

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, доцент  
Мелкий Вячеслав Анатольевич

Новосибирск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИК И ТЕХНОЛОГИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ И КАРТОГРАФИРОВАНИЮ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ .....	11
1.1 Роль исследований разрывных нарушений и их картографирования в экономике Российской Федерации .....	11
1.2 Анализ изученности разломов Сахалина .....	19
1.3 Анализ методик и технологий, позволяющих получить данные для выявления дизъюнктивных нарушений .....	29
Выводы по первому разделу .....	48
2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	50
2.1 Анализ методов выявления разрывных нарушений.....	50
2.2 Анализ космических данных и программ их обработки, используемых для выявления дизъюнктивных дислокаций .....	58
2.3 Методы и материалы исследования разрывных нарушений по данным дистанционного зондирования Земли.....	69
2.4 Разработка технологии дешифрирования с целью моделирования линий разрывных нарушений в пространстве геоинформационной системы.....	77
Выводы по второму разделу .....	81
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	83
3.1 Общие положения методики исследований.....	83

3.2 Оценка точности исходных данных, используемых для построения карты разломов Сахалина .....	84
3.3 Построение карт дизъюнктивных нарушений острова Сахалин .....	88
3.3.1 Построение карты дизъюнктивных нарушений севера Сахалина .....	88
3.3.2 Построение карты дизъюнктивных нарушений центральной части Сахалина.....	91
3.3.3 Построение карты дизъюнктивных нарушений юга Сахалина .....	93
3.4 Оценка достоверности полученных результатов экспериментальных исследований острова Сахалин .....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАИЛУЧШЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗЛОМОВ .....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	132

## ВВЕДЕНИЕ

*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., Шевырев 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 достоверности. 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., Стыщенко 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 линейных элементов 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 (землеустроений), сопутствующих линейным элементам;
- 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 (приложение Б).

*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 позволяет 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 ре-

зультаты 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.

# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИК И ТЕХНОЛОГИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ И КАРТОГРАФИРОВАНИЮ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

## 1.1 Роль исследований разрывных нарушений и их картографирования в экономике Российской Федерации

На современном этапе развития человечества разрабатываются и внедряются новые способы исследования, использующие современные технические средства в связи с важностью эффективной системы поддержки принятия научно обоснованных решений [31, 42, 50, 122, 150]. Исследователи XX в. выявили, что земную кору планеты Земля делит на блоки регматическая сеть дизъюнктивных нарушений [6, 12, 77, 91, 102, 142]. К концу XX – началу XXI в. были выявлены литосферные вихри [15, 40, 126], кольцевые геологические структуры разного масштаба [51, 123], глобальные сдвиговые зоны [92–94, 119, 120]. Все вышеперечисленные явления отражаются на поверхности Земли в виде дизъюнктивных дислокаций. Для развития экономики Российской Федерации необходимо исследовать дизъюнктивные дислокации, а также процессы, к ним приуроченные. В таких отраслях экономики, как промышленность (добыча и переработка полезных ископаемых), сельское хозяйство, строительство, транспорт (построение авто- и железнодорожных магистралей) необходимо учитывать наличие разломов, а также работать с их картами для выявления наиболее подходящих зон под определенную отрасль [27, 43, 46, 117, 118, 133]. Карты разрывных нарушений помогают учитывать природные типы опасностей, связанных с литосферой при строительстве различных объектов, в том числе и промышленного назначения, чтобы не допустить разрушительных технических, экологических и экономических последствий. При построении таких уникальных сооружений, как заводы по сжижению природного газа, различные нефтедобывающие предприятия, необходимо четко представлять структурное и геологическое строение Сахалинского региона, так как стоимость ошибок при размещении объектов может обойтись в миллиарды

долларов. Например, считается, что сильнейшее землетрясение вблизи Нефтегорска, произошедшее в 1995 г. с магнитудой 7,1–7,2 по шкале Рихтера, приурочено к Верхнепильтунскому разлому, сегменту меридиональной Срединно-Сахалинской шовной зоны Хоккайдо-Сахалинского разлома [144]. В течение 17 секунд это землетрясение стерло с лица земли целый поселок, унесло жизни 2 040 человек, то есть две трети населения поселка, 720 человек были ранены. Экономический ущерб составил 2 триллиона неденоминированных рублей, или 2 миллиарда рублей после деноминации. Разломы разных размеров находятся на границах различных по величине и объему структурных блоков земной коры. Между блоками копятся напряжения, в результате чего происходит их движение. Накопление напряжений происходит в результате отсутствия сдвигов по плоскости разлома при непрерывном движении его крыльев в определенном удалении от него. После этого происходит разрядка при подвижке, обусловленная чрезмерным увеличением предела прочности пород. Разломов, движения по которым происходят часто и постоянно, с так называемым криповым режимом смещений, очень немного. В итоге разрядки накопленных напряжений при проявлении смещений происходят не только землетрясения, но и извержения вулканов [57, 76, 87]. Так, например, всем известное тихоокеанское кольцо, считающееся наиболее опасным по причине часто повторяющихся землетрясений, извержений вулканов, а в результате всего этого и цунами, насчитывает огромное количество разломов по его периферии. Самыми известными являются глубоководные желоба, такие как Курило-Камчатский, Японский, Идзу-бонинский, Нансей (Рюкю), Филиппинский, Центрально-Американский, Чилийский, Тонга, Кермадек, Яванский (вблизи которого находится печально известный вулкан Кракатау, пепел которого три раза обогнул земной шар), а также всемирно знаменитая Марианская впадина, впадина Челленджера, Алеутская впадина. Расположенный в России Байкальский рифт, который образовался в результате расхождения Амурской и Евразийской плит, также тревожит частыми землетрясениями, из-за которых образуются оползни [144]. В других районах оползни в области разрывных нарушений приводят к разрушению объектов жилой постройки. Есть и положительные сто-

роны, которые можно использовать при развитии земледелия, но нужно помнить о разрушительных землетрясениях, в результате которых погибает большое количество людей и нарушается экологическая безопасность, например, Нефтегорское землетрясение, печально известная Фукусима, воздействия на окружающую среду которой были глобальны.

Для более правильного планирования хозяйственной и промышленной деятельности страны нужно учитывать воздействие от разрывных нарушений. Определенные шаги в данном направлении делаются. Проводятся исследования и поступают предложения по учету влияния разломов на кадастровую оценку земель жилой застройки населенных пунктов, с учетом ранга, типа разлома и степени тектонической активности [46]. Во многих странах при планировании участков под жилищное строительство учитывают такой фактор, как радоновая опасность, так как этот элемент находится в покровных надразломных отложениях. На экологическую обстановку территорий, расположенных вблизи разрывных нарушений, влияет выделение разломами ювенильных газов. Разломные зоны характеризуются повышенной трещиноватостью, дезинтеграцией и водонасыщенностью пород. Из-за этого происходят разуплотнение пород и загрязнение веществами из вышележащих пород подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. Это все сказывается на экономике Российской Федерации и на качестве жизни населения.

При детальном исследовании разрывных нарушений можно выделить разнообразные явления, сопутствующие разломам:

- вертикальный водогазообмен в результате потоков ювенильных флюидов;
- повышенная трещиноватость в результате динамики;
- загрязнение вод в результате разуплотнения пород;
- карстовые процессы, с чем связано разрушение зданий;
- оползни;
- землетрясения как результат тектонической активности [4].

С развитием исследований в области выявления разломов наметилась тенденция к более разумному планированию хозяйственной деятельности государ-

ства, которое базируется на учете влияний разрывных нарушений на различные сферы окружающей среды, приводящие к повышению рисков при освоении и строительстве объектов различного назначения. По активным разломам происходят смещения. Интервал смещений бывает разной амплитуды, в зависимости от длины, глубины и активности разлома. В Российской Федерации определены максимально допустимые смещения под объектами промышленного строительства, которые определены в соответствующих главах государственных строительных норм и правил. Свод правил по инженерно-геодезическим изысканиям для строительства СП 11-104–97 [107] гласит, что относительное горизонтальное сжатие или растяжение за весь срок службы сооружений не должно превышать 1 мм/м, наклон – 3 мм/м, радиус кривизны должен быть менее 20 км [104], уступ – 1 см, относительная неравномерность осадки фундамента не больше 0,006, крен фундамента для жестких сооружений меньше 0,004, для реакторов АЭС меньше 0,001 [103]. Если подвижки по разломам превышают данные нормы, следует указывать их на картах в качестве активных, независимо от их размера и территориальной расположенности. Это позволит спланировать, осуществить и проконтролировать оптимальную организацию территории, обеспечить межотраслевое взаимодействие, вывести учет рисков на более высокий уровень, учитывающий как сами факторы, так и их взаимодействие.

Рассмотрим основные определения в области исследования дизъюнктивных нарушений земной коры.

Дизъюнктивные нарушения – разрывы сплошности геологических тел. Это общий термин для трещин, разрывов, разломов. По происхождению дизъюнктивные нарушения делятся на нетектонические, возникающие при сокращении объема породы, выветривании, оползнях, падении метеоритов; и тектонические, подразделяемые на разрывы без смещения (трещины) и разрывы со смещением (сбросы, взбросы, сдвиги, надвиги, шарьяжи и раздвиги). По отношению к складчатым и другим тектоническим структурам они могут быть краевыми или граничными, внутренними и сквозными; по глубине проявления – приповерхностными или глубинными, рассекающими земную кору и верхнюю мантию [26].

Разрывные нарушения – см. Дизъюнктивные нарушения [26].

Тектонические дизъюнктивные нарушения – нарушения сплошности массива горных пород, выражающиеся в перемещении блоков пород относительно друг друга по плоскости разрыва сместителя [26].

Дислокации (геологические) (от позднелат. *dislocatio*  $\approx$  смещение, перемещение) – нарушения форм первичного залегания горных пород, вызванные тектоническими движениями земной коры, магматической деятельностью, метаморфизмом, экзогенными процессами (движения ледников, оползни, карст, речная эрозия и др.). Обычно подразделяются на складчатые (пликативные) и разрывные (дизъюнктивные); иногда выделяются еще инъективные. См. также Тектонические деформации [11].

Разлом — крупная дизъюнктивная дислокация земной коры, распространяющаяся на большую глубину и имеющая значительную длину и ширину. Разломы обычно происходят между разнородными тектоническими структурами и развиваются длительное время, в течение которого подвижки то усиливаются, то ослабевают. См. Разрыв [23].

Разрыв – разлом, нарушение сплошности горных пород. Выделяют разломы со смещением – разрывные смещения, или параклазы, и разломы без смещения – трещины, или диаклазы. Массы разобщенных или разорванных при этом горных пород образуют крылья разлома. При наклонном разломе выделяются лежащее крыло, подстилающее разлом, и висящее крыло, покрывающее разлом. Среди разрывных смещений различают: сдвиг, раздвиг, сброс, взброс, надвиг, тектонические покровы, сбрососдвиг.

Сброс – разрывное нарушение, при котором перемещение пород происходит либо по вертикальной (вертикальный сброс), либо по наклонной поверхности (плоскости) сместителя (крутопадающий сброс) [26].

Сдвиг – разрывное нарушение, при котором смещение горных пород по разлому происходит в горизонтальном направлении. Различают правые и левые сдвиги, согласные, несогласные, поперечные, продольные, косые относительно структуры вмещающих пород.

Раздвиг – разрывное нарушение в земной коре, образованное растяжением, при котором разделенные горные породы только раздвигаются и не испытывают каких-либо других относительных перемещений.

Взброс – смещение горных пород по разлому, связанное с поднятием одного блока относительно другого.

Надвиг – одна из форм нарушенного залегания горных пород, возникающая в процессе тектонических движений и характеризующаяся смещением по разломам одних масс по другим; по углу наклона плоскости смещения разделяются на пологие и крутые [20].

Сбрососдвиг – разрывное нарушение, характеризующееся вертикальным или наклонным сместителем и косым смещением по отношению к падению (простиранию) сместителя.

Дешифрирование – изучение по аэрофото- и космическим снимкам территорий, акваторий и атмосферы, основанное на зависимости между свойствами объектов и характером их воспроизведения на снимках [55].

Линеамент – выражающиеся на фоне ландшафта линии, обнаруживающие скрытые особенности строения коренной породы [70].

Дистанционное зондирование Земли – измерение и наблюдение из космоса отраженного и собственного излучения объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра с целью получения информации о временной изменчивости, свойствах, виде, местоположении объектов окружающей среды [80].

Дешифрирование – процесс распознавания объектов, их свойств, взаимосвязей по их изображениям на снимке [81].

В 40-х гг. XIX в. европейцы и американцы ввели в науку такие термины, как живой разлом и активный разлом, которые стали широко употребляться и в России. Эти термины обозначают тектонические нарушения земной коры, по которым были и могут ожидать подвижки. Зная, когда была последняя подвижка, и примерный период повторяемости, время которого рассчитывается от времени последней подвижки, которое обычно удваивается или утраивается, можно пред-



положить, когда произойдет подвижка в будущем. Но для того, чтобы выявить подвижки в прошлом по данному разлому, необходимо наблюдать и иметь данные по разломам в течение длительного интервала времени, в период которого происходило развитие и образование разлома. Подробно об исследовании разломов земной коры в России писал Трифонов В. Г. в своих трудах 1983, 1985, 2000, 2017 гг. Трифонов считал, чтобы признать разлом активным, интервал повторяемости подвижек максимально может охватывать голоцен и часть позднего плейстоцена [115]. В работах же Кожурина А. И. 2008 г. говорится о том, что если последний раз подвижки по разлому были более 10 тысяч лет назад, а раньше этот интервал был меньше, то разлом можно считать не активным [47]. Для обеспечения безопасности районов вблизи разломов от землетрясений и оценки сейсмического риска необходимо выявить разлом, определить его активность, точное место его нахождения, длину, магнитуду самых разрушительных землетрясений, происходивших в прошлом, направления смещений, их среднюю скорость для определения структуры тектонического нарушения земной коры, а следовательно и воссоздать определенный геологический период от прошлого до настоящего времени отдельного района, его структуры и места его в структуре всей земной коры. Так как для целей оценки сейсмического и инженерно-геологического риска наибольшую важность имеют молодые тектонические структуры, наиболее подробно нужно рассматривать структуру Сахалина в конце позднеорогенного этапа, когда остров имел практически те же очертания, что и в настоящее время [5, 18, 22, 24]. Для этого нужно сконцентрироваться на новейших разрывных нарушениях, выраженных в современном рельефе, которые могут проявлять свою активность и оказаться опасными для строительства сооружений и жизни людей. Те схемы и карты разломов, которые представлялись ранее [67, 68, 121, 149], имели существенные различия в общем стиле представления данных, в точности географической привязки, в детальности отображения, что важно как при поиске месторождений полезных ископаемых, так и при планировании строительства масштабных строительных проектов промышленности и хозяйственного назначения. Недочеты

карт разломов могут оказаться довольно опасным фактором ввиду разрушительности последствий, например, от Нефтегорского землетрясения.

Разломы опасны разрушительными землетрясениями, разрывы – медленным гравитационным сползанием по склону горных пород под влиянием периодического изменения объема грунтов. В трещинных зонах у пород резко снижается предел прочности, что опасно для горных выработок, так как снижается устойчивость боковых пород, в результате чего могут проявиться обрушения, вывалы и прочие следствия проявления горного давления. При строительстве скважин это довольно опасно, так как для устранения проблемы повышения горного давления утяжеляют плотность бурового раствора, что может привести к микрогидро разрыву, а после и к поглощению, из-за чего нередко закрываются скважины. Таким образом, существует потребность в построении карт разломов, в том числе в цифровом виде, для того чтобы их было удобно использовать в различных областях хозяйственной деятельности человека (рисунок 1).

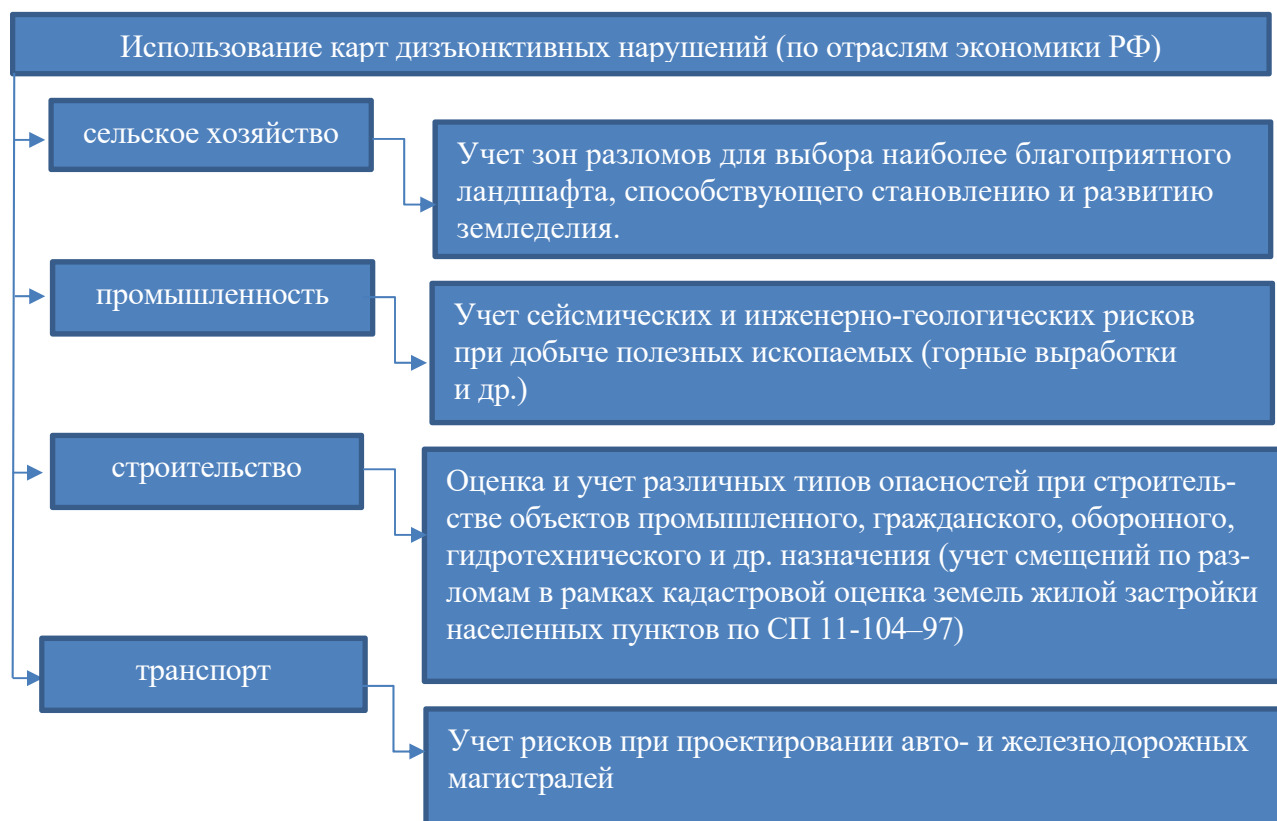


Рисунок 1 – Схема использования карт разломов в промышленности

## 1.2 Анализ изученности разломов Сахалина

На Сахалине довольно хорошо изучены активные крупные разломы, особенно расположенные на Севере, это связано с обнаружением нефтяных залежей и произошедшим разрушительным землетрясением в Нефтегорске. При поиске нефти и газа проводились геологоразведочные работы и было выявлено большое количество разрывных нарушений. В 1969 г. Соловьёв В. В. построил тектоническую карту Сахалина, долго использовавшуюся в качестве основной. После Нефтегорского землетрясения, которое произошло в мае 1995 г., интерес к неотектонике, в том числе и к разломным зонам, повысился. Для обеспечения безопасности стало необходимо более детальное изучение разрывных нарушений, особенно при строительстве нефте- и газопроводов, а также различных объектов промышленного, производственного и хозяйственного назначения на Сахалине. Благодаря более детальному изучению на Сахалине выявлен ряд новых разломных зон, связанных с новейшими тектоническими движениями, однако исследования продолжают по настоящее время, постоянно обновляя информацию о расположении зон дизъюнктивных нарушений.

