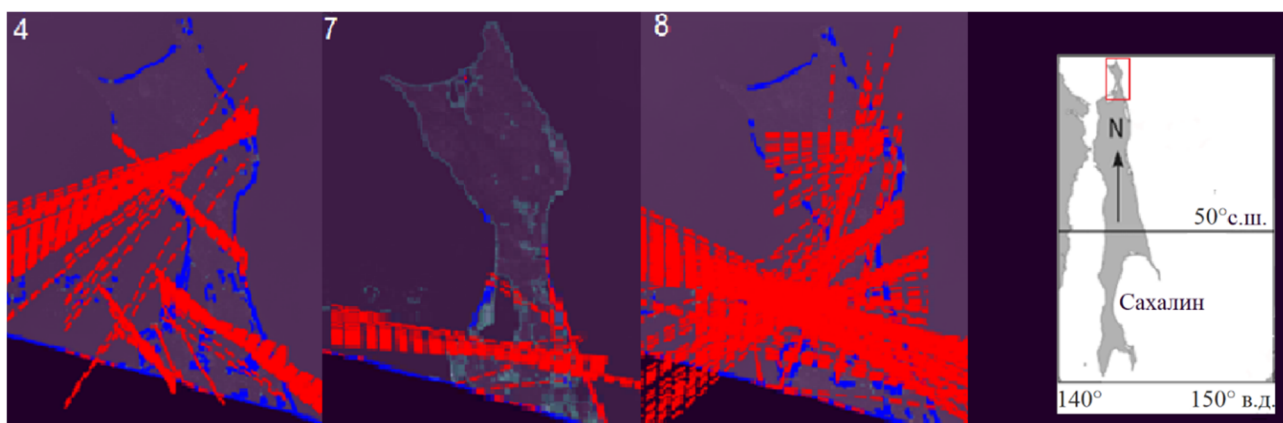


Рисунок 1 – Результаты автоматизированного дешифрирования линейных элементов в красном, инфракрасном и панхроматическом каналах спутникового изображения Landsat 8

Серии снимков, согласно принципам множественности и комплексности, были обработаны с использованием двух классов алгоритмов выделения границ (автономные и контекстуальные), благодаря которым выделяются линейные элементы рельефа в качестве штрихов. В качестве методов детектирования границ в технологии использовались алгоритм операции бинарно-морфологической эрозии и математический алгоритм Кэнни. Кэнни является оптимальным алгоритмом для выявления линейных элементов, так как содержит баланс между фильтрацией шума и потерей исходной информации. Дальнейшая цифровая обработка серии

изображений проводилась посредством алгоритма Хафа, основанном на фрактальной геометрии, что позволило выделить коллинеарные линии, показывающие вероятность расположения разломов. Таким образом, разрывные нарушения интерпретируются путем последовательного дешифрирования, предусматривающего поэтапное суммирование результатов обработки в программе QuantumGIS (QGIS). Оценка достоверности полученных результатов основана на анализе взаимного расположения точечных объектов (эпицентров землетрясений) и обнаруженных линеаментов (разрывных нарушений).

Эрозия является основной операцией выделения границ в математической морфологии. Объекты на изображении в математической морфологии представлены в виде множества (A) всех фоновых пикселей (точек z). Для того, чтобы обработать изображение, используется структурный элемент (B), то есть специальное изображение формы, необходимой для анализа. Эрозия обрабатываемого изображения (A) по структурному элементу (B) – это множество всех пикселей (точек z), где элемент (B) полностью содержится во множестве (A).

В результате эрозии на изображении удаляются все граничные точки, имеющие не менее одного фонового пикселя в своем окружении. Точки границ удаляются с помощью структурного элемента, который содержит все потенциальные соседние элементы. Чтобы выделить границы на изображении, необходимо провести операцию разности между обрабатываемым изображением и изображением, полученным в результате эрозии.

Алгоритм обнаружения границ Кэнни широко используется в системах компьютерного зрения. Он включает пять этапов. На первом этапе к изображению для его сглаживания и удаления шумов применяется алгоритм фильтрации по Гауссу.

На втором этапе обработки изображения методом Кэнни происходит поиск градиента интенсивности изображения с помощью четырех фильтров для того, чтобы найти диагональные, вертикальные и горизонтальные края.

На третьем этапе используется метод истончения края с помощью подавления немаксимумов, что обеспечивает толщину границы в один пиксель.