Формирование современного рельефа острова связано с новейшим этапом геологического развития Сахалина [57, 73, 83, 85, 86], период которого разными исследователями определялся по-разному. О том, что период начинается с миоцена и заканчивается поздним плейстоценом писал Александров С. М. [3]. Некоторые ученые, такие как Ганешин Г. С. [19], Рудич Е. М. [95], Соловьёв В. В. [105], включали в него только плиоцен и плейстоцен. Самой распространенной и общепризнанной версией считается выделение новейшего периода от позднего плиоцена, когда почти закончилось геосинклинальное развитие и сложился последний ритм осадконакопления до голоцена. Горные области Сахалина сложены ярусами с выделением нескольких террасовых и водораздельных полигенетических уровней типа пенепленов и педиментов. На острове заметно преобладают блоковые структуры, ограниченные флексурами и разрывами. Обнаружены значительные

различия в рельефе западных и восточных гор острова. Молодые извилистые западные орогены слабо расчленены, в отличие от более древних эрозионно расчлененных восточных. Причина этих различий в разном возрасте восточных и западных гор [3]. Низменности, располагающиеся между горами, имеют слабо расчлененный рельеф. На территории между полуостровом Шмидта и Восточно-Сахалинскими горами большое количество увалов с сопками разделены субмеридиональными низменностями. Это говорит о молодости рельефа севера Сахалина, что свидетельствует об активных, орографически выраженных, разрывах, в которых активны сдвиговые нарушения. Среди локальных и региональных новейших структур преобладают блоковые формы. Об этом свидетельствуют многочисленные сводообразные изгибы поверхностей выравнивания с многочисленными разрывными смещениями и флексурными изгибами. Речные долины южного окончания Камышового хребта (к примеру, река Лопатинка) преимущественно относятся к плиоценовым синклиналям, а границы, разделяющие водосборы, – к антиклиналям [19]. Это говорит об одновременном завершении стадий складкообразования и заложением некоторых речных долин старше по геологическому возрасту растущих возвышенностей, которые они пересекают.

Самые древние поверхности выравнивания на Сахалине тектонически деформированы. Раннеорогенный этап Сахалина относят в основном к позднему миоцену, началу плиоцена. На этом этапе происходило возвышение Сусунайских, Восточно-Сахалинских гор и формирование складчатых нарушений, образующихся одновременно с ходом осадконакопления и прогибанием в Западно-Сахалинских горах. Тогда же образовалась сусунайская поверхность выравнивания. Максимальный диапазон прогибаний превышал максимальный диапазон воздыманий, но горообразование проявилось мощными возвышенностями. На позднеорогенном этапе появилось единое Северно-Сахалинское воздымание, а также формировались в основном блоковые структуры, которые структурно перестраивались в начале плейстоцена. На этом этапе появились значительные возвышенности Западно-Сахалинских гор. В интервале этого этапа во время средне-

го плейстоцена происходило резкое увеличение тектонических движений. В рельефе это выражено разновысотностью морских террас, которые тогда являлись береговыми линиями.

К высоким блоковым структурам относят Шмидтовское, Восточно-Сахалинское, Сусунайско-Тонинское, Южно-Камышное и Центрально-Камышное поднятие. Между этими блоками находятся опущенные участки земной коры, такие как Тымь-Поронайская и Аниво-Сусунайская низменности, которых относят к грабен-синклиналим структурам из-за наличия окаймляющих разрывных нарушений (рисунок 2).

Остров Сахалин можно разделить на зоны мегаподнятий, между которыми располагаются впадины. Данные зоны включают в себя полуостров Шмидта, Северо-Сахалинское инверсионное мегаподнятие, Центрально-Камышное, Восточно-Сахалинское мегаподнятие и Тымь-Поронайскую мегавпадину, Южно-Камышное и Сусунайско-Тонинское мегаподнятие, а также Аниво-Сусунайскую мегавпадину. Области, располагающиеся между зонами, включают в себя ряд более мелких структур и блоков, в которых происходят разрывные, сдвиговые, надвиговые смещения и сбросы [77]. Северо-Сахалинское инверсионное мегаподнятие, располагающееся между полуостровом Шмидта и Центральным Сахалином, образованное на месте раннеорогенного компенсированного мегапрогиба, локализовано между флексурно-разрывными зонами [90, 113]. Вдоль восточного побережья Северо-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий располагается шовно-сдвиговая система со сбросовыми нарушениями при поднятом западном крыле. Вследствие этого идет сеть оперяющих разрывных нарушений по восточной стороне острова, на которой произошло сокрушительное Нефтегорское землетрясение в 1995 г. [88, 94, 121]. Центрально-Камышное мегаподнятие разделено с Тымь-Поронайской мегавпадиной шовно-надвиговой системой. Западное побережье Центрального Сахалина характеризуется шовно-сбросовой системой [121]. Исследователь Рогожин Е. А. выделял Срединно-Сахалинскую шовную зону, а Нефтегорское землетрясение связывал с Верхнепильтунским разломом,

который считал сегментом зоны разломов Срединно-Сахалинского шва (рисунок 3). «Верхнепильтунский разлом четко выделяется на космических и аэрофотоснимках по резкому изменению фототонов, в региональных магнитном и гравитационном полях» [88]. На территории Сахалинской северной системы вероятны многометровые смещения при сильных землетрясениях.

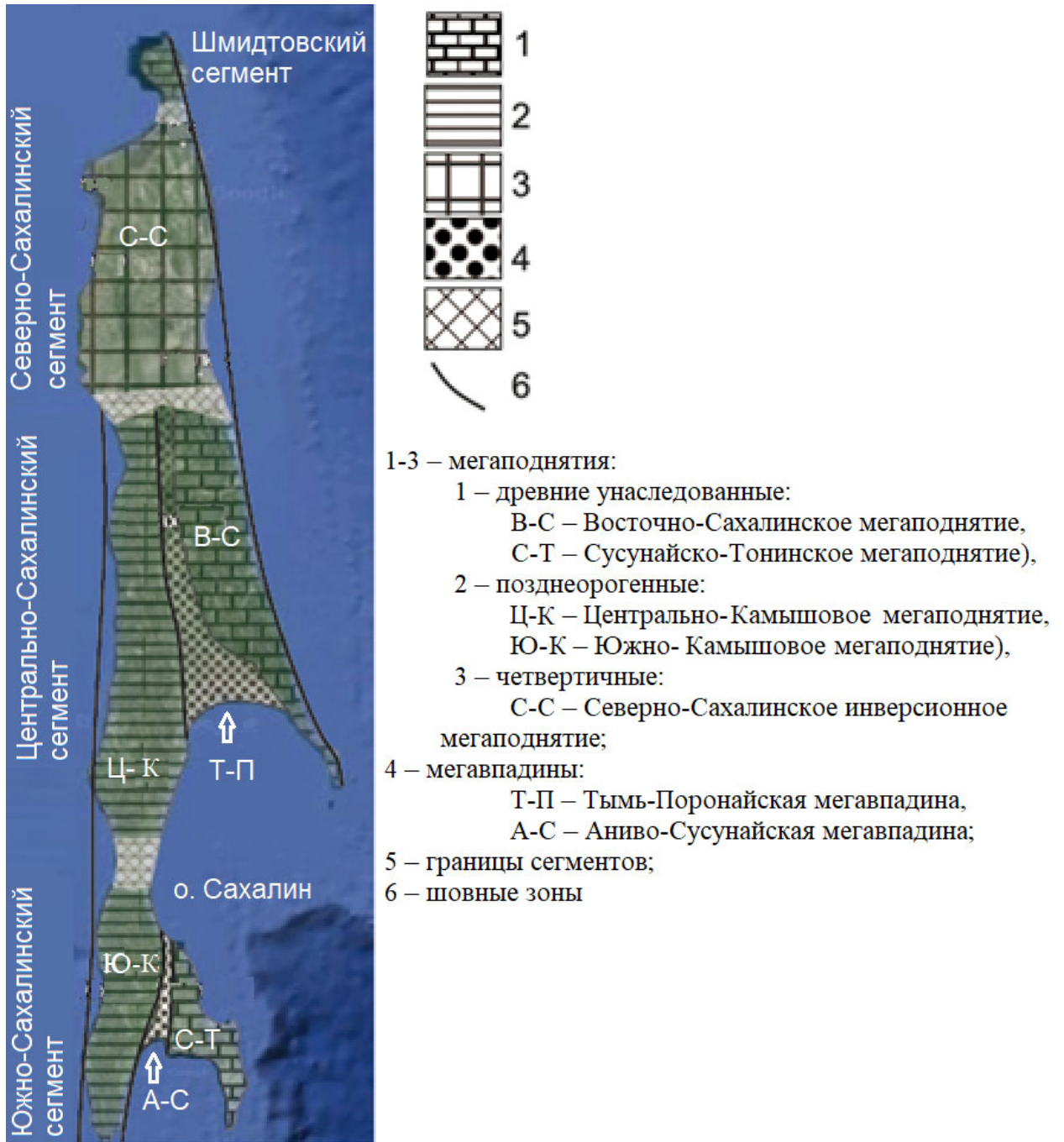
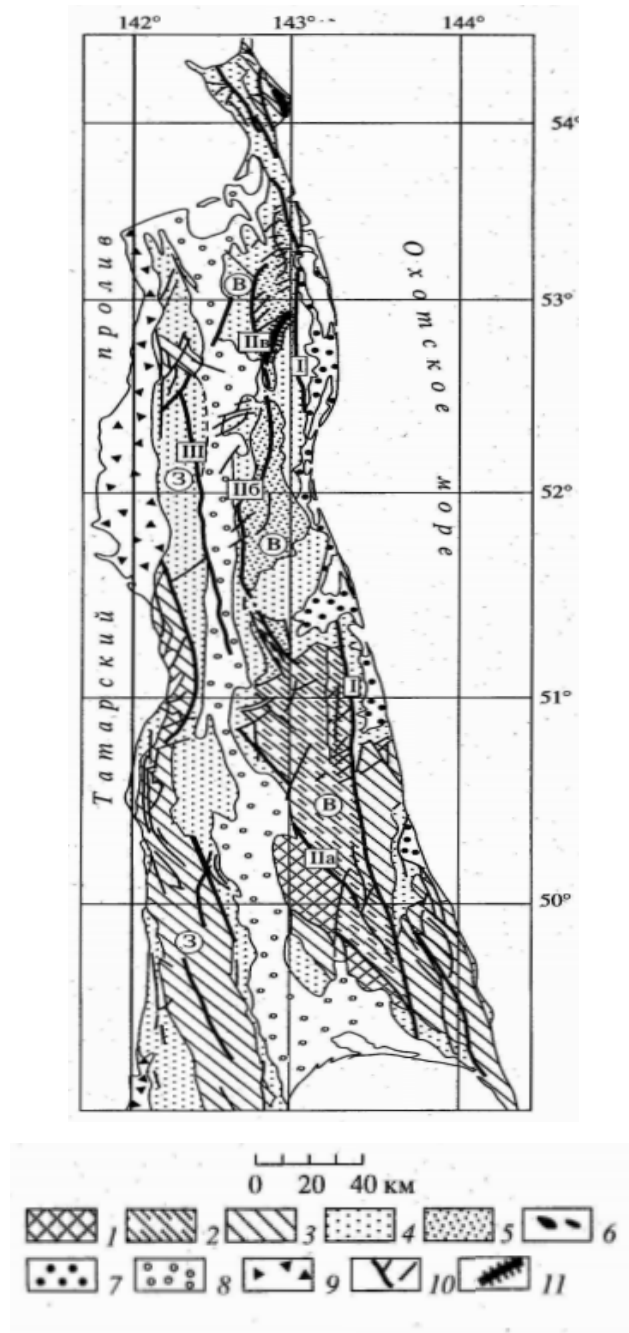


Рисунок 2 – Региональные новейшие (позднеорогенные) структуры Сахалина  
 (по данным Воейковой, 2007 [17])



1–6 – сводово-блоковые поднятия (В – Восточно-Сахалинское, З – Западно-Сахалинское);  
 1–5 – структурные комплексы: 1, 2 – нижние (1 – палеозойские, 2 – мезозойские), 3 – средний  
 (мел-палеогеновый), 4 – верхний (неогеновый); 5 – он же в ядре поднятия Восточного  
 Сахалина; 6 – офиолиты; 7–9 – депрессии: 7 – Восточно-Сахалинская, 8 – Тымь-Поронайская  
 (Центральная), 9 – Углегорская (Западно-Сахалинская); 10 – разломы; 11 – сейсморазрыв  
 Нефтегорского землетрясения. Названия разломов (римские цифры в квадратах):  
 I – Хоккайдо-Сахалинский; II – Срединно-Сахалинский (а – Невско-Первомайский,  
 б – Давыкский, в – Верхнепильтунский сегменты); III – Центрально-Сахалинский

Рисунок 3 – Обзорная тектоническая схема Центрального и Северного Сахалина

В Западно-Сахалинских горах при структурной перестройке в интервале новейшего этапа сформировались блоковые и складчато-блоковые структуры, разъединенные структурами коленообразных изгибов слоистой толщи и разрывами. Основные горсты данной территории выражены в Камышовом и Южно-Камышовом сводовом поднятии, Поясковой седловине. Данные дислокации, приподнятые над окаймляющей местностью, ограничиваются Центрально-Сахалинской взбросо-надвиговой зоной сгущения разрывных и блоковых структур.

Тынь-Поронайская мегавпадина представляет из себя грабен-синклинальный прогиб между Центрально-Камышовым и Восточно-Сахалинским мегаподнятием. Узкая северная часть мегавпадины осложнена осевой грядой горстовых поднятий. Из-за роста Центрально-Камышевого мегаподнятия западный борт Тынь-Поронайской мегавпадины втягивается в воздымание. На восточной стороне впадина, наоборот, уходит под Восточно-Сахалинские горы. Вследствие этого, тектоническая активность западной и восточной стороны Тынь-Поронайской мегавпадины, а, следовательно, Центрально-Сахалинского и Срединно-Сахалинского разломов различны.

Восточно-Сахалинское блоковое мегаподняtie обрамляют каскадно расположенные горсты и грабены, разделенные разрывами. Восточно-Сахалинское блоковое поднятие делится сетью разрывных нарушений субширотного простирания, особенно по западному борту, восточный же борт прямолинеен и состоит из системы сбросов, отделенных разломом от пограничного шельфа.

Сусунайско-Тонинское блоковое мегаподняtie ограничено с запада и востока крупными разрывами и состоит из двух орогенов, осложненных грабенами, которые разделены понижением. Это говорит о субширотном растяжении, так как из-за этого могла просесть территория между поднятиями. Сусунайско-Тонинское мегаподняtie отделено от Южно-Камышового поднятия Аниво-Сусунайской мегавпадиной, которая по своим характеристикам очень схожа с Тынь-Поронайской. Она также отделяет более древние Восточно-Сахалинские возвышенно-



сти от молодых Западно-Сахалинских. Большая ее часть занята депрессией, раскрывающейся в сторону Анивского залива. С запада Аниво-Сусунайскую впадину ограничивает продолжение Центрально-Сахалинской разломной зоны взбросо-надвигового типа [94, 96, 106].

У мегаподнятий Сахалина есть общая особенность – наличие присводовых впадин, которые свидетельствуют об их образовании в результате вертикальных новейших движений, а не горизонтальных движений, сопутствующих обычно структурам геосинклинального ряда. Таким образом, при изучении современных новейших тектонических движений нужно учитывать не геосинклинальность древних структур, а более молодую блоковость структур, новообразованные разрывы между ними и подвижки по ним.

На Сахалине выделяются определенные зоны влияния глубинных разломов, проникающих в литосферу и выделяющихся в рельефе концентрацией разрывных и блоковых структур. Тектоническое строение Сахалина определяется системами сопутствующих разрывов разломных зон. Одной из таких зон является транрегиональный Центрально-Сахалинский разлом 5-го ранга, который пересекает несколько частей острова Сахалин: Центрально-Сахалинскую и Южно-Сахалинскую, продолжаясь на о. Хоккайдо, хотя и теряет свою активность между островами, что говорит о несвязности блоков Хоккайдо и Сахалина, об их самостоятельности в отношении друг друга. Зона Центрально-Сахалинского разлома характеризуется взбросо-надвиговыми, реже сдвиговыми смещениями. Он фиксируется линейно вытянутыми зонами больших градиентов гравитационного поля, уступами в поверхности Мохоровичича и Конрада, а также преломляющими границами осадочной толщи [3]. Эта зона рассматривается как крупный структурный шов, сопровождающийся грязевулканическими, магматическими и рудными проявлениями. В области Центрально-Сахалинского разлома обнаруживаются различные разрывные палеосейсмодислокации, которые относят как к самому трансрегиональному разлому, так и к системе оперяющих его более мелких разрывных нарушений [10]. Боль-

Большинство разрывов данной области располагается между Центрально-Сахалинским и Ключевским разломом у подножия Западно-Сахалинских гор. В отличие от севера Сахалина, где разрывы в большинстве своем связаны со сдвигами север-северо-восточного направления, в южной и центральной части острова дислокации связаны с надвиговыми нарушениями. Мелкие нарушения области Центрально-Сахалинского разлома относят к взбросам (надвигам) с поднятыми западными или восточными крыльями. Распределение различных рангов разломов на острове крайне неравномерно. Большинство разрывных нарушений располагается в областях мегаподнятий острова.

На полуострове Крильонский в области Южно-Камышового мегаподнятия зарегистрирован один субмеридиональный региональный разрыв. Он простирается от поселка Яблочный до мыса Кузнецова. Из-за своего расположения разлом назван Яблочно-Кузнецовским. Судя по характеру извилистости рек – это типичный взбросо-надвиг [74, 92, 94], который ограничивает с востока краевую гряду поднятий. Остальные разломы относятся к локальным, то есть менее 70 км. В центральной и южной частях мегасвода распространены флексуры, которые, в отдельных случаях, являются продолжением разломов. На юго-востоке полуострова часто встречаются циркообразные сбросы и дугообразно изогнутые флексуры, ограничивающие краевые блоки отседания.

Сусунайская долина делится Ключевским субрегиональным надвигом, имеющим сложное западное оперение, на Углезаводскую приподнятую местность на Западе и Сусуя-Такойскую впадину на Востоке. Есть мнение, что сам Ключевской надвиг является оперяющим по отношению к Центрально-Сахалинскому трансрегиональному разрыву, располагающемуся в 3–7 км западнее ключевской зоны разломов. Эта зона, разделяющая Углезаводскую ступень и Сусуя-Такойскую грабенообразную впадину, представлена серией подставляющих друг друга надвигов [65]. Аниво-Сусунайская мегавпадина обособлена от Сусунайско-Тонинского мегаподнятия Сусунайским субрегиональным сбросом меридионального простиранья.

Границы Сусунайско-Тонинского мегаподнятия сложены циркуобразными сбросами. В районе Корсаковской возвышенности и Тунайчинской низменности распространены флексуры локальных блоков.

Центрально-Камышовое мегаподнятие, в отличие от Южно-Камышового, включает в себя четыре региональных разлома. Получается, чем выше мегасводы, тем больше региональных (500–100 км) и субрегиональных (100–70 км) разломов, но меньше флексур. Восточно-Александровский и Северно-Камышовый разрывы представляют собой сбросы. Западно-Камышовый разрыв, ограничивающий с запада Камышовый хребет на севере, представляет из себя взбросо-надвиг [94] с восточным наклоном сместителя, на юге представлен типичным сбросом. Восточно-Камышовый разлом также представляет из себя взбросо-надвиг [2], но с наклоном сместителя к западу. О сдвиговых смещениях говорят резкие различия в строении приразрывных зон. В средней части мегасвода располагается три субрегиональных разрыва от 100 до 70 км. Те два, что располагаются на востоке, – типичные сбросы, а западный, окаймляющий Углегорский хребет с востока, является взбросо-надвигом с наклоном сместителя к западу. Большую часть региональных и субрегиональных разломов ограничивают грабенообразные впадины. Впадина между Углегорским субрегиональным и Западно-Камышовым региональными разрывами трассируется как рамповый грабен. Локальные разрывы менее 70 км в основном принадлежат сбросам. В обрамлении поднятых крыльев региональных разломов встречаются отдельные циркуобразные сбросы. На краях мегасвода располагаются флексурные сочленения.

При рассмотрении Тымь-Поронайской мегавпадины можно заметить большое количество флексур в области Западно-Поронайской зоны прибортовых структурных ступеней, по западной части Поронайской впадины. На Тымской территории помимо флексур развиты локальные сбросы.

В области Восточно-Сахалинского мегаподнятия располагаются три региональных (500–100 км) и два субрегиональных (100–70 км) разлома. Некоторые

ученые выделяют здесь два сегмента Центрально-Сахалинского разлома, которые называются Невско-Первомайский и Давыкский. Верхне-Пильтунский его сегмент относится к Северно-Сахалинскому инверсионному мегаподнятию [88]. Сегменты разлома, обладающие северо-восточным простиранием, соответствуют зонам ранне- и среднемиоценового растяжения, а отрезки с северо-западным простиранием – зонам сжатия, что характерно для правых сдвигов [106]. Западно-Лангерийский взбросо-надвиговый разрыв и Восточно-Лангерийский сбросовый разлом ограничивают Луньскую цепь грабенов. Южная часть Восточно-Лангерийского разрывного нарушения извилиста, представляет из себя надвиг. Пограничный малоизвилистый сбросовый региональный разрыв обособляет одноименную цепь с запада. Восточная сторона Пограничной цепи сложена локальными сбросами. Субрегиональный Западно-Набильский сброс изломан, это свидетельствует о его происхождении в результате слияния нескольких локальных разломов, как и Белореченский субрегиональный сброс, который примыкает к Набильскому с юга. Крылья многих разрывов регионального и субрегионального уровня сопровождаются циркообразными сбросами. Само Восточно-Сахалинское мегаподнятия ограничено флексурными сочленениями с северной, северо-восточной и юго-западной стороны.

Северно-Сахалинское инверсионное мегаподнятия включает в себя один региональный (100–500 км) сбросо-сдвиговый Северо-Сахалинский разлом меридионального простирания. Рогожин Е. А. его относил к Хоккайдо-Сахалинской системе разломов [88, 101]. К западу от него расположен ряд локальных разрывов и сбросов. Флексурные сочленения расположены на севере, а сбросы – на юге данной территории. Узкие цепи поднятий распадаются на огражденные короткими сбросами небольшие выступы, которые морфологически схожи с развитыми на юге Тонино-Анивского полуострова и полуострова Терпения.

Шмидтовское мегаподнятия разделено сложной системой локальных сбросов на блоки. Флексуры развиты, в основном, в центральной и южной частях полуострова. На северо-западе мегаподнятия преобладают циркообразные сбросы.

К наиболее опасным разломным зонам острова Сахалин принято относить:

- 1) Северно-Сахалинскую зону, на которой выражены сдвиговые и сбросовые смещения;
- 2) Центрально-Сахалинский разлом с преобладанием взбросо-надвиговых и реже сдвиговых смещений;
- 3) Западно-Сахалинский разлом, в результате подвижки по которому произошло разрушительное Нефтегорское землетрясение;
- 4) Срединно-Сахалинская зона со сдвиговыми и взбросовыми смещениями.

У этих зон внушительная ширина (до первых десятков километров) и целый ряд разрывных сместителей, в том числе активных [1, 9, 10, 33, 48, 56, 64, 93, 101, 109, 137]. Некоторые разрывные нарушения теряют, а некоторые проявляют свою активность. Однако геологические, геоморфологические и геофизические материалы во многом неоднозначны и недостаточны. Геологические карты, отражающие разломы Сахалина [28, 32], часто требуют от человека, использующего их, знания немалого числа условных маркеров из-за сложной системы записи атрибутики разломов. Из-за этого возникают проблемы при классификации и объединении в группы объектов по необходимым свойствам, а также при дальнейшей обработке их в ГИС-программах.

Поэтому необходимо построить актуальную, легко читаемую карту дизъюнктивных нарушений на основе космических снимков настоящего времени.

### 1.3 Анализ методик и технологий, позволяющих получить данные для выявления дизъюнктивных нарушений

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 [8]. Недостатком такого подхода яв-

ляется 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 [49, 66, 69]. Методики автоматизированного дешифрирования разносезонных зональных космических изображений дают более достоверные результаты [110]. Для 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 [124, 125, 143]. Методы автоматизированного линеаментного анализа позволяют повысить распознаваемость разрывных нарушений различного ранга. Многие исследователи проводят линеаментный анализ с помощью программы Lessa, основанной на статистическом анализе линейных элементов [31, 34–39]. 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 линеаментов в различных программных пакетах, существенно отличаются. Особенности методик известных

программных пакетов хорошо описаны Зверевым А. В. Программный комплекс PlanetaMonitoring, широко используемый исследователями, проводит выявление линейных элементов с помощью контролируемой классификации (основанной на байесовской стратегии максимального правдоподобия) и кластеризации (основанной на алгоритме К-средних) [143]. Однако ввод всех параметров довольно субъективен и требует от исследователя огромного опыта в дешифрировании изображений и знания большого числа программных алгоритмов для выявления разрывных нарушений с учетом особенностей каждой исследуемой территории и изображения. Отсутствие открытого исходного кода в программах является значительным минусом, осложняющим интерпретацию результатов. Шевырев С. Л. разработал программу Lefa с открытым исходным кодом и алгоритмами, широко используемыми в компьютерном зрении, наиболее подходящими для исследования линейных элементов. Однако анализ имеющейся литературы в области данных исследований показал, что нет разработанной технологии дешифрирования для выявления разрывных нарушений, использующей совместно локальные оптимальные алгоритмы (основанные на анализе соседних пикселей, не зависящие от контекстуальной информации), «контекстуальные» алгоритмы обнаружения границ, основанные на вычислении производных второго порядка, алгоритмы, основанные на фрактальной геометрии, и алгоритмы оценки достоверности, основанные на анализе расположения точечных объектов (землетрясений), сопутствующих разлому. Таким образом, необходима разработка технологии дешифрирования изображений для выявления разрывных нарушений, основанная на перечисленных алгоритмах и принципе множественности, подтверждающая свою достоверность геофизическими данными.

Разломы выявляют по изображениям земной поверхности благодаря их линейному выражению в рельефе. Такими изображениями являются космические и аэрофотоснимки дистанционного зондирования Земли. Дистанционное зондирование обеспечивает наблюдение за поверхностью Земли благодаря съемочной аппаратуре, размещенной на космических или авиационных летательных аппаратах. Дистанци-

онное зондирование Земли является достаточно актуальным методом изучения нарушений земной поверхности ввиду объективности, доступности, а также масштабности исследуемых территорий. Благодаря этому методу можно рассматривать труднодоступные участки земной поверхности, наблюдать за катастрофами различной этимологии (техногенными и природными), изучение которых было бы невозможно при наземных методах исследования. Дистанционное зондирование Земли производят с помощью космических аппаратов, самолетов, летательных, беспилотных аппаратов, научно-исследовательских судов-лабораторий и многого другого.

При анализе изображений часто исследуют речные долины, глубину врезания русла, наклоны поверхностей для выявления положительных и отрицательных структур. Однако при рассмотрении этих параметров было бы правильно учитывать и различие строения и состава горных пород, так как, например, более химически активные породы размывает гораздо быстрее, также как трещиноватые и более раздробленные породы.

При дешифрировании космических снимков исследуется структура земной коры путем ее отражения в современном рельефе. Неотектонические движения вскрывают более древние, залегающие глубже, структуры. Однако снимки показывают современную геодинамику неотектонических процессов. По исследованиям изменений фототонов на снимке через определенные признаки можно выявить разрывные нарушения.

Выделяют следующие наиболее распространенные параметры, влияющие на характер фототонов [139].

1 Более обводненные зоны, которые говорят о повышенной проницаемости породы, что характерно для разломов.

2 Цвет растительного покрова говорит о влиянии различных химических воздействий на растительность, что указывает на глубинные газы, флюиды, которые поднимаются в результате различных деформаций по разлому.

3 В период весны таяние снегов происходит быстрее в более теплых зонах разломов, по которым идет повышенный тепловой поток. Однако все же следует



учитывать геоморфологию местности, закрытость или открытость с северной и южной стороны.

Трифонов и Кожурин выделяли основные параметры выявления разломов [48, 116].

1 Выделение разломов должно сопровождаться отбросом других возможных причин образования линейных форм рельефа, не связанных с тектоникой, таких как экзогенные процессы: выветривание, аккумуляция, эрозия, денудация.

2 При выявлении разломов нужно учитывать тот факт, что при его образовании в результате геологических преобразований более молодые породы относительно друг друга менее смещены, чем более древние.

3 При изучении снимков для обнаружения разломов нужно учитывать историю образования геологической структуры местности.

Системы дистанционного зондирования Земли, позволяющие выявить нарушения земной поверхности, могут состоять из взаимодействия наземных и космических или авиационных технических средств. С помощью космических и авиационных объектов проводится съемка Земли. Данные авиационной съемки в основном можно получить при посадке летательных аппаратов, в отличие от данных космической съемки, которые передаются с помощью радиоканала средствами передачи данных. Специализированная аппаратура дистанционного зондирования Земли находится на базовой платформе аппаратов. Хранение, передачу, первичную обработку данных обеспечивает приемная станция на Земле, которая управляет спутниками и следит за режимом работы съемочной аппаратуры. Располагают приемные станции так, чтобы охватить более обширную территорию, обеспечивая оперативное получение данных.

При сравнении космических и аэрофотоснимков как объектов исследования и источников информации, позволяющих выявить разрывные нарушения земной коры, можно отметить следующее.

1 Космические снимки позволяют покрыть большую площадь без необходимости сшивки отдельных фрагментов, в отличие от аэрофотосъемки. Для по-

иска разрывных нарушений трансрегионального (более 500 км) и регионально-го (500–100 км) характера необходимы снимки большой площади.

2 На современных космических снимках разрешение до 30 см, но это не сравнится с аэросъемкой, разрешение которой может быть и 2 см. Хотя для изучения разломных зон вполне достаточно и 30 см.

3 Аэрофотосъемка нерентабельна при съемке небольших участков территории, а для космических аппаратов минимальная площадь для новой съемки 25 м<sup>2</sup>, что опять же плюс для поиска локальных разрывов длиной менее 70 км.

4 В 2014 г. решением кабинета министров № 1254 были устранены ограничения на съемку со спутников разрешением свыше 1 м по всей территории Российской Федерации. Это решение было принято по результатам заседания о перспективах развития космической отрасли в России, то есть теперь можно заказывать снимки высокого разрешения для изучения дизъюнктивных нарушений в различных районах Российской Федерации. Для проведения аэросъемки все же потребуются разрешение и согласование.

В настоящее время можно использовать снимки из архива и со спутников, находящихся на орбите, причем и отечественных, и зарубежных, таких как Terra и Aqua MODIS, ASTER, VIIRS, Resourcesat-1, 2, IKONOS-2 OrbView-3, CBERS-4, Sentinel-1, 2, SPOT-5-7, Pleiades-1, Kompsat-2, 3, 3A, SuperView-1, Envisat, Meris, GIBS и Proba-V., COSMO-SkyMed-1-4, TerraSAR-X, Radarsat-2, ALOS (Prism, Avnir-2), Pleiades-1 B, Pleiades-1 A, IKONOS (архивные), QuickBird (архивные), GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, Ресурс-П, Ресурс-ДК1, Landsat-7, -8. Предоставлением снимков занимается известная компания «Совзонд». Снимки в свободном доступе находятся на различных сайтах и порталах [97–100, 149]. В зависимости от целевого назначения различают спутники коммерческого, научного, социально-экономического и оборонного назначения. Для дешифрирования разломов необходимо использовать снимки с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли научного назначения. Местоположение спутников вокруг Земли зависит от их орбиты, характеризующейся тремя

параметрами: величиной наклона ( $i$ ), значением большой полуоси ( $a$ ) и величиной эксцентриситета (чем больше значение  $e$ , тем более высокоэллиптическая орбита, при  $e = 0$  орбита будет близка к кругу). Чем больше величина наклона, тем более северные широты снимает спутник, чем он выше, тем большую полосу видимости охватывает. От высоты орбиты зависит время, за которое спутник может сделать полный оборот вокруг Земли. По величине большой полуоси различают высокоорбитальные ( $a > 35\,786$  км), среднеорбитальные ( $2\,000$  км  $< a < 35\,786$  км), низкоорбитальные ( $160$  км  $< a < 2\,000$  км) и геостационарные ( $i = 0^\circ$ , на высоте  $35\,786$  км) или геосинхронные ( $i \neq 0^\circ$ , на высоте  $35\,786$  км) спутники. За счет того, что у геостационарных спутников период обращения вокруг Земли равен сидерическим суткам ( $23$  ч  $56$  м  $4,09$  с), создается впечатление, что они «зависли» в небе на одном месте. Геостационарный спутник, при условии постоянной корректировки своей орбиты, будет снимать одну и ту же местность на Земле в течение длительного времени. В зависимости от величины наклона орбиты бывают полярными ( $i = 90^\circ$ ), экваториальными ( $i = 0^\circ$ ), диагональными ( $0^\circ < i < 90^\circ$ ), солнечно-синхронными (одну и ту же местность спутник снимает в одинаковое время).

Для выявления разломов необходимо использовать данные со спутников, дистанционно зондирующих Землю. Эти спутники исследуют Землю в различных диапазонах электромагнитного спектра, на них установлена съемочная аппаратура, принимающая длины волн от ультрафиолетовых до инфракрасных и радиоволновых. Наиболее часто такие спутники движутся по солнечно-синхронной орбите. Примерами таких спутников являются спутники Landsat-8 (солнечно-синхронная, приполярная), Terra и Aqua MODIS (солнечно-синхронная), Sentinel-2,-3 (солнечно-синхронная) и др.

Таким образом для выявления разрывных нарушений Сахалина нужны данные со спутников, захватывающих полосой охвата остров Сахалин (Landsat 7,8; Sentinel 2,3; Terra MODIS и др.).

Космическая съемка – получение информации о территории поверхности Земли и ее атмосферы с высоты более 150 км с помощью космических аппаратов (спутников), следующих по установленной орбите. При проведении космической съемки часть электромагнитных лучей поглощается атмосферой. Электромагнитным излучением являются электромагнитные волны, то есть изменение (возмущение) электрического и магнитного полей, которое распространяется в пространстве. Лучи с разными длинами волн поглощаются по-разному. Стараются использовать участки спектра, в которых электромагнитное излучение практически не поглощается атмосферой. Такие участки называются «окнами прозрачности атмосферы», широкое окно прозрачности приходится на волны с длиной от 0,4 до 1,3 мкм.

Методы дистанционного зондирования Земли бывают пассивными и активными. При применении активных методов используют вынужденное излучение объектов, которое инициируют излучением искусственного происхождения направленного действия. Пассивные методы основываются на естественном отраженном или вторичном тепловом излучении объектов.

Для лучшего анализа земной поверхности необходимо сочетать оба этих метода, поэтому на космических аппаратах взаимодействует оборудование активного и пассивного типов, позволяющее регистрировать излучение электромагнитных волн в различных диапазонах. К пассивным методам относится регистрация датчиками инфракрасного излучения, солнечного света, отраженного от объекта, к примеру пленочная и цифровая фотография.

Оборудование, использующее активные методы, вырабатывает сигнал специальными датчиками, с целью сканирования объекта, и принимает отраженный или сформированный ввиду обратного рассеивания сигнал поверхности. Примером могут служить лидары и радары.

С помощью аппаратуры дистанционного зондирования Земли проводят такие виды съемок, как тепловая инфракрасная (тепловые инфракрасные снимки), съемка в радиодиапазоне (радиолокационные и микроволновые радиометриче-

ские снимки), съемка в видимом, ближнем и среднем инфракрасном (световом) диапазоне (сканерные, фотографические и ПЗС-снимки) [127].

ПЗС-снимки получают в результате регистрации электронов, возникающих на кремниевых пластинах (пикселах) под действием фотонов. Количество электронов на пластинах пропорционально числу попавших на них фотонов.

В видимой и ближней инфракрасной областях спектра содержится самая содержательная по своему масштабу информация. Группы снимков в световом диапазоне получают в области спектра с длиной волны до 3 мкм. Волны с длиной менее 0,4 мкм являются ультрафиолетовыми, от 0,4 до 0,7 мкм являются видимыми для человеческого глаза, от 0,7 до 3 мкм являются ближними инфракрасными. Группы снимков в тепловом инфракрасном диапазоне получают при длине волны от 3 до 1 000 мкм. Группы снимков в радиодиапазоне получают при длине волны более 1 мм. Съемка в видимом диапазоне базируется на различии спектральных коэффициентов отражения геологических объектов. Результаты съемки фиксируются на магнитной ленте и отображаются на карте. Для этого вида съемок применяются кино- и фотокамеры.

Показатели, регистрируемые при съемках в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах:

- 1) излучение электромагнитного поля;
- 2) солнечная радиация, отраженная от земной поверхности;
- 3) собственное тепловое излучение системы «Земля – атмосфера».

При проведении исследований в диапазоне видимого и ближнего инфракрасного спектра обнаруживаются существенные минусы, к которым относятся: во-первых, помехи от различных погодных явлений, во-вторых, допустимость проведения съемки определяется освещением земной поверхности Солнцем.

Для сканерной съемки видимый и инфракрасный диапазон являются наиболее информативными [52]. В соответствии с получаемой информацией сканеры производят обзорную и точную съемку, обусловленную разрешением снимка и шириной снимаемой полосы, что, в свою очередь, основывается на мгновенном

угле зрения и угле обзора. Из полос формируется магнитная лента, на которой проявляются изображения со сканера, состоящие из большого количества отдельных точек-элементов. Большой вклад в развитие сканерных съемок внесло использование многоспектральных оптико-механических и оптико-электронных систем на спутниках, что позволило увеличить масштаб изображения наблюдаемого объекта.

Сканерную съемку могут проводить спутники Landsat 5 и Landsat 7. Большой поток информации обрабатывают сканеры, производящие съемку в семи спектральных диапазонах, соответственно на обработку такого объема требуется очень много времени.

Съемка в разных областях спектра проводится с помощью телевизионных, фотографических, оптико-электронных сканирующих систем. Во всех системах присутствуют общие главные элементы, такие как фотокамера, радиолокатор и сканер. Но эти элементы систем, в зависимости от назначения, отличаются друг от друга.

Оптико-электронные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли базируются на трактовании характеристик электромагнитного излучения, отражаемого или излучаемого объектом и регистрируемого в некоторой точке пространства, удаленной от него.

Оптико-электронные спутниковые системы используют датчики, благодаря которым они в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах распознают пассивное отраженное излучение земной поверхности. В данных системах электрические сигналы, обусловленные интенсивностью излучения, возбуждаются специальными датчиками, на которые попадает оптическое излучение, благодаря которому переносится информация о наблюдаемом объекте земной поверхности. Съемка данных систем дистанционного зондирования Земли проводится в оптическом диапазоне электромагнитных волн.

Телевизионная съемка проходит в оптическом диапазоне электромагнитного спектра с длиной волны от 0,4 до 1,1 мкм. Съемка производится с помощью телекамеры. Электрический видеосигнал передает электронное изображение, которое

создается на светочувствительном экране, на который проектируется оптическое изображение объектов (рисунок 4).

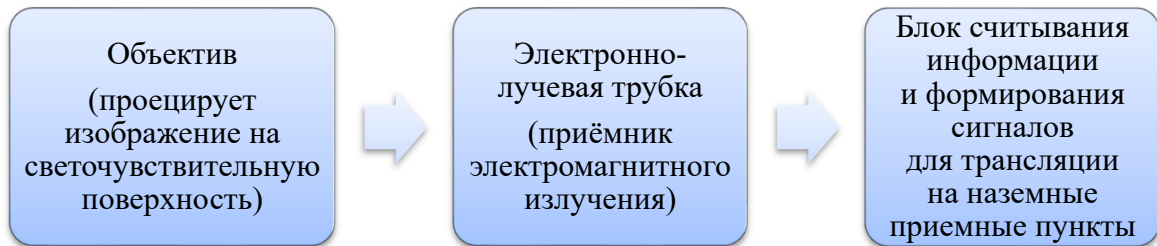


Рисунок 4 – Основные элементы телевизионной камеры

В световой сигнал электромагнитное излучение преобразовывается с помощью электронно-лучевой трубки, основного элемента телекамеры.

Для получения многозональных изображений применяют несколько телекамер со светофильтрами.

Различают телевизионные системы сканерного и кадрового типа. В телевизионных системах сканерного типа развертка изображения по строке осуществляется электронным способом, в отличие от кадрового типа, где развертка изображения по строке происходит за счет перемещения носителя.

К преимуществам телевизионных съемок можно отнести оперативность получения изображений, несложность обработки данных, возможность провести съемку одного и того же участка исследуемой поверхности. К недочетам относится низкое разрешение, существенные геометрические искажения. Телевизионные системы установлены на спутниках NOA, ITOS и др.

Съемка, которая выполняется в узких спектральных диапазонах, называется многозональной и имеет широкое распространение.

Фотографические системы снимают в видимом диапазоне электромагнитного спектра посредством системы «объектив – фотопленка». Пленка может быть цветной, цветной спектральной и черно-белой. К достоинствам данных систем можно отнести высокое разрешение, геометрические и фотометрические свойства снимков, а также недорогое их хранение. К недостаткам же относится

редкость их получения, так как контейнер с пленкой можно получить на Земле не чаще, чем один раз в две недели. Для того, чтобы компенсировать недостаток оперативности системы «объектив – фотопленка» используют многозональные сканирующие системы. Благодаря различным сочетаниям системы «фильтр – пленка» получают дополнительную необходимую информацию при исследовании объектов, подбирая их под нужные характеристики объектов.