Четвертый этап алгоритма Кэнни сводится к применению двойного порога, который фильтрует оставшиеся пиксели, вызванные изменением цвета и шумом, чтобы более точно определить потенциальные границы изображения.

Пятый этап с помощью трассировки области неоднозначности завершает обнаружение краев, подавляя все другие края, являющиеся слабыми и не имеющие отношения к границам.

Преобразование Хафа известное уравнение прямой $y = kx + b$ представляет в виде параметров данной прямой, углового коэффициента k и точки пересечения с осью ординат b .

Объединение штрихов в линеаменты происходит по принципу коллинеарности. Результаты обработки изображения экспортируются в shape файл и файл tif, после чего данные файлы открываются в любом программном обеспечении ГИС.

Программное обеспечение QuantumGIS (QGIS) было использовано для анализа полученных материалов дешифрирования и построения карты. Карта разломов строилась путем суммирования шейп-файлов линий и штрихов на основе их комплексного анализа (рисунок 2). Комплексование всех обработанных изображений в разных зонах спектра позволяет выделить наиболее достоверные зоны разрывных нарушений, так как фототоны отражают различные признаки линеаментов. В формах рельефа, представленных данными SRTM, проявляются активные тектонические нарушения. Путем наложения данных дешифрирования SRTM и спутниковых снимков можно отфильтровать и исключить линеаменты, не подтвержденные другими параметрами и не относящиеся к разрывным нарушениям. В результате комплексного анализа строится новый линейный слой подтвержденных дизъюнктивных нарушений и проводится последний этап построения карты дизъюнктивных нарушений и ее вывод в нужный формат.