У фотосъемки существуют свои сильные и слабые стороны. К слабой стороне можно отнести то, что пленка на борту хранится в определенном количестве, а ее доставка на Землю ограничена временем, средствами и многими другими причинами. К плюсам фотосъемки можно отнести ее информативность, охват большой площади. Высота съемки и фокусное расстояние объектива определяет масштаб снимка. Спутники, орбитальные станции и пилотируемые корабли ведут данный вид съемок. Благодаря разнообразным видам аппаратуры и фотопленок можно сделать плановые и перспективные снимки:

- с высоким разрешением, благодаря оборудованию, при котором перекрытие составляет более 60 %;
- в разных спектральных диапазонах (включая ближнюю инфракрасную зону до 0,86 мкм);
- с топографической привязкой, применяя монтаж фотосхем.

К географической сетке координат хорошо привязываются трансформированные космоснимки.

С помощью радарного вида съемки хорошо дешифрируется гидрологическая сеть, отдаленные, непроходимые части поверхности Земли, в том числе в темное время суток и при плохих погодных условиях, а также вид других планет. Для данной съемки подходит радиодиапазон электромагнитного спектра. Различают радиолокационные станции панорамного обзора и бокового обзора [112]. Радиолокационные станции панорамного обзора использовались в прошлом и были довольно не информативны. Благодаря им можно было различить лишь крупные объекты типа мостов, кораблей, населенных пунктов. Радиолокационные станции



бокового обзора значительно увеличили разрешение съемки, позволили наблюдать более широкие полосы поверхности, движущиеся и невидимые в оптическом диапазоне объекты. Работа радиолокаторов основана на том, что определенные источники подают данные сигналы, а после получают от исследуемого объекта отраженный сигнал приемником, засекая, за какое время данный сигнал пройдет от источника, через объект, к приемнику. Изображение может быть разной текстуры (зависит от рельефа), от светлого до черного тона (зависит от свойств пород).

Для изучения топографии и рельефа в настоящее время используются радиолокаторы, что является достаточно информативным. Цифровая модель рельефа построена в результате кооперации различных методов, но основой для нее послужили данные радиолокационной съемки.

Благодаря радиолокационной съемке можно распознать объекты, отражающие радиотепловое излучение (радиоимпульсы определенного сантиметрового диапазона 0,3–100 см), создаваемое радиолокаторами.

Радиолокатор, расположенный на различных носителях, будь то беспилотный летательный аппарат, спутник или самолет, является активным микроволновым датчиком, который передает и принимает поляризационные радиоволны в определенном диапазоне длин волн (частот) электромагнитного спектра. Различные диапазоны съемки, в зависимости от длин и частоты электромагнитных волн, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазоны съемки

Длина волны ( $\lambda$ ), см	Частота ( $\nu$ ), ГГц	Диапазон
0,8–1,1	40,0–26,0	Ka Band
1,1–1,7	26,5–18,5	K Band
1,7–2,4	18,5–12,5	Ku band
2,4–3,8	12,5–8,0	X Band
3,8–7,5	8,0–4,0	C Band
7,5–15,0	4,0–2,0	S Band
15,0–30,0	2,0–1,0	L Band
30,0–100,0	1,0–0,3	P Band

Радиолокационные системы бывают разных конструкций. Наиболее известными являются радиолокаторы бокового обзора (разрешение 1–2 км) и радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (разрешение 10–25 м). Принцип действия локатора с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radar) заключается в том, что полученные радиолокационные данные сохраняются совместно с данными о местоположении платформы, и когда происходит повторная съемка данной местности, эти данные анализируются совместно с новыми данными при перемещении платформы. Размер синтезированной апертуры определяет расстояние, на которое переместится платформа в течение интервала времени, при котором эти данные сохраняются.

Радиолокационный канал состоит из радиолокационной станции, цели исследования, именуемой объектом, и среды, в которой радиоволны распространяются от станции до объекта и обратно, а также радиоволн, находящихся в зоне обзора станции (рисунок 5) [112].

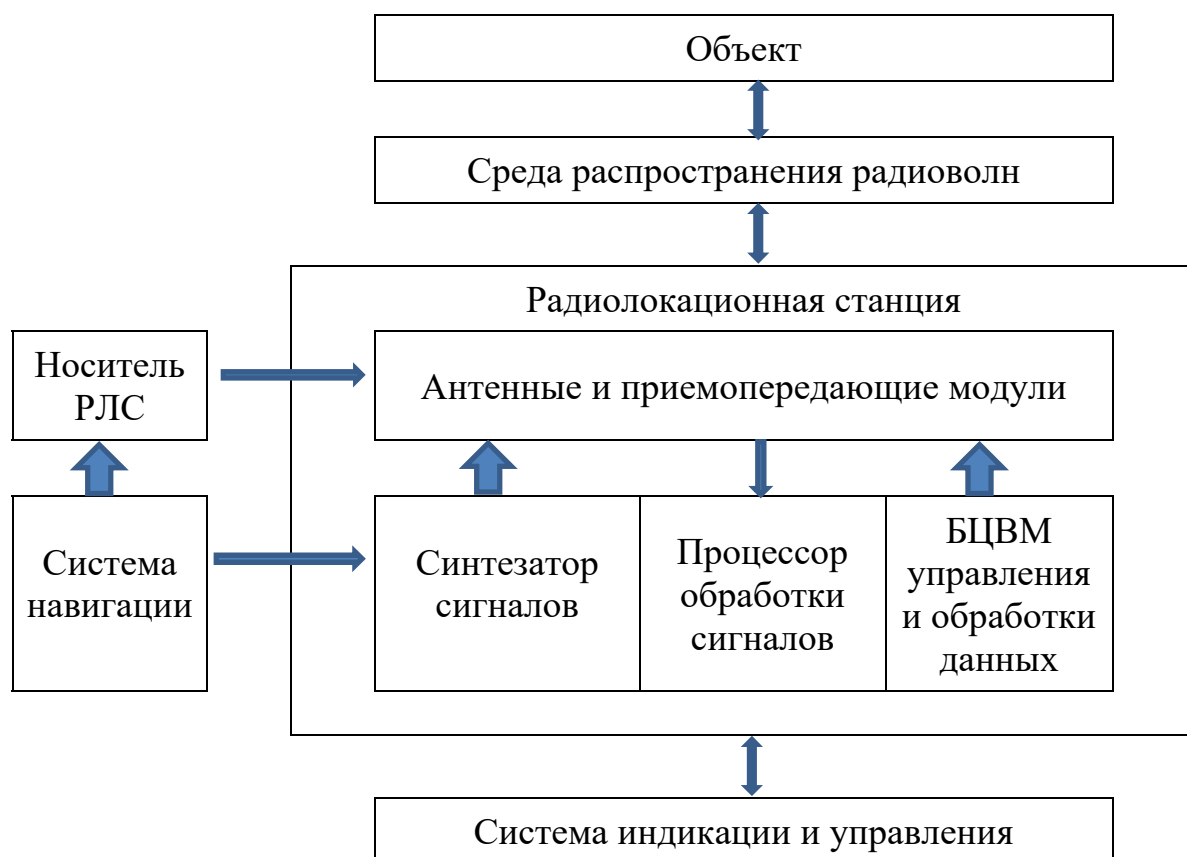


Рисунок 5 – Схема работы радиолокационного канала

Группа объектов состоит из основного объекта (цели), вспомогательного объекта (ориентира), сопутствующего объекта (фона) и объектов, излучающих или переизлучающих помеховые сигналы (источники помех).

Среда распространения – область распространения радиоволн между радиолокационной системой (РЛС) и объектом. В основном считают, что электромагнитные волны между РЛС и объектом распространяются прямолинейно с постоянной скоростью, но из-за преломления при наличии неоднородной среды, а также из-за поглощения радиоволн пространством могут возникнуть неточности при определении свойств цели-объекта. В связи с этим характеристики среды распространения важно и нужно учитывать.

Радиолокационная станция включает в себя аппаратуру радиолокационной системы и программное обеспечение работы, которое реализует интеллект РЛС.

В свою очередь аппаратура РЛС содержит следующие блоки: антенные и приемо-передающие модули; синтезатор сигналов; процессор обработки сигналов; бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВМ).

Направленное излучение и прием радиоволн обеспечивают антенные устройства модулей. Фазовая и амплитудная модуляция колебаний, а также усиление обеспечиваются передающими модулями. Приемные модули преобразовывают частоты принимаемых радиочастотных колебаний.

Синтезатор сигналов – это прибор, возбуждающий колебания определенной радиочастоты, модуляции и преобразовывающий в сигнал для модулей, передающих данные сигналы.

Процессор обработки сигналов обрабатывает принимаемые радиочастотные колебания после преобразования в приемнике по заданному алгоритму обработки, используя аналоговые и цифровые устройства.

Бортовые цифровые вычислительные системы контроля и обработки данных обеспечивают координацию режимов всех устройств РЛС и его носителя согласно поставленной задаче и обрабатывают данные с выхода сигнального процессора.

Вдобавок к вышеперечисленным составным блокам РЛС, она содержит коммутационные устройства, сеть распределения сигналов, источники питания и устройства технической диагностики.

Навигационная система обеспечивает нужной информацией модули обработки сигналов и управления.

Система индикации и управления снабжает связью операторов и РЛС, благодаря использованию механизмов отображения информации и интеллектуальных систем контроля, реализуемых с помощью ЭВМ.

Носитель РЛС поддерживает заданное положение радиолокационной системы, а также обеспечивает ее транспортировку.

Тепловая съемка проводится в разных спектрах инфракрасного диапазона. С помощью тепловизоров мы получаем тепловую характеристику поверхности исследуемого объекта. Однако в атмосфере много элементов, поглощающих инфракрасное излучение, то есть создающих помехи для данного вида съемки, таких как озон, углекислый газ и пары воды. Чтобы сделать съемку более информативной, ее производят в «окнах прозрачности» инфракрасного диапазона атмосферы с длинами волн от 3, 5–5 мкм и 8–14 мкм. Причем данный вид съемки может проводиться и в темное время суток. Необходимо обращать внимание на яркость тона. Чем он бледнее, тем холоднее исследуемая поверхность. Процессы, изучаемые с помощью вышеописанного вида съемки, должны отличаться тепловыми аномалиями, например, деятельность ледников, извержение вулканов. Благодаря съемкам в области теплового инфракрасного излучения (TIR) мы можем получить данные о рельефе морского дна, тепловую карту Земли.

Инфракрасное излучение электромагнитного спектра дифференцируется на пять диапазонов: дальний (FIR, длина волны 15–1 000 мкм), длинноволновый (LWIR, длина волны 8–15 мкм), средневолновый (MWIR, длина волны 3–8 мкм), коротковолновый (SWIR, длина волны 1,4–3 мкм) и ближний (NIR, длина волны 0,75–1,4) ИК-диапазон. Большинство научных и коммерческих спутников оснащены аппаратурой, позволяющей получать изображения в SWIR (коротковолно-

вом ИК) и VNIR (видимом и ближнем ИК) диапазонах. Видимая и ближняя часть инфракрасного спектра включает в себя длину волны от 400 до 1 100 нм. Коротковолновое инфракрасное излучение отвечает области спектра от 0,9 до 2,5 мкм. Благодаря съемке в данном диапазоне можно получить данные высокого разрешения, так как фотоны, также как и в видимом диапазоне, или поглощаются, или отражаются объектами. Естественными источниками коротковолнового инфракрасного излучения для съемки в темное время суток являются звезды и фоновое излучение (свечение) ночного неба. В данном диапазоне широко различаются цвета, которые в видимом диапазоне близки и практически неразличимы. Спутники, получающие данные в диапазоне SWIR, обладают рядом преимуществ: возможностью круглосуточной съемки, съемки в условиях плохой видимости (туман, дым и др.), высоким разрешением и чувствительностью фототонов.

В настоящее время над планетой Земля летает более 4 000 спутников, большинство из которых вышло из строя. Однако развитие компьютерных технологий позволило вывести на орбиту спутники, которые позволяют получать данные сверхвысокого разрешения в различных диапазонах электромагнитного спектра. Эти данные подвергаются автоматической обработке и коррекции с учетом искажений различного характера [29].

В настоящее время у России нет собственных радиолокационных спутников. Запуск первого спутника такого типа под названием «Обзор-Р» запланирован на третий квартал 2021 г. Следующий спутник данной серии планируют запустить не раньше 2023 г. Аппараты будут предназначены для решения довольно широкого круга задач, в которые входит картографирование территории, мониторинг и предупреждение ЧС, обнаружение потенциально опасных геологических процессов, поиск полезных ископаемых и другое. Съемка будет вестись в круглосуточном режиме.

Последний спутник серии «Электро-Л» выведен на целевую орбиту 24 декабря 2019 г. На спутниках расположено оборудование, позволяющее проводить многоспектральную съемку с разрешением от 1 до 4 км в видимом и инфракрас-

ном диапазонах. Область применения полученных данных – метеорология, анализ и изучение климата, океанология, авиация, получение геофизических данных и изучение магнитного поля и ионосферы Земли.

Серия спутников «Ресурс-П», движущихся по солнечно-синхронной орбите, оснащена гиперспектральной аппаратурой (ГСА), комплексом широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры (ШМСА-ВР, ШМСА-СР) и оптико-электронным комплексом (ГЕОТОН-Л1). Приборы позволяют проводить съемку с разрешением 70 см (ГЕОТОН-Л1), 12 м (ШМСА-ВР), 60 м (ШМСА-СР) для панхроматического канала и 3-4 м (ГЕОТОН-Л1), 24 м (ШМСА-ВР), 120 м (ШМСА-СР) в пяти спектральных каналах а также 25 м (ГСА) в спектральном диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм. Данные используются для гиперспектрального широкозахватного, высокодетального анализа Земли.

Спутники серии «Канопус-В» получают многозональные и панхроматические изображения поверхности Земли. С помощью данной серии проводится высокодетальное дистанционное зондирование Земли с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций. Оснащены панхроматической (разрешение 2,1 м) и мультиспектральной (разрешение 10–10,5 м) камерой. На космических аппаратах применен комбинированный матрично-сканерный принцип съемки.

В США интенсивно развивается тема сверхвысокого разрешения в области дистанционного зондирования Земли. Такие спутники, как WorldView (разрешение 50 см), GeoEye (разрешение 41 см) и др. оснащены современными сенсорными системами, обеспечивающими высокое качество получаемых данных.

Американский спутник Landsat 8 компании NASA был выведен на орбиту 11 февраля 2013 г. Космический аппарат высокого пространственного разрешения повторно снимает территорию один раз в 16 дней. Оснащен оптико-электронным (Operational Land Imager, OLI) и тепловым сенсором (Thermal InfraRed Sensor, TIRS). С помощью данных космического аппарата создаются топографические и тематические карты с возможностью масштаба 1 : 200 000, производится мелко-масштабная лесная инвентаризация, поиск полезных ископаемых и многое другое.

Космические аппараты семейства Sentinel выведены на орбиту в рамках программы Copernicus. Проект ЕКА (Европейского космического агентства) предусматривает наблюдение радарными спутниками, спутниками с оптико-электронной аппаратурой и спутниками для исследования океанов. Съемка спутника Sentinel-2 проводится в 13 каналах электромагнитного спектра мультиспектральным сенсором на оптико-электронном аппарате. Спутник Sentinel-3 оснащен оптико-электронной и радиолокационной аппаратурой, предназначен для наблюдения за гидросферой. Спутник Sentinel-1 является радарным.

Некоторые спутники находятся на стадии разработки как в США, так и в России. Есть данные о спутниках с высокими оптическими возможностями разрешения около 10 см, которые являются засекреченными (USA 224 2011-002A).

Данные спутниковых аппаратов представляют из себя космические снимки разного типа, формата и разрешения. В зависимости от цели использования потребитель может самостоятельно выбрать необходимое ему разрешение и масштаб объекта. Развитие технологий дистанционного зондирования происходит в области использования радиолокационных спутников, производительности съемки со спутников и увеличения разрешения. С течением времени количество спутников растет, качество данных улучшается, данные дистанционного зондирования Земли становятся более доступными.

Исходя из анализа технических систем, используемых для дистанционного зондирования Земли, можно сделать вывод, что для выявления дизъюнктивных нарушений необходимо:

- возможность получить количественные данные о рельефе (для построения ЦМР);
- отображение на снимке хорошо различаемых индикаторов и дешифровочных признаков разрывных нарушений (для выявления линеаментов).

Основными критериями выбора снимка должны являться его генерализация, разрешение, обзорность, спектральный диапазон и координаты съемки.

Для выявления разломов рекомендуется использовать инфракрасный диапазон электромагнитного спектра. Лучше всего линейные элементы выделяются по монохромному одноканальному изображению, однако для выявления дизъюнктивных дислокаций можно также использовать панхроматические и многозональные изображения, а также изображения, полученные в результате радиолокационной съемки (данные SRTM).

Данные спутника Landsat 8 отвечают всем критериям выбора снимка:

- диапазон получаемых данных от видимого до дальнего инфракрасного спектра [108];
- пространственное разрешение снимков 15 м (изображение панхроматического канала соответствует масштабу 1 : 100 000), 30 м (данные коротковолнового, видимого красного и ближнего ИК каналов соответствуют масштабу 1 : 150 000), 100 м (снимки теплового инфракрасного диапазона соответствуют масштабу 1 : 500 000), учитывая максимально возможную точность создания ортофотоплана (0,5 мм масштаба плана или карты), соответствует цели построения карты масштаба 1 : 500 000.

#### Выводы по первому разделу

В результате исследований установлено, что действующие карты разломов не всегда соответствуют действительности, а при наложении их друг на друга одни и те же разрывы показывают в разных местах, пересекаются друг с другом и не согласовываются. Все имеющиеся карты острова Сахалин были построены по геологическим данным с учетом полевых работ и геофизических данных. Однако при отображении разломов на карте не была произведена или не была описана методика картирования и оценка точности имеющихся геологических и геофизических данных и данных GPS точек, по которым строились разломы. Те исследователи, которые строили карты дизъюнктивных нарушений по данным дешифрирования, обошлись без проверки геофизическими данными, и делали это без како-



го-либо обоснованного математического алгоритма, то есть выделяли линеаменты на «глаз».

К настоящему времени уровень технических средств дистанционного зондирования Земли позволяет получить данные для выявления разломов Сахалина. Данные ЦМР и спутниковых снимков, отображающие остров Сахалин в различных областях спектрального диапазона, находятся в свободном доступе (данные спутника Landsat-8 и данные SRTM Void Filled на сайте геологической службы США и других [97–102, 149]). Эти данные имеют достаточно высокое разрешение для обеспечения детальности выявления разломов. Поэтому необходимо построить карту разломов Сахалина, адекватно изображающую действительность, с описанием методов выявления дизъюнктивных дислокаций, отраженных в технологии построения карты.

## 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

### 2.1 Анализ методов выявления разрывных нарушений

Достаточным основанием для выявления разлома считается определенное смещение форм рельефа, так как разломы проявляли свою активность в поздне-четвертичном времени, позднем плейстоцене – голоцене, что привело к деформации рельефа. Причем по изменениям рельефа можно судить и о неотектонических движениях. При выявлении разлома необходимо учитывать генетические типы пород, которые слагают смещенную форму рельефа. При исследовании землетрясений считается, что землетрясения происходят в результате смещения блоков по имеющимся разломам, а не в результате образования новых. Формы движений по разломам различны: медленное стабильное, прерывистое скольжение, и быстрые деформационные события. Считается, что в результате мелких незначительных подвижек может накапливаться значительное напряжение в результате блоковых смещений, что в будущем может привести к катастрофическим разрушениям. Но также не отрицается тот факт, что уменьшение силы сейсмических колебаний по разлому также может являться предвестником сильных землетрясений в результате накопления напряжений без последующей разрядки. В любом случае при исследовании разломов ученые постоянно сталкиваются с тектоническими движениями и их интерпретацией [64, 66, 70, 73].

Методы изучения разломов базируются, в основном, на интерпретации смещений по сдвиговым нарушениям, следовательно, изучении рельефных форм. В основном изучение активности новейших разрывов происходит по геолого-геоморфологическим материалам. При использовании этих материалов изучают молодые отложения с помощью естественных и искусственных обнажений.