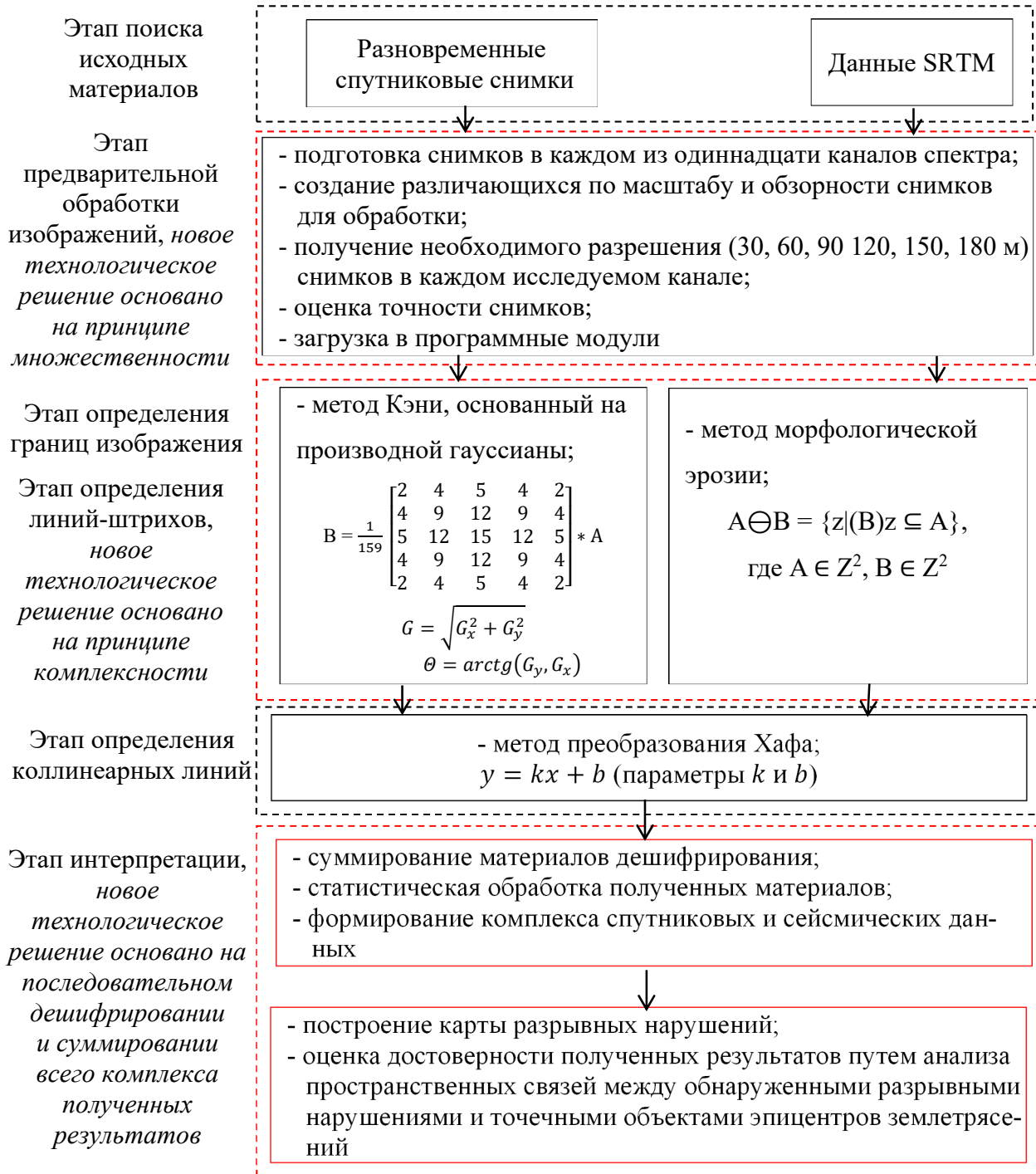






Рисунок 2 – Технология дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений с использованием геофизических данных

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований применения разработанной технологии дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений (рисунок 3), выполнена оценка достоверности полученных результатов.



Условные обозначения

- | | | |
|-----|---|---|
| — | Разломы, совпавшие с разломами, ранее выявленными другими исследователями | Эпицентры землетрясений с магнитудой (M) |
| --- | Нововьявленные разломы, не совпавшие с разломами, ранее выявленными другими исследователями |  7–8 |
| — | Неподтвержденные разломы, ранее выявленные другими исследователями |  5–6,9 |
| | |  4–4,9 |
| | |  3–3,9 |

Региональные разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Вал-Лангрийский; 4 – Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильгунский сегмент); 5 – Пильгунский; 6 – Гаромайский; 7 – Гырғыланьи-Дагинский; 8 – Южно-Байкальский; 9 – Удыльский

Рисунок 3 – Созданная карта региональных разломов Северо-Сахалинской равнины с эпицентрами землетрясений с $M \geq 3,0$ (1906–2021 гг.)

Критериями достоверности являлись: соответствие разрешения исходных материалов необходимому масштабу, в котором строились карты; сведения о предварительной обработке данных, на основе которых строились карты дизъюнктивных нарушений; наличие на карте разломов, выявленных ранее другими исследователями; близость разрывов от эпицентров землетрясений.

Карты новейших дизъюнктивных нарушений северной, центральной и южной части Сахалина, а также их описание представлены в диссертации.

Анализ полученных результатов дешифрирования показал, что большинство выделенных разрывных нарушений совпадает с разломами на геологических картах, построенными предыдущими исследователями (таблица 1). Однако выявлен ряд новых разломных зон (обозначены на картах пунктирной линией). Данные о режимах выявления дислокаций и ученых, ранее установивших выявленные разломы, представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки точности построения карты дизъюнктивных дислокаций острова Сахалин по данным о разломах, подтвержденных ранее другими исследователями

Название разлома	Режим выделения	Другие источники информации о разломе
Восточно-Сахалинский	canny_small, medium, many	Харахинов и др., 1984 Кожурин, Ким, 2010 Ломтев, Жердева, 2015
Невский	canny_small	Харахинов и др., 1984
Хейтонский	canny_small, medium, many, erosion_small, medium	Рождественский, 1982 Кожурин, Ким, 2010 Лободенко, 2010
Тымский	canny_small, medium, erosion_small, medium	Харахинов и др., 1984
Лонгрийский	canny_small, medium	Рождественский, 1982 Кожурин, Ким, 2010 Лободенко, 2010
Аукан-Лунский	canny_medium, erosion many	Харахинов и др., 1984