Геолого-геоморфологические методы включают в себя определение и анализ направления и скорости смещений форм рельефа. Они нужны для того, чтобы определить, какой направленности преобладают смещения, вертикальной или горизонтальной, и на основе этого, а также распознавания возраста горных пород, сделать вывод о скорости подвижек по разлому. Вместе с этим необходим анализ изменения средних скоростей смещений по разлому, так как при строительстве каких-либо важных сооружений нужно будет рассчитать ожидаемые смещения за планируемый срок службы постройки. Причем измеряются смещения, которые происходили в течение длительного времени, вне зависимости от продолжительности службы инженерных сооружений.

Для того чтобы оценить современные разрывные движения, необходимо делать дополнительные расчеты, так как средняя интенсивность геологических смещений может не совпадать с современной скоростью разрывных смещений ввиду того, что в течение длительного геологического времени вероятны встречные, взаимно компенсируемые движения.

В отличие от многих регионов, на Сахалине существует довольно густая нивелирная сеть, которая пересекает часть разрывов, благодаря чему становится возможным дать более определенные сведения о современных тектонических движениях. Тем не менее, геодезические реперы иногда не распределены так, чтобы зафиксировать у активного разрыва относительные перемещения крыльев. Из-за того, что между реперами может быть сразу несколько структур, становится невозможным определить вклад каждой структуры в перемещение реперов. Это решается при построении геодинимических полигонов для исследования каждой определенной структуры [82].

На Сахалине геодинимические полигоны располагаются, в основном, в зонах Центрально-Сахалинского и Северо-Сахалинского разломов. По разрыву геоморфологических уровней можно произвести оценку амплитуды вертикальных смещений. Фиксация смещений возможна от момента завершения конкретного геоморфологического уровня до современности. Если фиксируются смещения двух

и более геологических уровней, то по разности их амплитуд можно рассчитать амплитуду смещения за более короткий этап. Благодаря этому становится возможной оценка величины и равномерности поэтапных смещений. Продолжительность каждого взятого этапа расскажет о средней скорости разрывных смещений. Для расчета скорости подвижек по разлому в первом случае берется период времени от момента формирования геологического уровня до современности, во втором – скорости движений, случившихся за каждый из отобранных этапов. Так как амплитуды оценивают лишь конечный результат относительного перемещения крыльев разлома, без учета взаимно компенсированных встречных перемещений, все рассчитываемые скорости движений являются средними суммарными, хотя и горообразование, и смещение носит импульсный характер. Скорости вертикальных движений разломов Сахалина по данным нивелирной сети ГВО Роскартографии достигают 15 мм/год. Эта скорость средняя, так как она значительно меняется в интервалах времени. Например, быстрая скорость за три года компенсируется семилетним и более временным интервалом. В пользу индивидуальности движений смежных структур на Сахалине говорят нивелирные линии, связывающие город Южно-Сахалинск и село Охотское. За одинаковый период времени с 1974 по 1977 г. по ним видно, что Сусунайский хребет поднимался более активно, чем Тунайчинская ступень. Однако при учете отметок высот рельефа сложно принимать во внимание такие геологические процессы, как денудация, эрозия и т. п. Колебания с годовой периодичностью имеют общепланетарный характер. Это может быть связано с прямой функцией воздействия на Землю гравитационного и электромагнитного полей, к коим приспосабливается форма земного шара и воды, находящиеся на нем.

Для того чтобы более подробно узнать о типе и генезисе пород разрывных нарушений, закладывают искусственные траншеи и канавы глубиной от 2 до 4 м. Такие горнопроходческие работы называются тренчингом.

Часто для выявления разломов применяют палеосейсмологические исследования с использованием структурного и формационного анализа. Это объясняется

тем, что разлом во времена своей активности менял рельеф приуроченной к нему местности, дислоцируя ее. Благодаря изучению несогласий, генезиса дислоцированных пород, можно определить, какая была протяженность изучаемой местности до образования дислокаций и возраст последних сильных землетрясений магнитудой от шести баллов, которые привели к сжатию либо растяжению и разрыву горных пород.

В дополнение к этим методам измеряют горизонтальные компоненты смещений. Их легко отследить по рекам. Считая, что водный поток формируется постоянно, трансформируясь в связи с внешними условиями, можно отследить по изменению русла характер подвижек по разлому. Также при изучении речных террас можно определить характер неотектонических движений путем составления продольных профилей. О поднятиях можно судить по врезанию рек, а об опусканиях – по накопленным аллювиальным отложениям аккумулятивных террас. Для выявления разрывных нарушений нужно взглянуть на поверхность речных террас, исследовать их перегибы, деформацию [84]. По устьям рек можно судить о характере неотектонических движений. Образование эстуариев указывает на опускание побережья. Поверхности выравнивания также могут многое рассказать о новейших тектонических движениях. По ним можно судить о воздыманиях и опусканиях структур, их приуроченности к определенным интервалам геологического времени, а также колебаниям уровня моря. Поверхности выравнивания образуются в неактивные интервалы формирования горно-складчатых сооружений. По осадочным толщам, которые в это время на них собираются, можно судить о геоморфологической истории развития орогена. Если в горах обнаруживаются равнинные участки с врезанными речными ущельями, то это говорит о присутствии пенеплена в доорогенное время, который впоследствии поднялся при быстром горообразовании. По террасам в таких высокоподнятых реках можно судить о стадиях врезания реки, интервалах поднятий.

С помощью геодезических материалов по современным движениям, которые включают в себя данные региональной нивелирной сети, результаты наблюдений

на геодинамических полигонах и первые данные космогеодезических наблюдений, можно исследовать активность современных движений земной коры, как вертикальных, так и горизонтальных. Горизонтальные движения изучались с помощью метода определения положения геодезических пунктов путем построения на местности системы смежных треугольников, в которых измеряются длины их сторон. Также для оценки подвижек по разлому используются космогеодезические измерения с целью изучения пространственных косейсмических смещений и деформаций земной поверхности и разломной тектоники в эпицентральной области землетрясений. По результатам космогеодезических измерений, выполненных при международном сотрудничестве российских институтов ИФЗ и ИМГиГ РАН, Колумбийского и Калифорнийского университетов США, были определены смещения территории острова в рамках тектоники плит. По трем пунктам сети, расположенным в стабильных областях южной, центральной и северной части Сахалина, выявлено смещение острова Сахалин относительно Евразийской плиты к западу со скоростью 3–4 мм/год и одновременно относительно Северо-Американской плиты к востоку на 3–5 мм/год.

Обнаружить разломы позволяют исследования неотектонических движений, так, для среднесрочного прогноза землетрясений используется выявление различий интенсивности в характере колебательных движений по разломам. Исследовать связь сеймотектоники с характером изменения скоростей движения по разлому можно по данным нивелирной сети. При наблюдении за данными нивелирных линий Южно-Сахалинск – Холмск отмечено аномально инверсионное опускание, которое к 1974 г. сменяется поднятием. По мнению некоторых ученых [75], это связано с землетрясением магнитудой 7 баллов, произошедшим на острове Монерон 6 сентября 1971 г. Как писал Тихонов Н. И.: «Характер высвобождения упругих деформаций в недрах юга Сахалина за 1906–1996 гг. крайне нестационарен: около 80 % от общего их количества было зарегистрировано в течение месяца с момента возникновения Монеронского землетрясения 1971 г. После данного события сейсмический режим претерпевает стадию постепенного затухания...

Спад активности привел к образованию двух зон сейсмического затишья: на западном шельфе острова и восточнее простирается Апрельского разлома... В пределах этого разлома наблюдается относительная регулярность в наступлении фаз активизации сейсмичности (средняя длительность спокойных интервалов между соседними фазами составляет  $13,73 \pm 3,05$  года). Однако количество условной упругой деформации, высвобождаемой в активные периоды, крайне неравномерно. В течение наиболее активного периода (1949–1951 гг.) выделилось около 52 % от общего их количества» [114]. Также инверсия тектонической структуры проявлялась в северной части острова Сахалин, включая полуостров Шмидта, которая движется изолированно от остальной части острова. Движения характеризовались значительным опусканием, у которых максимальная скорость была 7,5 мм/год. По наблюдениям там, где значилась максимальная скорость опускания и поднятия, там, скорее всего, обозначится эпицентр будущего сильного землетрясения. Помимо опусканий и поднятий, тектонические движения могут характеризоваться растяжением и сжатием, как при Онорском землетрясении 22.12.1984 магнитудой  $M = 4,9$ . Перед землетрясением наблюдался левосторонний сдвиг 50 мм и растяжение, перпендикулярное разлому [13]. Смещение Углегорска относительно Южно-Сахалинска на  $13 \pm 2$  мм/год в меридиональном направлении связано с Углегорским землетрясением, произошедшим 4.08.2000 с магнитудой  $M = 6,8$  [56, 146].

В предшествовании Нефтегорского землетрясения также определены аномальные неоднородные движения. Правосторонний сдвиг величиной 40–90 см наблюдался на северо-востоке, включая район Пильтунского разлома, на юго-востоке, включая район Вал-Лангрийского разлома от эпицентра землетрясения. Территория Гаромайского разлома между сдвигами характеризуется областью интенсивного сжатия до 70 см. Такое тектоническое окружение препятствовало снять копившееся на Верхне-Пильтунском разломе напряжение, смещения же Гыргыланьи-Дагинского разлома были малы и незначительны [114]. По мнению Василенко Н. Ф., «в результате землетрясения в эпицентральной

зоне в целом произошли значительные правосторонние смещения земной поверхности. В окрестностях разрушенного землетрясением пос. Нефтегорск для пунктов, расположенных в непосредственной близости от сейсморазрыва по разные стороны от него, величина правостороннего сдвига превысила 4 м. При удалении от сейсморазрыва величина векторов правосторонних смещений достаточно быстро убывает» [13, 14, 30]. Область северной части западного крыла Пильтунского разлома после землетрясения подверглась наибольшим деформациям около 1 м, однако характер вертикальных движений разлома на юге и севере существенно различался, причем интервал северной части более существенный. Серия афтершоков после землетрясения протянулась вдоль данного разрыва. На карте современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин, составленной Никитенко Ю. П. [44], отражено значительное опускание северной части острова Сахалин, включая полуостров Шмидта, хотя некоторые исследователи с этим не согласны [30], считая, что это отражение результата недостатка исходных данных.

Территория Сахалина, вытянутая меридионально между евроазиатским континентом и Охотским морем, характеризуется высокой сейсмичностью, грязевым вулканизмом, широким развитием оползневых процессов. Анализ данных, свидетельствующих о разломах, указывает на необходимость пересмотра тектонической карты разломов и прослеживания их связи с сейсмичностью данной территории.

Данные с космических спутников и аэроснимки свидетельствуют о средних, больших и грандиозных землетрясениях, поскольку геологические признаки слабой силы землетрясений редко возникают или сохраняются на поверхности. Признаки землетрясений прошлого могут варьировать от локальных деформаций поверхности земли вдоль коровых разрывов (приразломные уступы, западинные озера, боковой сдвиг долин, моноклинально изогнутые морские террасы, тектонически подпруженные озера) до признаков внезапного поднятия и опускания обширных регионов над разломом, образующим границы плит



(искривленные речные террасы, поднятые и опущенные береговые линии, затопленные прибрежные заболоченные равнины (марши) и до стратиграфических или геоморфологических эффектов сильных сейсмических колебаний или цунами вдали от сейсмогенерирующего разлома (оползни, обвалы, следы разжижения грунтов, отложения цунами).

Местоположение дислокаций может быть установлено на основании анализа баз данных, дистанционными методами, в ходе аэровизуального или полевого обследования. Более удобно использовать базы данных и дистанционные методы, так как использование цифровых источников данных, таких как дистанционные изображения, цифровые модели рельефа, данные GPS-измерений, ортотрансформированные снимки, растровые или векторные геологические, почвенные и иные карты, позволяет их обрабатывать в специальных программах, обеспечивающих анализ этих данных [7, 21, 63, 71, 72, 122, 125, 128–130, 152, 153].

Первым шагом при выделении дислокаций, разрывных нарушений является выявление и картирование зоны или области развития коровых деформаций. Трассы активных разломов часто выражены на поверхности как линейные зоны развития аномальных форм рельефа с очевидным вертикальным смещением (разрывы со смещением по падению) или зоны, где элементы рельефа смещены по горизонтали (сдвиги) [8, 124].

Материалы дистанционных съемок могут включать аэрофотоснимки, космические и радарные снимки, а также карты, построенные по ЦМР (цифровой модели рельефа). Все они могут быть как в виде отпечатков, так и в цифровой форме, причем в последнем случае – как привязанными, так и не привязанными к координатам.

При современном массовом распространении геоинформационных систем предпочтительно, чтобы основная карта была цифровой и привязанной, а не просто изображением, как, например, аэрофотоснимок. Графическая компьютерная версия карты всегда может быть получена из цифровой привязанной карты, а обратная процедура может быть неправомерна.

## 2.2 Анализ космических данных и программ их обработки, используемых для выявления дизъюнктивных дислокаций

Исходные данные дистанционного зондирования Земли претерпевают ряд изменений прежде, чем дойти до пользователей. На основных этапах подготовки изображения выполняют различного вида коррекции:

- из-за разной чувствительности датчиков выполняют радиометрическую коррекцию искажений;
- из-за вращения и неровностей геоида, колебаний высот спутника выполняют геометрическую коррекцию искажений сенсора;
- для соответствия изображения заданной геометрической проекции без использования и с использованием наземных контрольных точек;
- для соответствия изображения заданной геометрической проекции с использованием наземных контрольных точек;
- для соответствия изображения цифровой местности рельефа;
- для соответствия контрольному изображению.

Чтобы произвести вышеперечисленные виды коррекции, необходимо использовать математические вычисления.

Перед обработкой изображения проводятся его квантование и дискретизация. У изображения различают несколько уровней обработки: нулевой, низкий, средний и высокий. Обработка высшей степени протекает без участия человека с помощью математических программных алгоритмов. При обработке средней степени на изображении выделяется специфическая информация свойств объектов для дальнейшего анализа в целях идентификации объекта. Обработка низшей степени проводится с целью улучшить определенные свойства изображения, чтобы пользователю было удобнее с ним работать.

Данные спутника Landsat 8 прошли первый уровень обработки, они откалиброваны, геолокированы и скорректированы на местности. Представляют из себя набор 16-битных одноканальных изображений в формате GeoTIFF.

Выявление дизъюнктивных нарушений на базе данных дистанционного зондирования Земли может проходить на основе двух методик обработки космических снимков: визуальное и автоматическое дешифрирование.

Во время визуального дешифрирования используется два вида восприятия: логическое и зрительное. При зрительном восприятии критериями являются объем, размер, цвет и яркость. Объем есть не что иное, как стереоскопическое восприятие, то есть зрительное представление об  $n$ -мерности объектов и их положении в пространстве. Размер воспринимается лучше автоматическим алгоритмом, нежели человеческим зрением, так как «острота зрения», характеризующая способность глаза различать детали, у каждого человека различна. В норме угол, при котором видно две линии или две точки отдельно, составляет 20–45 секунд. Каждый человек воспринимает яркость индивидуально, в отличие от автоматических систем, которые регистрируют яркостные различия, не воспринимаемые человеком. Яркостные различия характеризуются разностным порогом, который равен разности яркости объекта и окружающего фона. Отношение разностного порога к яркости фона называется пороговым контрастом. Человеческий глаз воспринимает цвет в диапазоне от 0,39 до 0,70 мкм электромагнитного спектра. Но даже в этом диапазоне человек воспринимает цвета по-разному, при электрическом освещении глаз наиболее чувствителен к красному и оранжевому, а днем при естественном освещении наиболее восприимчив к желто-зеленому участку спектра. При восприятии цвета важны такие параметры, как светлость, насыщенность и тон.

Для того, чтобы дешифровщик с легкостью опознал форму и размер объекта, прибегают к помощи приборов, таких как комплексы синтезирующей аппаратуры, синтезирующие проекторы, приборы и программы для преобразования изображения, стереоскопические и увеличительные приборы. Таким образом наилучшая методика для дешифрирования разломов должна сочетать в себе методы автоматического и визуального дешифрирования. Для того, чтобы выявить необходимые параметры снимка, при исследовании применяют дешифрирование

цветного синтезированного снимка (в случае, если синтез некоторых каналов позволяет наиболее четко выделить свойства, характеризующие объект выявления), серии зональных снимков (для определения наиболее подходящего канала, характеризующего объект выявления или его косвенные признаки) или одного зонального снимка (когда канал, в котором наиболее хорошо видны признаки объекта, заранее известен).

Логическое восприятие, различное у каждого индивида, позволяет человеку видеть не набор точек, линий или цветов, а определенные образы или признаки, позволяющие идентифицировать необходимые нам объекты. При логическом мышлении устанавливаются логические связи и систематизируются объекты по косвенным признакам, задействуются методы дедукции, индукции и т. д.

Часто используется эталонное дешифрирование, связанное со сравнением изображения с определенным эталоном (образом), основанном на опыте исследования изображений. Калибровка снимков является эталонным дешифрированием. Геометрическая калибровка изображения нужна для определения размера объекта по снимку. Радиометрическая калибровка требуется для спектрометрических определений по многозональному снимку.

Калибровка бывает абсолютной (для анализа снимков разных спектров) и относительной (достаточна для исследования снимка определенного канала). Любая технологическая схема аэрокосмических исследований включает в себя процедуру получения и учета калибровочной информации. В качестве эталона при построении карт можно принять тематическую карту более крупного масштаба либо результаты полевого наблюдения. Содержание карты должно соответствовать принятым условным обозначениям.

Основные возможности и недостатки автоматизированного и визуального дешифрирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа автоматизированного и визуального метода дешифрирования

Критерии сравнения	Автоматизированное дешифрирование	Визуальное дешифрирование
Основные достоинства		
Уровень анализа изображения	Пикселы	Объекты большие, чем пикселы
Количественные оценки	Высокая точность	Являются приближенными
Многоспектральный анализ	Возможен	Затруднителен, не более двух снимков различного спектра
Анализ яркости	Яркостные различия фиксируются точно и детально	12 ступеней при черно-белом изображении
Форма объекта	Определяется программно по эталону, паре смежных снимков	Определяется визуально по паре смежных снимков
Косвенные признаки	Возможно определение при наличии соответствующих программных модулей, выявляющих каждый признак по отдельности. Часто в качестве признаков используется структура, яркость	Выделение косвенных признаков зависит от компетентности и опыта субъекта, выполняющего дешифрирование
Результаты	Объективны, зависят от заданных параметров	Субъективны

В результате можно сделать вывод о том, что автоматизированное дешифрирование дает более высокую точность (70–85 %) по сравнению с визуальным, оно более объективно учитывает все необходимые критерии. Визуальное же дешифрирование показывает лучшие результаты в объединении косвенных признаков, указывающих на наличие или характеристику исследуемого объекта, путем логического мышления и интуиции, однако это свойство зависит от опыта, компетентности исследователя и отличается субъективизмом и малой надежностью.

Следовательно, необходимо сочетать два этих метода путем первоначальной обработки и аккумуляции исходной информации и выделения косвенных признаков путем визуального дешифрирования на конечном этапе обработки.

При использовании компьютерной технологии применяется эталонирование, так как необходимо иметь информацию об абсолютной, относительной геометрической или радиометрической калибровке снимка, то есть информацию о проекции, размере, высоте, спектре и т. д. При компьютерном дешифрировании производится классификация пикселей с помощью определенных алгоритмов. Пиксели группируются по определенному признаку, в результате чего программа делает вывод, что данная группа пикселей относится к определенному объекту, и выделяет его. Правильно отсортированные пиксели составляют 70–85 % от их общего числа. Пиксели группируются по прямым и косвенным дешифровочным признакам. Косвенными признаками являются определенные индикаторы, указывающие на наличие объекта, его свойства, характеристику. Благодаря индикаторам можно выявить скрытый или труднонаблюдаемый объект, а можно подтвердить ранее выявленные объекты по прямым признакам. Косвенными признаками являются определенные геоботанические и зоогенные параметры, характеристики почв, строение гидросети, форма рельефа, отличительные черты природных территориальных комплексов, характерный рисунок фототонов. Прямые дешифровочные признаки являются свойствами объекта, непосредственно отраженными на снимке. Свойства исследуемого объекта, отображаемые на снимке, можно разделить на структурные, яркостные и геометрические. Структурные признаки включают в себя устойчивые сочетания определенной формы, представляющие рисунок изображения; крупные структурные элементы с распознаваемыми размером и формой; различия фототона, называемые текстурой изображения. В качестве фототона на изображении выступает оптическая плотность ( $D$ ), показывающая, как поток излучения падающего спектра отражается на снимке. При  $D = 0$  свет отразился полностью, и мы видим белое изображение, при  $D = 4$  свет был поглощен, то есть ослаблен в 10 000 раз, и мы видим полностью черное изображение.