Окончание таблицы 1

Название разлома	Режим выделения	Другие источники информации о разломе
Северо-Сахалинский	erosion_small	Ломтев, Жердева, 2015 Лободенко, 2010
Совгаванский	canny_small	Харахинов и др., 1984
Западно-Сахалинский	erosion_medium canny_small	Харахинов и др., 1984 Ломтев, Жердева, 2015 Ломтев, Патрикеев, 2016
Лютогский	canny_small, medium	Харахинов и др., 1984
Центрально-Сахалинский	erosion_small, medium, many canny_small, medium	Харахинов и др., 1984 Ломтев, Жердева, 2015
Мордвиновский	canny_medium, many	Харахинов и др., 1984
Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильгунский сегмент)	canny_small, medium, many	Харахинов и др., 1984 Василенко и др., 2001 Василенко, Прытков, 2012 Ломтев, Жердева, 2015 Ломтев, Патрикеев, 2016
Слепиковский	canny_small, many	Харахинов и др., 1984
Пильгунский	canny_small	Рождественский, 1993 Василенко и др., 2001 Ломтев, Жердева, 2015
Ламанонский	canny_small, medium	Харахинов и др., 1984
Гаромайский	canny_many	Василенко и др., 2001 Булгаков и др., 2002
Вал-Лангрийский	canny_many	Василенко и др., 2001
Гыргыланьи-Дагинский	erosion_small	Василенко и др., 2001
Южно-Байкальский	canny_medium	Лободенко, 2010 Харахинов, 2010
Удыльский	canny_small	Харахинов и др., 1984
Набильский	canny_small, medium, many	Харахинов и др., 1984 Сим и др., 2016

Землетрясения, которые имели место в течение последних 100 лет, происходили в зонах, приуроченных к выделенным разломам (таблица 2). Таким образом карты разрывных нарушений получились достоверными.

Таблица 2 – Основные результаты оценки достоверности разработанной технологии дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений по данным расчета близости разломов от эпицентров землетрясений

Исходные данные	Название разлома	Доля землетрясений с магнитудой больше 3 за период 1900–2021 гг., приуроченных к выделенным разломам, %	Близость разломов от эпицентров землетрясений выше трех баллов, км	Доля от землетрясений, лежащих вблизи разлома, %	
1 SRTM Void Filled 2 Landsat Level-1 data product	Восточно-Сахалинский	0,9 %	1-2 км	66 %	
			2-3 км	34 %	
	Невский	0,3 %	> 44 км	100 %	
	Хейтонский	0,9 %	3–4 км	34 %	
			4–5 км	66 %	
	Тымский	0,9 %	1–2 км	80 %	
2–3 км			20 %		
1 SRTM (30–90 угловых секунды). Данные прошли предварительную обработку, фильтрацию ошибочных значений. 2 Landsat-8 (разрешение 30 м). Данные прошли геометрическую, радиометрическую и атмосферную коррекцию	Лонгрийский	0,9 %	0–1 км	42 %	
			2–3 км	8 %	
			4–5 км	25 %	
			5–6 км	17 %	
			6–7 км	8 %	
	Аукан-Лунский	1,5 %	0–1 км	25 %	
			1–2 км	75 %	
	Северо-Сахалинский	0,3 %	0–1 км	75 %	
			2–3 км	12 %	
			3–4 км	13 %	
	Совгаванский	0,6 %	0–1 км	75 %	
			2–3 км	25 %	
	Западно-Сахалинский	15,3 %	0–1 км	70 %	
			1–2 км	19 %	
			2–3 км	9 %	
			6–7 км	1 %	
	Лютогский	0,9 %	16–17 км	1 %	
			0–1 км	88 %	
				2–3 км	12 %

Окончание таблицы 2

Исходные данные	Название разлома	Доля землетрясений с магнитудой больше 3 за период 1900–2021 гг., приуроченных к выделенным разломам, %	Близость разломов от эпицентров землетрясений выше трех баллов, км	Доля от землетрясений, лежащих вблизи разлома, %
<p>1 SRTM (1–3 угловых секунды). Данные прошли предварительную обработку, фильтрацию ошибочных значений.</p> <p>2 Landsat-8 (разрешение 30 м). Данные прошли геометрическую, радиометрическую и атмосферную коррекцию</p>	Центрально-Сахалинский	22 %	0–1 км	66 %
			1–2 км	26 %
			2–3 км	4 %
			3–4 км	4 %
	Мордвиновский	1,5 %	0–1 км	40 %
			1–2 км	60 %
	Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент)	20,9 %	0–1 км	92 %
			1–2 км	2 %
			2–3 км	4 %
			3–4 км	2 %
	Слепиковский	0,3 %	> 15 км	100 %
	Пильтунский	4,6 %	0–1 км	63 %
			1–2 км	6 %
			2–3 км	6 %
			3–4 км	25 %
	Ламанонский	0,3 %	0–1 км	83 %
			2–3 км	17 %
	Гаромайский	1,5 %	0–1 км	83 %
			2–3 км	17 %
	Вал-Лангрийский	2,5 %	0–1 км	50 %
			1–2 км	50 %
	Гыргыланьи-Дагинский	1,8 %	0–1 км	83 %
			1–2 км	17 %
	Южно-Байкальский	2,1 %	0–1 км	67 %
1–2 км			33 %	
Удыльский	0,9 %	0–1 км	67 %	
		1–2 км	17 %	
		2–3 км	16 %	
Набильский	2,1 %	0–1 км	71 %	
		1–2 км	29 %	
Другие разломы	16,6 %	0–1 км	68 %	
		1–2 км	25 %	
		2–3 км	4 %	
		3–4 км	3 %	

Результаты проведенных экспериментов в виде полученных карт разломов острова Сахалин свидетельствуют о работоспособности и возможности практического применения разработанной усовершенствованной технологии дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений для оценки условий и перспективности территории, основы для сейсмического районирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования, заключаются в следующем.