При визуальном дешифрировании руководствуются шкалой тонов, где при крайнем визуальном различимом тоне шкалы  $D = 2,2$  цвет на снимке черный, при  $D = 1,7-2,1$  почти черный, при  $D = 1,2-1,6$  темно-серый, при  $D = 0,7-1,1$  серый (средняя плотность большинства изображений),  $D = 0,4-0,6$  светло-серый, при  $D = 0,2-0,3$  почти белый, при  $D < 0,1$  белый. При автоматическом дешифрировании на черно-белых снимках различается 256 и более различий фототонов, не идентифицируемых человеческим глазом. Регистрация яркостных характеристик некоторых спектральных диапазонов на снимке зависит от прозрачности атмосферы и высоты Солнца. К примеру, освещенность склонов в течение дня может различаться в 4–6 раз. Когда Солнце расположено высоко в полдень, теней на снимках меньше, и они принимают более черный цвет, а при утреннем или вечернем рассеянном свете тени увеличиваются по площади, но становятся более светлыми, и находящиеся в них объекты более различимыми. По тени можно определить пространственную форму объектов. Она бывает падающей и собственной. По высоте объекты позволяет сравнить падающая тень, представление об объеме и поверхности объектов позволяет получить их собственная тень.

Для того, чтобы улучшить яркостные характеристики снимка, его преобразуют с помощью повышения контрастности. При преобразовании снимков синтезируют цветное изображение, то есть присваивают свой цвет каждому каналу электромагнитного спектра. Также при обработке снимков проводится классификация, то есть группировка пикселей по разнообразным методам: метод максимального правдоподобия, метод параллелепипедов, метод минимального расстояния и т. п. Благодаря данным методам происходит картографическая генерализация изображения, увеличивается достоверность дешифрирования, появляется возможность конвертировать растр в вектор геоинформационной системы.

Данные со спутников предоставляются в виде изображений различных форматов. Более предпочтителен формат TIFF, HDF, так как при сохранении в другие форматы типа PNG, GIF, JPEG может быть утеряна часть информации.

Ученому необходимо уметь сочетать многообразие методов дешифрирования и разумно подходить к выбору алгоритмов и программных комплексов, позволяющих провести исследование.

При исследовании разломов по космическим снимкам необходимо выделить линейные элементы, провести линеаментный анализ [111, 141]. Обычно под линеаментами понимают слабо изогнутые или прямолинейные природные компоненты местности, показывающие на поверхности линейные неоднородности литосферы, такие как флексуры, разломы, районы перестройки геологических структур, различные зоны градиентов физических полей и т. п. [54]. Индикатором нахождения полезных ископаемых являются подводящие каналы растворов, газа и жидкостей, на что опять же нам могут указать приуроченные к ним линеаменты. Благодаря линеаментам можно судить о процессах, приводящих к неоднородности земной коры и литосферы, а также о геодинамике. Чаще всего линеаменты располагаются упорядоченно, группами. Их расположение зависит от многих факторов, таких как геологические особенности региона, время их возникновения, состава и мощности структур, в которых они образовались.

На космических снимках в виде линеаментов распознаются всевозможные дизъюнктивные нарушения. Эти элементы выделены достаточно уверенно по сравнению с другими объектами на космических снимках. Чем меньше масштаб снимка, тем более непрерывны структуры геологических смещений, чем меньше масштаб, тем более прерывисто, с расхождением на сегменты, состоящие из мелких линейных объектов, располагаются линеаменты. Мелкие линии на снимках располагаются либо друг за другом по простиранию, либо кулисообразно.

Линеаменты классифицируются по структурным типам (геологическому значению), по геологической структуре (геолинеаменты, тектонолинеаменты, металлолинеаменты, гидролинеаменты), по ширине, протяженности, пространственному расположению, по глубине залегания, по принадлежности их к определенным геофизическим полям (гравилинеаменты, термолинеаменты, сейсмолинеаменты, магнитолинеаменты), по географической среде, в которой они выделяются.



ся на картах (космолинеаменты, фотолинеаменты, батилинеаменты, тополинеаменты) [53]. По протяженности различают глобальные, трансрегиональные, региональные и локальные. По пространственному расположению выделяются прерывистые и непрерывистые. По уровню четкости изображения линейные объекты делятся на достоверные и предполагаемые. По глубинной характеристике различают линеаменты коровые (экзогенные) и мантийные (эндогенные).

Основные структурные типы линеаментов, характеризующих разрывные нарушения, делятся на четыре ранга: по их геологическому значению, размеру, выраженности в местности и способу выражения линейных разрывных структур в рельефе.

К первому рангу относятся линейные разрывные структуры, разделяющие местности с различным характером фотоизображения, к которым относятся основные геоструктурные области (Хоккайдо-Сахалинская складчатая область, Курило-Камчатская островодужная система).

Малые линейные структуры местности отображаются на материалах космической съемки среднего масштаба узкими и часто параллельными линиями в виде штриховки. Данные разрывные нарушения могут быть граничными разломами на определенном промежутке своего протяжения, дальше же они выходят в складчатые области и платформы без существенных нарушений тектонических структур вглубь. Некоторые из этих линеаментов играют роль в формировании геологической структуры фундамента, но теряют ее в структуре чехла (разломы, ограничивающие перешеек Поясок, разлом по долинам рек Таранай – Некрасовка – Ловецкая).

Второй ранг включает в себя линеаменты, разграничивающие геоструктурные регионы, к которым относятся синеклизы, складчатые структуры разного характера строения, разных простираций или разного возраста (Восточно-Сахалинские горы, Западно-Сахалинские горы, Тымь-Поронайская низменная равнина), объекты, включающие в себя более мелкие линейные структуры. Такие линеаменты могут пересекать не одну геологическую структуру.

Третий ранг состоит из разрывных нарушений, локализованных внутри основных геоструктурных районов, обуславливающих их внутреннюю структуру и практически не выходящие за их пределы (разломы, ограничивающие отдельные хребты (Камышовый, Абрамовский) или межгорные котловины (долины рек Лозовая, Лесная). Эти объекты выделяются на материалах космической съемки в виде прямых, практически непрерывных линий граничных разломов.

К четвертому рангу относятся так называемые «секущие разломы» [123], которым свойственно пересекать платформенные геоблоки, складчатые пояса и геоструктурные области полностью, выходя за их пределы (Хоккайдо-Сахалинский разлом).

Формирующиеся ассоциации линейных разрывных структур в пространстве делятся на три класса:

- 1) поля – ассоциация систем линеаментов, друг с другом сообщающихся пересечением разрывными нарушениями геологических структур;
- 2) системы – собранная комбинация субпараллельных зон линейных структур;
- 3) зоны – это незначительные по размеру, сосредоточенные на протяженной территории линейные структуры.

До конца невыясненным остается физическое происхождение дешифрируемых линеаментов. Например, в области платформ часто выделяют протяженные зоны систем линейных трещин, расположенных ортогонально и диагонально, которые их пересекают и уходят за их пределы. Некоторые ученые считают, что при выявлении трещин и разрывных нарушений путем линеаментного анализа необходимо аргументировать это с помощью геологии. В данном исследовании аргументировать линеаменты, как индикаторы разрывных нарушений, будут сейсмические данные. При обнажении горных пород лучше выражены дешифровочные признаки линеаментов, поэтому их проще распознать по космическим снимкам. Благодаря визуальному дешифрированию линейных элементов горных и речных областей объективно выделяются локальные линейные элементы автоматического

дешифрирования. На основе данных автоматизированного линеаментного анализа, а также исследования динамики линеаментных систем выявляются изменения напряженно-деформированного состояния мантии и земной коры в период подготовки землетрясений [12, 34, 35, 41, 51]. С помощью анализа линеаментов выявляются как локальные, слабо выраженные на поверхности, зоны разрывных нарушений, так и глобальные линеаменты, простирающиеся на сотни километров [36–38].

Линеаментный анализ проводится с помощью таких программ, как PyLEFA [59–61, 125], Гео-ПК [123], PlanetaMonitoring [136], Lineament [135], Alina [128–130], WinLESSA [39, 152, 153], Lindens [79]. Помимо программ, разработанных специально для дешифрирования линеаментов, существуют дополнительные программные комплексы для универсальных ГИС пакетов, такие как SAGA, QGIS, MapInfo, ArcGIS [60] и др. Использование программных пакетов очень удобно, так как при ручном дешифрировании приходится работать с большим набором данных, а вышеупомянутые программы очень упрощают процесс обработки снимков. Рассмотрим некоторые из них.

Основой для выявления линеаментов в большинстве перечисленных программ (PyLEFA [58, 60], WinLESSA [25, 38], Lineament [139], PlanetaMonitoring [143]) является вероятностный статистический подход на основе подходящих математических алгоритмов. В качестве входных данных у таких программ, как Гео-ПК, PyLEFA, LESSA, используются цифровые модели рельефа и растровые изображения. В пакете Lineament также используются геохимические и геофизические поля. Есть пакеты, использующие в качестве входных данных плановые аэрокосмические снимки (Alina) [129, 131, 132]. Данные программы производят выявление линеаментов на основе границ перепадов яркости изображения, границ однородных областей, то есть каждая из программ выделяет границы, на основе которых принимает решения, какие из этих границ относятся к линеаментам. После отображения линеаментов происходит их анализ либо в том же программном комплексе, либо с использованием широко распространенных

геоинформационных систем, таких как QGIS, ArcGIS и др. Отличительная особенность таких программ, как Гео-ПК, PlanetaMonitoring и PyLEFA на основе MATLAB заключается в возможности предварительной обработки данных и изменении возможностей программы и подбору алгоритмов под определенные цели исследования.

Для проведения данного диссертационного исследования разрывных нарушений Сахалина был выбран программный пакет PyLefa. Метод преобразования Хафа, используемый для выявления линеаментов в программе, позволяет для каждой определенной линии обозначить в пикселах максимальный допуск разрыва, представить непрерывную функцию координат дискретной совокупностью ее значений при разных наборах аргументов Хафа, и рассчитать количество пиков Хафа [140]. Параметрами, от которых будет зависеть результат, будут являться: порядок полинома линии; минимальное число линий, нужное для объединения в соединенные линеаменты, наибольшая степень удаленности между центральными точками сопоставляемых линий, отношение углового коэффициента уравнения сопоставляемых линий к свободному члену.

Основными достоинствами метода, помимо выделения линейных элементов в виде штрихов, является их объединение в протяженные линеаменты по принципу коллинеарности, возможность экспорта данных в различные форматы (Tif, shape), совместимые с пакетами основных программ геоинформационных систем, таких как ArcGIS, QGIS и др.

Все выходные данные в программе Lefa относятся к той же географической проекции, в которой были в исходном формате. В программе PyLefa на основе Matlab есть возможность построения роз-диаграмм линеаментов, расчет плотности линеаментов, определение характеристик линейных элементов. Для составления карт разломов использовалась информация о полях штрихов и о сквозных линеаментах, выделенных программой.

### 2.3 Методы и материалы исследования разрывных нарушений по данным дистанционного зондирования Земли

В основу разработанной технологии лег комплекс методов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений. В качестве входных данных для выявления линеаментов, указывающих на зоны разрывных нарушений, необходимо использовать спутниковые снимки или данные цифровой модели рельефа. В разработанной методике предлагается использовать данные SRTM Void Filled и изображения спутника Landsat 8, так как эти данные подходят для выявления линеаментов и находятся в свободном доступе на электронном портале Геологической службы США, благодаря чему разработанной технологией могут воспользоваться специалисты разных стран.

В случае использования спутниковых снимков материалы космических съемок, позволяющие обнаружить разломные зоны с учетом их методики выявления, должны быть монохромными изображениями в спектральном канале от 630 нм и выше в формате TIF с географической привязкой (данные Landsat 8). Линеаментный анализ проводился с помощью программы LEFA, которая работает с данными до 1 000 пикселей, поэтому большие изображения спутниковых снимков разрезаны на небольшие части, изменено их пространственное разрешение для удаления шумов, мешающих линеаментному анализу.

Данные были предварительно обработаны в программе ArcGis. Обработка проводилась с целью уменьшения изображения путем изменения пространственного разрешения. ArcGis является системой геоинформационных программ, позволяющей интегрировать, управлять, организовывать и анализировать географическую информацию. С помощью данной программы решается много задач в различных отраслях, к примеру, построение карт и создание на их основе приложений, пространственный анализ, создание географических баз данных, компиляция геоинформации, возможность обмена и использования картографической информации.

Изменить разрешение снимка в программе можно с помощью четырех методов: метода кубической свертки, билинейной интерполяции, алгоритма большинства, метода ближайшего соседа. Самый быстрый из этих методов – метод ближайшего соседа (nearest). Значения ячеек не изменяются. Максимальная пространственная погрешность составляет половину размера ячейки. Каждый пиксел конечного изображения опирается на значение наиболее близкого исходного пиксела. Для изменения категориальных данных, типа масок, лучше не использовать методы кубической свертки (cubic) и билинейной интерполяции (bilinear), так как значения ячеек при этом меняются.

Однако для обработки спутниковых снимков каждый из этих методов применяется в зависимости от цели исследования. Метод кубической свертки определяет конечное значение ячейки, взяв в основу гладкую кривую, проведенную через 16 ближайших центров ячеек исходного изображения. Отлично применим к непрерывным данным. Метод ближайшего соседа сильнее искажает растр, чем метод кубической свертки, однако последний более медленный, то есть требует больше времени для обработки. Метод билинейной интерполяции определяет значение выходной ячейки, используя средневзвешенное расстояние между центрами четырех ячеек исходного растра, расположенных наиболее близко к исходной ячейке. Четвертый алгоритм (majority) основан на наиболее популярных значениях в окне фильтра. Фильтр большинства обрабатывает изображение более гладко, чем метод ближайшего соседа. Новое значение ячейки при повторной выборке метода большинства ищет соответствующие ячейки  $4 \times 4$ , являющиеся ближайшими к центру ячейки выходного растра, используя большинство окрестных ячеек.

Для исследования разломов исходное изображение спутниковых снимков было преобразовано с помощью метода ближайшего соседа, так как обработка не занимала много времени, и точность этого метода позволила изменить разрешение, не меняя значения ячеек, что подходит для дальнейшего анализа изображения.

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

При обработке более 3 500 модифицированных изображений спутниковых снимков в программе Lefa в различных спектральных каналах и режимах выявлено, 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), линеаменты отражают основные разломы, подтвержденные геофизическими и геологическими данными (рисунок 6).

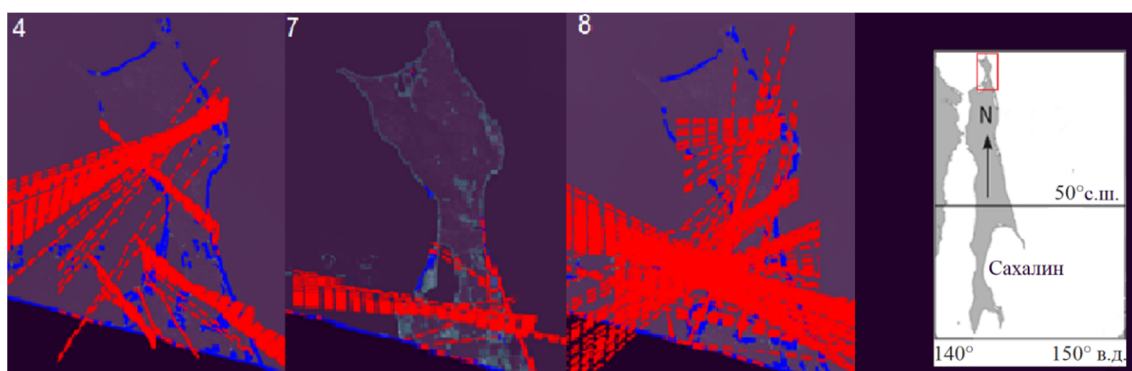


Рисунок 6 – Результаты автоматизированного дешифрирования линеаментов в красном, инфракрасном и панхроматическом каналах спутникового изображения Landsat 8

При обработке исходных данных SRTM также использовалось программное обеспечение PyLEFA с аналитическим графическим интерфейсом для обнаружения и анализа линеаментов и трещин на основе данных дистанционного зондирования. Программа позволила извлечь линеаментные особенности модели SRTM, определяемые ее параметрами и пространственным разрешением.

Серии спутниковых 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 линеаментов, 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 выделить необходимые параметры обрабатываемого изображения используется структурный элемент (B), то есть специальное изображение, описывающее область, с формой, необходимой для анализа. Эрозия обрабатываемого изображения (A) по структурному элементу (B) – это множество всех пикселей (точек z), при попадании в которые элемент (B) полностью содержится в множестве (A)

$$A \ominus B = \{z \mid (B) z \subseteq A\},$$

где  $A \in Z^2$ ,  $B \in Z^2$ .

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 [138]. Он включает в себя пять этапов. На первом этапе к изображению для его сглаживания и удаления шумов применяется алгоритм фильтрации по Гауссу. Фильтр, использующийся оператором Кэнни, близок к первой производной гауссианы,  $\sigma = 1,4$

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \cdot A.$$

В зависимости от выбора чувствительности детектора к шуму ядро ( $5 \times 5$ ) гауссического фильтра меняется. Чем меньше размер, тем выше чувствительность детектора к шуму.

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

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

$$\Theta = \arctg(G_y, G_x).$$

Градиент края определяется через значение для первой производной, которую возвращает оператор в вертикальном ( $G_y$ ) и горизонтальном ( $G_x$ ) направлении, где  $G$  рассчитывается по функции  $\arctanget$  от 2-го аргумента, обозначающей радианный угол ( $\Theta$ ) в плоскости Евклида между положительными осями  $x$  и  $y$ . При этом

угол направления края округляется до одного из четырех полученных углов, а направление края рассчитывается по определенному значению угла в каждой цветовой области изображения.

На третьем этапе используется метод истончения края. Изображению необходимо избавиться от ложных ответов на обнаружения края, для этого применяются градиенты нижней границы пересечения или величины порога. На данном этапе сравниваются пикселы края с пикселями направлений градиента, к примеру пиксел в направлении  $x$  сравнивается с пикселем правее и левее по горизонтальной оси. После анализа некоторые значения пикселов подавляются, а некоторые сохраняются.

Четвертый этап алгоритма Кэнни сводится к применению двойного порога, который фильтрует оставшиеся пикселы, вызванные изменением цвета и шумом, чтобы более точно определить потенциальные границы изображения. При выборе низких и высоких пороговых значений отбрасываются пикселы со слабым значением градиента и сохраняются с высоким.

Пятый этап завершает обнаружение краев, подавляя все другие края, являющиеся слабыми и не имеющие отношения к границам.

Дальнейшая цифровая обработка изображения, проведенная посредством преобразований Хафа, позволила выделить линейные элементы рельефа в качестве коллинеарных линий. В результате преобразования Хафа изображение переходит в параметрическое пространство, где простейшие геометрические фигуры (линии) задаются набором параметров. К изображению в виде параметров применяется процедура голосования, что позволяет правильно группировать и разделять граничные точки.

Известное уравнение прямой  $y = kx + b$  преобразование Хафа представляет в виде параметров данной прямой, углового коэффициента  $k$  и точки пересечения с осью ординат  $b$  [140]. В результате этого прямую можно представить в пространстве параметров в виде точки  $x$  с координатами  $k$  и  $b$ . Однако параметр  $k$  может иметь бесконечные значения, соответствующие параллельным оси ординат

прямым. Тогда параметры  $k$  и  $b$  будут определяться радиус-вектором ближайшей к началу координат точки на прямой ( $r$ ) и углом между осью абсцисс и этим вектором ( $\theta$ ). Таким образом, прямая будет описана выражением

$$y = \left( \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) x + \left( \frac{r}{\sin \theta} \right)$$

или

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta.$$

Тогда каждую прямую на исходном изображении в плоскости абсцисс и ординат можно связать с плоскостью параметров пространства Хафа, где координатами прямой будут параметры, определяемые  $r$  и  $\theta$ , при условии, что

$$r \geq 0$$

и

$$\theta \in [0, 2\pi].$$

Тогда прямые, проходящие через точку с координатами  $x_0; y_0$ , будут соответствовать уравнению

$$r[\theta] = x_0 \cdot \cos \theta + y_0 \cdot \sin \theta.$$

В пространстве Хафа это уравнение соответствует синусоидальной линии, которая является уникальной для точки с координатами  $x_0; y_0$ , и однозначно ее определяет. Синусоидальные линии, соответствующие точкам одной прямой, накладываются друг на друга в точках, где они пересекаются, по этому признаку и идет выявление линеаментов.

Подобно структурному элементу, описанному в методе эрозии, преобразование Хафа использует массив (при двух параметрах двумерный), называемый ак-

кумулятором. Результатом преобразования Хафа является матрица, подобная аккумулятору, которая включает два параметра: квантованное расстояние  $r$  и квантованный угол  $\theta$ . Значение элементов матрицы равно сумме пикселей (точек), находящихся на строке, определяемой параметрами  $\theta$  и  $r$ . В результате самое высокое значение элемента матрицы указывает прямую линию, которая наиболее сильно выделяется на исходном изображении.

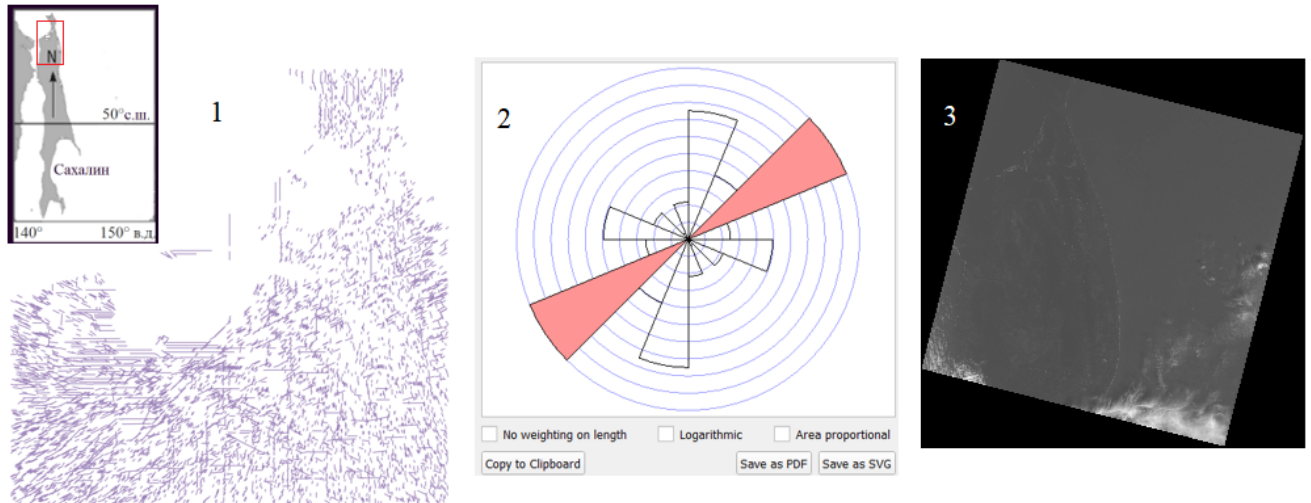
Объединение элементов в соединенные коллинеарные линии происходило в результате анализа матрицы близости для коэффициентов уравнений обнаруженных линий. Если в строках линий есть одинаковые или близкие коэффициенты, их можно рассматривать как коллинеарные.

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 определения геометрии направления разломов, построения роз-диаграмм и построения карты разломов Сахалина.

Для выявления закономерностей пространственного распределения линейных структур строят роз-диаграммы, которые учитывают длину, направления линеаментов и их плотность [12, 69, 147, 148].

Статистическая обработка линеаментов Сахалина проводилась с помощью программы QGIS с использованием плагина QGIS Line Direction Histogram (рисунок 7). Данный плагин на основе преобладающих направлений линий ГИС создает роз-диаграмму, которая используется для исследования распределения направлений линейных сегментов набора векторных данных линий или полигона [147]. Суммарная длина сегментов линии для каждого интервала направления определяет форму гистограммы. В качестве альтернативы можно использовать количество сегментов (без учета длины сегмента линии).

В программе также есть функция, с помощью которой можно указать наиболее часто встречающуюся среднюю направленность линеаментов, выделив ее определенным цветом.



1 – линеаменты, выделенные на Северо-Сахалинской равнине; 2 – роза-диаграмма выделенных линеаментов; 3 – спутниковый снимок Северо-Сахалинской равнины

Рисунок 7 – Статистическая обработка линеаментов

#### 2.4 Разработка технологии дешифрирования с целью моделирования линий разрывных нарушений в пространстве геоинформационной системы

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. Разработанная технология выявления дизъюнктивных дислокаций включает в себя детальный анализ каждого канала изображения снимка, в котором применяются различные методы обработки. Изображения частей острова Сахалин со спутника Landsat-8 в различных каналах были подвергнуты оценке методами Кэнни и морфологической эрозии в трех вариантах чувствительности к шуму. Север Сахалина был исследован во всех 11 каналах электромагнитного спектра, регистрируемых вышеописанным спутником. Снимок каждого канала был разделен на фрагменты, подходящие для исследования с помощью линеаментного анализа. Разрешения снимков каждого канала соответство-

вали 30, 60, 90, 120 м, некоторые каналы рассматривались также с учетом разрешения 150 и 180 м. На одноканальное изображение со спутника приходилось 48 модифицированных изображений линеаментов, анализируемых в комплексе с сейсмическими данными. Таким образом, исследование одного спутникового изображения в 11 каналах требовало анализа 528 модифицированных изображений. На одно изображение SRTM приходилось 12 модифицированных изображений линеаментов. Итого на анализ каждого участка острова Сахалин приходилось около 540 модифицированных изображений. На основе разработанной технологии была составлена технологическая схема построения карты разломов, которая состоит из четырех основных этапов.

На подготовительном этапе выгрузки исходных данных должен быть выполнен анализ исходных материалов, включающий в себя соответствие информации географии исследования, сведения или оценку точности исходных данных, а также соответствие разрешения исходных данных заданным параметрам исследования. На данном этапе следует решить, какую информацию (спутниковые данные и данные SRTM) необходимо использовать для построения.

При выборе спутниковых снимков в качестве исходных данных необходим этап предварительной обработки, включающий в себя:

- выбор файла с выбранным каналом для исследования;
- загрузка изображения в программу геоинформационной системы (ГИС), предварительно перед загрузкой данных нужно создать новый проект в ГИС, создать слой и выбрать систему координат;
- проверка соответствия размера изображения выбранной методике исследования, при несоответствии необходимо обрезать изображение путем его редактирования в системе ГИС с помощью инструмента обработки растра;
- в случае, если снимок имеет высокое разрешение, а для дальнейшего анализа нужно более низкое разрешение, его меняют, предварительно выбрав метод, наиболее подходящий для исследования (желательно исследовать снимок в шести различных разрешениях, указанных в схеме);

– после необходимых преобразований файла спутникового снимка его сохраняют в формате GeoTIFF для дальнейшей обработки.

При выборе данных SRTM предыдущий этап можно пропустить и сразу открыть исходные данные для обработки методами линеаментного анализа.

Автоматизированный линеаментный анализ включает в себя несколько этапов обработки исходных данных.

1 Определение границ изображений, включающий в себя выбор методов определения границ: по алгоритму Кэнни на основе градиента (Canny), по алгоритму бинарно-морфологической эрозии (Erosion), а также выбор из трех режимов чувствительности для каждого метода.

2 Выделение линеаментов на основании преобразования Хафа по ранее выделенным границам и сохранение полученных данных в формат шейп-файла, содержащий данные о географической проекции и обработке, который может быть открыт в любой геоинформационной системе.

3 Выделение соединенных линий по принципу коллинеарности на основе выделенных штрихов-линеаментов и сохранение полученных данных в формат шейп-файла с географической привязкой, который может использоваться в любой системе ГИС.

После обработки и выявления линеаментов наступает этап проектирования карты, включающий в себя вход в ГИС-программу, создание проекта, добавление топоосновы, слоев шейп-файлов, исходных данных, геологических карт и геофизических данных для визуального анализа и сопоставления выявленных разломов по методу автоматизированного выделения линеаментов с разломами, ранее известными по геофизическим данным и геологическим картам.

После определения и анализа разломов наступает этап составления карты. На данном этапе происходит создание макета карты, в основу которой входят данные, проанализированные и подтвержденные исследователем. Далее добавляется географическая сетка координат и масштабная линейка с учетом географической проекции, происходит формирование условных знаков и выгружается карта в не-

обходимом масштабе. Обобщенная схема дешифрирования с целью обнаружения разломов приведена на рисунке 8.

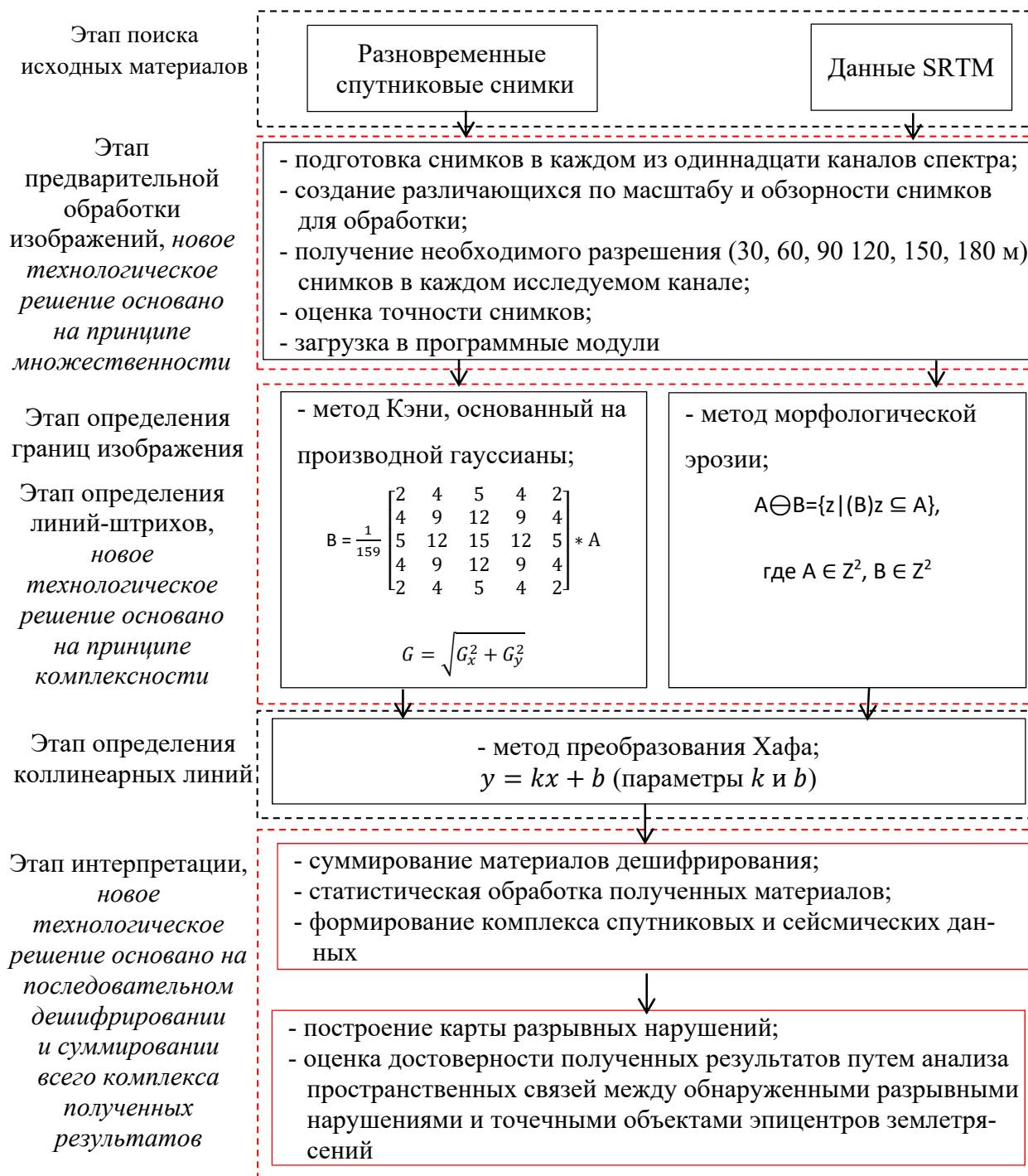


Рисунок 8 – Технология дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений с использованием геофизических данных



Данная технологическая схема является единственной в своем роде для построения карт разрывных нарушений на основе данных автоматизированного линеаментного анализа по материалам космических съемок. Ранее разработанные технологии построения тематических карт разломов основаны на полевых исследованиях, геофизических материалах и данных аэросъемок. Существует тенденция к большему использованию исходных данных дистанционного зондирования Земли, однако технология, содержащая автоматизированную методику линеаментного анализа, основанная на принципах «комплексности», «множественности», «последовательного дешифрирования», представляется впервые. Для построения карты разрывных нарушений выполнялась оценка точности исходных данных, что обеспечивает отображение точной географической информации на карте, которая может служить исходной основой в различных программах геоинформационных систем для дальнейшего исследования в области геологии и строительства.

#### Выводы по второму разделу

На основании выполненных исследований сформулированы и разработаны:

1) усовершенствованная технология дешифрирования для составления карт разрывных нарушений:

– в основу технологии лег принцип «множественности», «комплексности», последовательного дешифрирования и анализ совокупности геофизических сейсмических данных и данных результатов дешифрирования;

– для обеспечения заданной детальности разрешение исходных данных должно удовлетворять масштабу оформляемой карты, а для точного построения разрешение исходных данных должно быть выше по точности масштаба построения тематической карты;

– для построения карты масштаба 1 : 500 000 использовались материалы с разрешением 30 м, что могло бы быть использовано для построения более крупномасштабной карты.

Это подчеркивает точность результатов исследования;

2) технологическая схема построения карт новейших активных разломов земной коры на основе методики выявления разломов земной коры, которая состоит из семи основных этапов на основе исходных данных SRTM Void Filled и восьми этапов при обработке космического снимка Landsat 8, включающая в себя выгрузку исходных данных, предварительную обработку (для спутниковых снимков), обработку изображения в программе PyLefa (состоящую из определения границ изображения, выделения линеаментов и коллинеарных линий), этапы проектирования и составления карты (создание макета карты), а также результат в виде выгрузки карты в изображение с необходимым разрешением и масштабом. Каждый из вышеперечисленных этапов включает в себя от двух до семи операций. Данная технология позволит пользователю построить тематическую карту разломов для любой территории, выполнив совместную обработку материалов автоматического линеаментного анализа и геофизических данных оцениваемой территории.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

#### 3.1 Общие положения методики исследований

В диссертации приводятся результаты исследования разломных зон земной коры в пределах острова Сахалин с помощью линеаментного анализа модели SRTM. Разломы выделялись в целях повышения информативности карт геологического содержания. В качестве входных использовались данные SRTM. Анализ выполнялся с помощью функционала программного комплекса LEFA. Использование данных SRTM позволило произвести оценку дизъюнктивных нарушений на территории севера Сахалина. Анализ изображений поверхности равнины производился с использованием операции бинарно-морфологической эрозии или с помощью математических алгоритмов Кени с дальнейшей цифровой обработкой посредством преобразований Хафа. В работе выявлено положение линейных элементов на разных участках равнины. Отличной проверкой качества выполненных определений послужили результаты проведенных ранее исследований восточной части Северо-Сахалинской равнины, которые производились в связи с освоением месторождений углеводородов и после сильного Невтегорского землетрясения [1, 13, 30, 51, 62, 67, 78, 121, 134]. Полученные данные послужили основой для составления карты дизъюнктивных нарушений севера острова Сахалин масштаба 1 : 500 000. В зависимости от масштаба, пространственного разрешения и уровня генерализации изображения можно выделить дизъюнктивные нарушения разной протяженности (трансрегиональные, региональные, субрегиональные, локальные) и рангов (1-й ранг – от нескольких до сотни метров, 2-й ранг – от сотни метров до километра, 3-й ранг – от 1 км до 35 км, 4-й ранг – от 35 до 100 км, 5-й ранг – более 100 км). Анализ модели SRTM с помощью инструментария LEFA позволил вы-

явить зоны, где расположены разрывные нарушения земной коры. В результате проведенного анализа выявлены Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент), Пильтунский, Гаромайский, Вал-Лангрийский, Гыргыланьи-Дагинский, Южно-Байкальский, Удыльский и множество других разломов менее 2-го ранга. Основные результаты работы будут полезны при выборе мест для строительства объектов хозяйственного и промышленного назначения, а также при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых.

### 3.2 Оценка точности исходных данных, используемых для построения карты разломов Сахалина

В качестве исходных данных использовались снимки со спутника Landsat 8 компании Orbital Sciences Corporation и данные SRTM Void Filled. Оба вида исходных данных находятся в свободном доступе на сайте Геологической службы США [100, 149]. Данные SRTM получены благодаря радарной топографической съемке (Shuttle Radar Topography Mission), которая была выполнена в рамках международного проекта по сбору радиолокационных данных в период с 11 по 22 февраля 2000 г. Национальным агентством геопространственной разведки и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (NASA) с помощью космического шаттла Endeavour, совершившего 176 витков. Для выполнения данной миссии на космическом корабле были установлены две радиолокационные антенны SIR-C/X-SAR. Spaceborne Imaging Radar-C был соединен с построенным в Германии X-Band Synthetic Aperture Radar. В результате различий между двумя сигналами разных антенн с помощью метода радарной интерферометрии было собрано большое количество информации о рельефе, высотах поверхности Земли. Данные SRTM Void Filled были получены в результате обработки и редактирования первых данных SRTM. В более новых данных были добавлены области отсутствующих или некачественных данных с по-

мощью алгоритмов интерполяции в сочетании с другими источниками о высоте поверхности. Разрешение данных SRTM Void Filled составляет от 1 до 3 угловых секунды, что соответствует разрешению от 30 до 90 м. Разрешение по высоте составляет 1 м. Пример названия скачанных данных – SRTM3N50E142V2. По названию данных SRTM можно определить, сколько угловых секунд в пикселе (SRTM3), координаты съемки левого нижнего угла (N50E142), а также версию обработки данных (V2). Результаты миссии были представлены в виде данных о высотном положении точек земной поверхности относительно эллипсоида WGS84 в проекции EPSG 4326.

Данные Landsat 8 получены с помощью съемочной аппаратуры OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor), разрешение на местности которых от 15 до 100 м. Ширина полосы съемки космического аппарата 185 км, высота орбиты 705 км, наклонение составляет  $98,2^\circ$ , период обращения 98,9 минут, периодичность наблюдения одного и того же места 16 суток, количество витков в сутки 14,6. Пример названия скачанных данных LC08\_L1TP\_107028\_20200531\_20200608\_01\_T1\_B10. По номенклатуре данных можно определить, данные с какой аппаратуры использовались на снимке местности, «LC» обозначает, что данные «L» – Landsat, «C» – комбинированные с использованием двух сенсоров OLI и TIRS («O» обозначало бы OLI; «T» – TIRS, «08» указывает, что данные с Landsat 8, «L1TP» (Landsat Level-1 data product) означает, что снимок прошел геометрическую и радиометрическую коррекцию («L1GS» – Systematic, «L1GT» – Systematic Terrain). Цифры «107» показывают номер столбца или номер участка с запада на восток, а цифры «028» – номер строки или номер участка с севера на юг в глобальной системе индексации данных Worldwide Reference System, то есть эти шесть цифр указывают на тот участок поверхности Земли, который изображен на снимке. Числа «20200531» обозначают год (2020), месяц (05) и дату (31) съемки. Числа «20200608» указывают на год (2020), месяц (06) и дату (08) обработки снимка. Следующие две цифры «01» показывают номер коллекции, «T1» указывает на категорию коллекции

(«T2» – Tier 2, «T1» – Tier 1, «RT» – Real-Time). Последние цифры «B10» указывают, канал какого электромагнитного спектра отражен на изображении. Данные аппарата Landsat 8 были скачаны в 11 каналах электромагнитного спектра (таблица 3) [108].