1 Выполнен анализ современных методик и технологий по изучению и картографированию разрывных нарушений, определены цели и задачи исследования, сделан вывод о необходимости разработки технологии дешифрирования на основе принципов «множественности» и «комплексности», с определением достоверности получаемых результатов на основании геофизических данных.

2 Разработана технология дешифрирования, основанная на принципах «множественности», «комплексности» и последовательном дешифрировании линейных элементов с целью выявления разрывных нарушений, обеспечивающая заданные детальность и точность определения разрывных нарушений (для построения карты масштаба 1 : 500 000), что позволяет повысить точность, достоверность и наглядность карт дизъюнктивных дислокаций.

3 Выполнены адаптация и экспериментальные исследования разработанной технологии на территории острова Сахалин, и построены актуальные карты разломов исследуемой территории, адекватно отображающие современное состояние блоков земной коры масштаба 1 : 500 000 для применения в целях оценки условий территории, основы для сейсмического районирования, планирования строительства важных объектов народно-хозяйственного назначения. Выявлено, что более 75 % землетрясений располагаются в радиусе 0–2 км от выхода разлома на земную поверхность.

Таким образом, поставленная цель диссертационного исследования, направленная на разработку технологии дешифрирования изображений для выявления разрывных нарушений с использованием геофизических данных, позволяющих повысить достоверность обработки, достигнута.

Результаты диссертационного исследования в виде карт рекомендуются к использованию в организациях, осуществляющих научные геологические исследования и сейсмическое районирование, что позволит значительно сократить расходы финансовых средств, повысить оперативность и эффективность принятия решений по развитию территорий.

Перспективными направлениями дальнейших исследований является более детальное изучение разломов мелкого ранга, а также выявление взаимосвязи активности разломов с энергетикой землетрясений.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Купцова, О. В. Методика выявления дизъюнктивных нарушений по данным дистанционного зондирования Земли с использованием линеаментного анализа / О. В. Купцова. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – № 1 (47). – С. 6–13. – DOI 1025-714X-2021-4-7-00-01.

2 Влияние зон разломов на состояние растительного покрова территории заказника «Долинский» (о. Сахалин) / О. В. Купцова, И. И. Лобищева, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 5 – С. 75–85.

3 Купцова, О. В. Картографирование разломов на территории Северо-Сахалинской равнины по данным дистанционного зондирования Земли / О. В. Купцова, А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого разви-

тия территорий: материалы междунар. конф. – Москва : Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 1. – С. 317–329.

4 Регистрация распространения пепловых аэрозолей при эруптивных вулканических извержениях на космических снимках / В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, Е. И. Аврунев, О. В. Купцова, Б. Б. Доржиев. – Текст : непосредственный // XXV Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», конф. «Исследование атмосферы и океана оптическими методами» : сб. материалов (Новосибирск, 2019 г.). – Томск : ИОА СО РАН, 2019. – С. 597–600. ISBN 978-5-94458-176-1.

5 Купцова, О. В. Роль исследований дизъюнктивных нарушений в экономике Российской Федерации / О. В. Купцова. – Текст : непосредственный // СибАК-2020. LVIII Междунар. науч.-практ. конф. «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» : сб. материалов № 10 (52) (Новосибирск, 2020 г.). – Новосибирск : СибАК, 2020. – С. 26–31.

6 Купцова, О. В. Анализ современного состояния разломов на Сахалине / О. В. Купцова. – Текст : непосредственный // ИМГиГ ДВО РАН. III Национальная науч.-практ. конф. с международным участием. «Нефтегазовый комплекс: Проблемы и решения» : материалы (Южно-Сахалинск, 2020 г.). – Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 2020. – С. 75–79.

7 Купцова, О. В. Выявление зон дизъюнктивных дислокаций для территории Северного Сахалина по данным космических съемок / О. В. Купцова, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 79–85. DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-79-85.