Таблица 3 – Диапазоны длин волн съемочной аппаратуры спутника Landsat 8

Диапазоны оптико-электронного сенсора OLI (Operational Land Imager)			
Номер канала	Название канала	Длины волн (в микрометрах)	Пространственное разрешение (в метрах)
Канал 1	Побережья и аэрозоли, темно-синий видимый канал (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0,433–0,453	30 м
Канал 2	Синий (Blue)	0,448–0,515	30 м
Канал 3	Зеленый (Green)	0,527–0,595	30 м
Канал 4	Красный (Red)	0,630–0,677	30 м
Канал 5	Ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0,845–0,884	30 м
Канал 6	Коротковолновый ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 1)	1,555–1,660	30 м
Канал 7	Коротковолновый ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	2,090–2,300	30 м
Канал 8	Панхроматический (Panchromatic, PAN)	0,500–0,680	15 м
Канал 9	Коротковолновый, отражающий перистые облака (Cirrus, SWIR)	1,360–1,390	30 м
Диапазоны теплового инфракрасного сенсора TIRS (Thermal InfraRed Sensor)			
Канал 10	Длинноволновый ИК (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10,30–11,30	100 м
Канал 11	Длинноволновый ИК (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11,30–12,50	100 м

Исходные данные Landsat 8 и SRTM были скачаны в формате GeoTIFF (Georeferenced Tagged Image File Format), то есть в файле формата TIFF со встроенной географической информацией (географической привязкой). Скачиваемые данные Landsat 8 помимо 11 файлов с каналами изображений содержат три файла (MTL.txt – файл метаданных Landsat 8 Level-1, ANG.txt – файл, BQA.TIF – файл с данными, отражающими качество пикселя, его информационную нагрузку, его поверхностные, атмосферные и сенсорные характеристики) [76]. Первый уровень обработки BQA (Уровень-1) включает в себя оценку точности позиционирования (Band File), влияние отражения электромагнитных волн от поверхности Земли (LaSRC), данные об отражательной поверхности, генерирующиеся в системе адаптивной обработки сигналов LEDAPS (Landsat Ecosystem Distortance Adaptive Processing System), спектральные индексы (SI), отражение поверхности (SR), рассеивающая способность атмосферы (TOA). В результате обработки данные Landsat имеют следующие характеристики:

- формат GeoTIFF (Geographic Tagged Image File Format), позволяющий определить множество тегов, необходимых для описания картографической проекции. Данный формат позволяет позиционировать изображение в правильной геометрии и расположении на экране геоинформационной системы;
- данные прошли дискретизацию с кубической сверткой, то есть обработаны методом бикубической интерполяции. При обработке данным методом вокруг точки исходного изображения вычисляется среднее взвешенное на участке  $4 \times 4$  пиксела по 16 ближайшим элементам изображения;
- ориентация снимка на север (вверх) (MAP);
- система координат данных: WGS 84;
- проекция: UTM, также полярная стереографическая для Антарктиды;
- круговое вероятное отклонение для OLI составляет 12 м, это означает, что точность позиционирования составляет 90 % в радиусе окружности 12 м;
- круговое вероятное отклонение для TIRS составляет 41 м, значит 90 % измерений будут точнее 41 м относительно среднего;

- качество цветопередачи данных 16-бит. Пиксел содержит в себе информацию о 65 536 цветах, где объем памяти, используемый для хранения одного пиксела растровой графики, равен 16-бит;
- данные прошли процедуру атмосферной коррекции.

### 3.3 Построение карт дизъюнктивных нарушений острова Сахалин

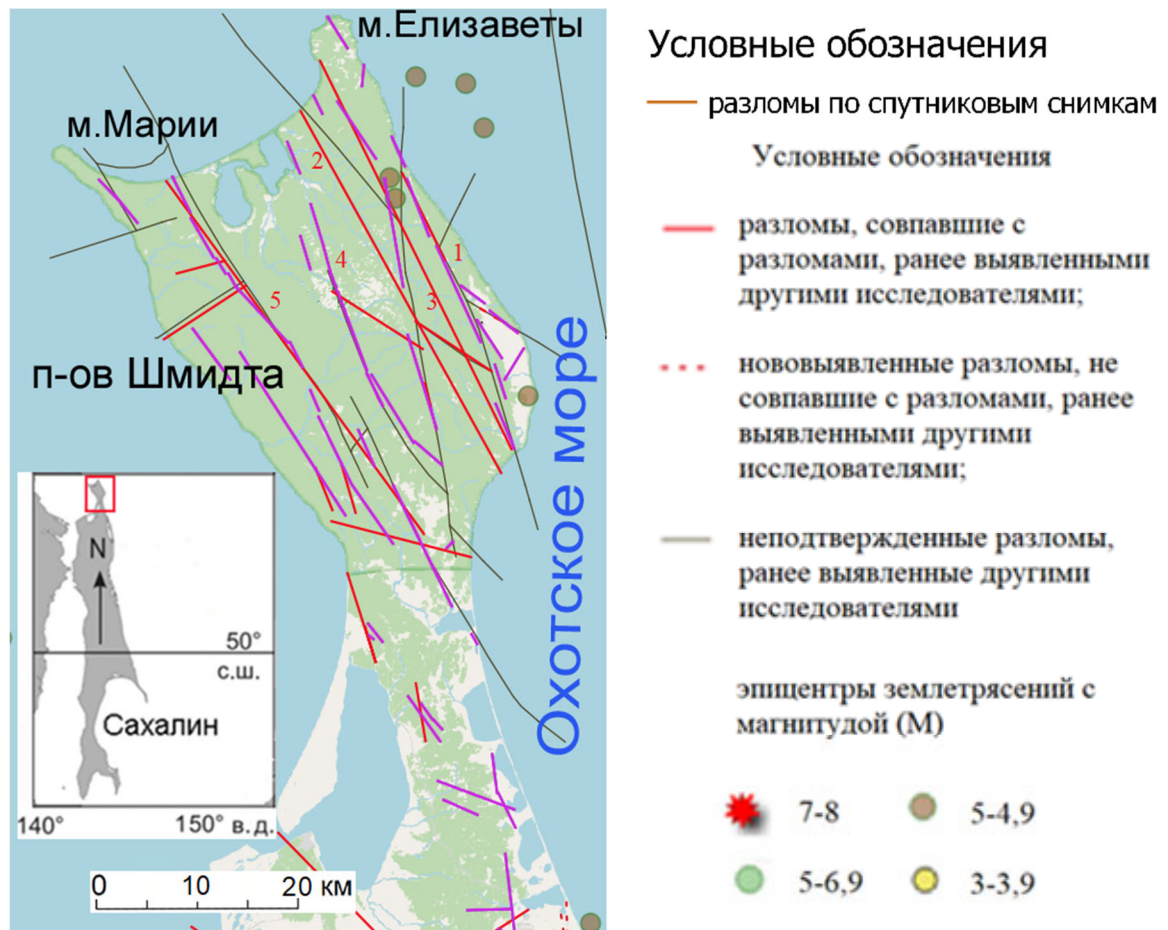
#### 3.3.1 Построение карты дизъюнктивных нарушений севера Сахалина

На основе анализа модифицированных изображений севера Сахалина в шести различных режимах программы LEFA были выявлены штрихи-линеаменты и соединенные линеаменты, отражающие области повышенной трещиноватости. Трещиноватость более явно выявляется на изображениях, обработанных в режимах «canny\_manu» и «erosion\_manu», нежели в других режимах. При средней и малой чувствительности линий на снимках меньше линеаментов и шумов, что позволяет уточнить локализацию и увеличить вероятность правильного расположения выявленных разрывных нарушений на карте. Линеаменты, выявленные в режиме большой чувствительности линий, показывают не только разрывные нарушения, но и области складчатости и трещин. Повышенное напряженное состояние земной коры в виде областей повышенной трещиноватости характерно также для разломов, не выраженных на поверхности, поэтому штрихи-линеаменты, отражающие данные области, являются признаками, по которым можно выявить дизъюнктивные нарушения [54].

В результате применения разработанной технологии дешифрирования, выполнена оценка достоверности полученных математически определенных моделей. Критериями достоверности являлись данные о разломах, подтвержденных ранее другими исследователями, а также близость разломов от эпицентров землетрясений.



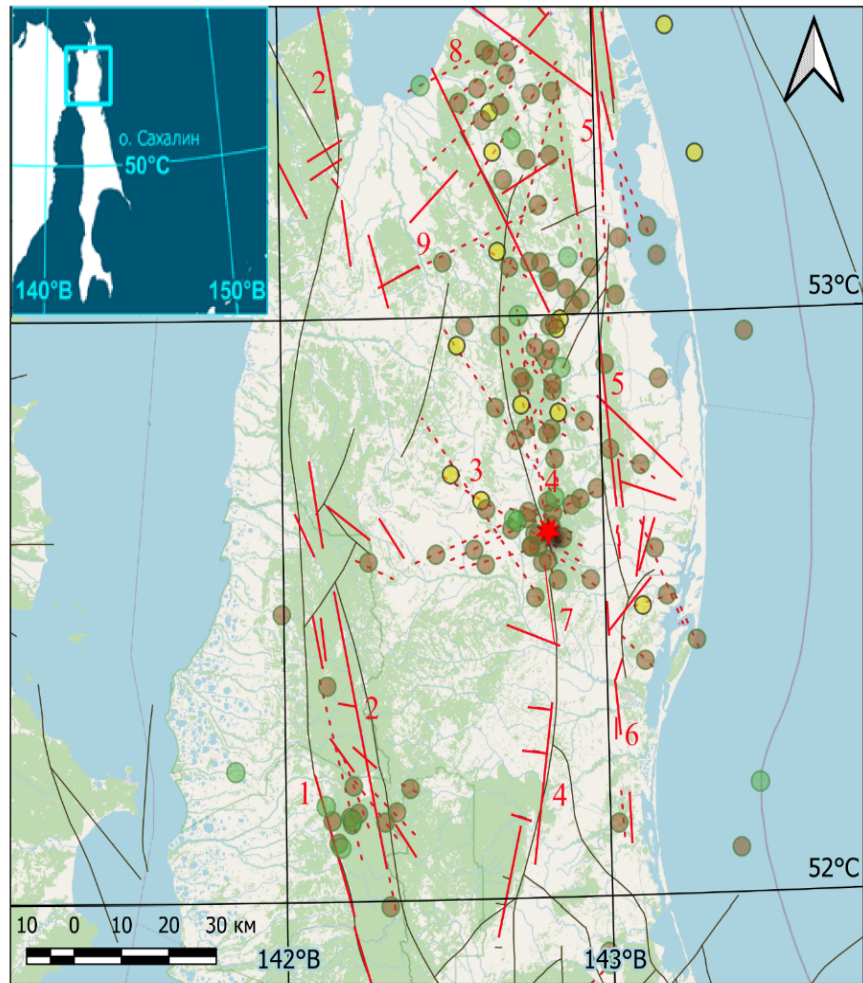
Составленные карты новейших дизъюнктивных нарушений севера Сахалина представлены ниже (рисунки 9, 10).



Региональные разломы: 1 – Восточно-Сахалинский; 2 – Хейтонский, 3 – Лонгрийский;  
4 – Хоккайдо-Сахалинский; 5 – Северо-Сахалинский

Рисунок 9 – Созданная карта региональных разломов полуострова Шмидта с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 3,0$  (1957–2021 гг.)

При дешифрировании полуострова Шмидта в различных режимах программы LEFA по данным спутниковых снимков и данным SRTM четко выделяется Восточно-Сахалинский литосферный надрегиональный разлом, ранее выделяемый такими учеными, как Кожурин А. И., Ломтев В. Л., Харахинов В. В. [14, 49, 67, 68, 121, 151]. Рождественский В. С. также выделял активную разломную тектонику на полуострове Шмидта [89, 92, 94].



### Условные обозначения

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

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

Рисунок 10 – Созданная карта региональных разломов Северо-Сахалинской равнины с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 3,0$  (1906–2021 гг.)

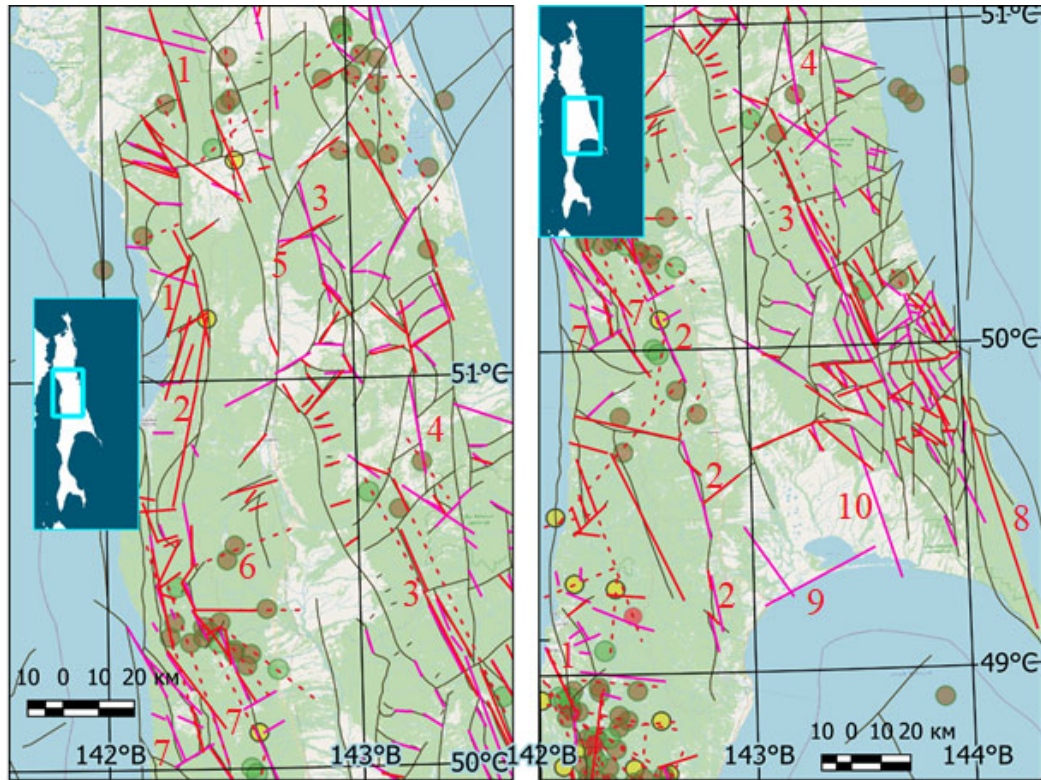
Среди выделяемых им разломов – Хейтонский и Лонгрийский правосдвиговые разломы, которые также четко видно на изображении, обработанном с помощью описанной в работе методики.

Хоккайдо-Сахалинский разлом ранее выделялся Харахиновым В. В., Ломтевым В. Л. и др. Северо-Сахалинский разлом описан в работах Ломтева В. Л.

На изображениях, отражающих область Северо-Сахалинской равнины, четко выделились зоны Хоккайдо-Сахалинского литосферного надрегионального разлома и его Верхне-Пильтунского сегмента, Центрально-Сахалинского литосферного разлома, Западно-Сахалинского, Вал-Лангрийского, Пильтунского, Гаромайского, Гыргыланьи-Дагинского, Южно-Байкальского, Удыльского разломов, подтвержденные такими исследователями, как Харахинов В. В. и др. Пильтунский разлом отображается на модифицированных изображениях, обработанных в LEFA, в сопровождении штрихов-линеаментов диагонального простираения, которые свидетельствуют о зонах скалывания [45].

### 3.3.2 Построение карты дизъюнктивных нарушений центральной части Сахалина

Карта новейших дизъюнктивных нарушений центральной части Сахалина была построена по ранее разработанной технологии (рисунок 11). Разрывные нарушения были выявлены с помощью автоматизированного линеаментного анализа. Для более точной оценки территории использовались материалы, выявленные как в режиме малой, средней, так и в режиме большой чувствительности линий. Штрихи-линеаменты, указывающие на область повышенной трещиноватости, проанализированы, и по дешифровочным признакам определены зоны разломов на основе данных соединенных линеаментов, которые, в свою очередь, показывают, вероятностное местоположение разрывных нарушений.



### Условные обозначения

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

Региональные разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Набильский; 4 – Хоккайдо-Сахалинский; 5 – Тымский; 6 – Аукан-Лунский; 7 – Совгаванский; 8 – Северо-Сахалинский; 9 – Ламанонский, 10 – Невский

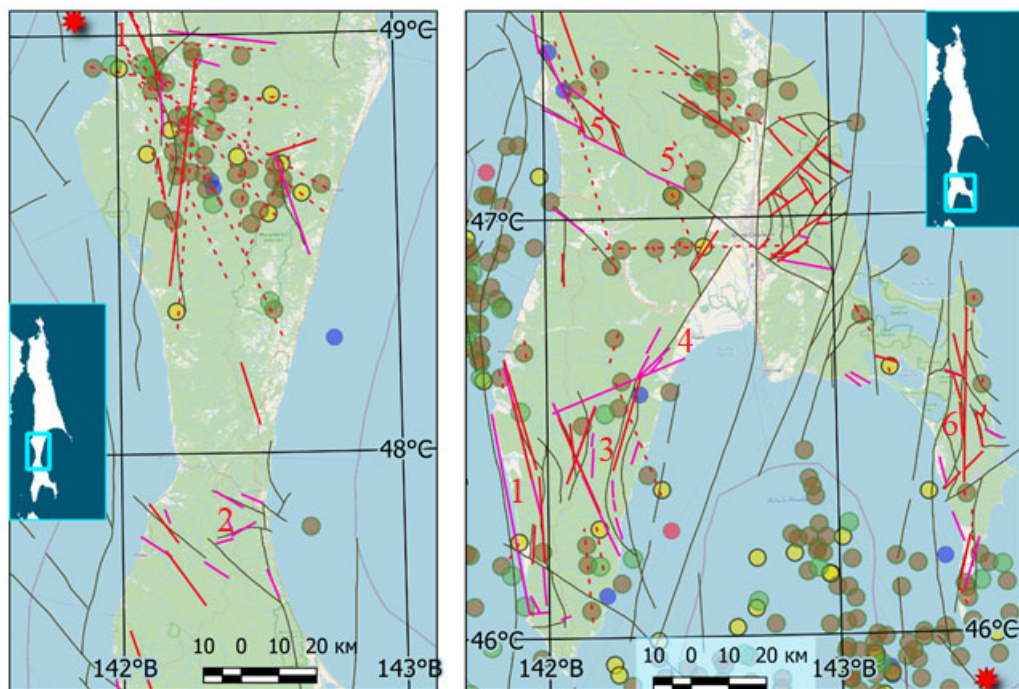
Рисунок 11 – Созданная карта региональных разломов Центральной части Сахалина с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 3,0$  (1906–2021 гг.)

При картировании центральной части Сахалина по разработанной технологии четко выделяется Западно-Сахалинский литосферный надрегиональный разлом, ранее выделяемый такими учеными, как Патрикеев В. Н., Ломтев В. Л., Харахинов В. В., область Центрально-Сахалинского литосферного разлома, Хоккайдо-Сахалинский разлом, ранее выделяемый Харахиновым В. В., Ломтевым В. Л.

и другими, Северо-Сахалинский разлом, описанный в работах Ломтева В. Л., а также Набильский, Ламанонский, Невский, Тымский, Аукан-Лунский, Совгаванский, выделяемые Харахиновым В. В. на основе его данных.

### 3.3.3 Построение карты дизъюнктивных нарушений юга Сахалина

Карта новейших дизъюнктивных нарушений юга Сахалина и ее оценка точности приведены на рисунке 12.



#### Условные обозначения

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

Региональные разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Слепиковский; 3 – Центрально-Сахалинский; 4 – Мордвиновский; 5 – Лютогский; 6 – Хоккайдо-Сахалинский

Рисунок 12 – Созданная карта региональных разломов Южной части Сахалина с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 3,0$  (1906–2021 гг.)

При построении карты южной части Сахалина четко выделяются Западно-Сахалинский и Хоккайдо-Сахалинский литосферные разломы, Центрально-Сахалинский надрегиональный разлом, характеризующийся взбросо-надвидами, Лютогский коровый разлом, подтвержденный геофизическими данными, Мордвиновский и Слепиковский скрытые литосферные надрегиональные разломы и ряд нововыявленных зон дислокаций.

### 3.4 Оценка достоверности полученных результатов экспериментальных исследований острова Сахалин

Большинство дизъюнктивных нарушений совпадает с разрывами на геологической карте. Однако выявлен ряд новых разломных зон, которые обозначены на картах пунктирной линией. Причем как ранее выявленные, так и новые разрывные нарушения проходят в местах повышенной сейсмической активности. Землетрясения, которые происходили в течение последних 100 лет, происходили в зонах, приуроченных к выделенным разломам. Таким образом, по ранее выделяемым критериям карты дизъюнктивных дислокаций получились достаточно точными. Данные о режимах выявления и об ученых, исследовавших выявленные дислокации, представлены в сводной таблице о всех ранее выявленных разломах (таблица 4).

Таблица 4 – 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 [121] Кожурин, Ким, 2010 Ломтев, Жердева, 2015 [67]
Невский	canny_small	Харахинов и др., 1984 [121]
Хейтонский	canny_small, medium, many, erosion_small, medium	Рождественский, 1982 [94] Кожурин, Ким, 2010 Лободенко, 2010 [66]

Окончание таблицы 4

Название разлома	Режим выделения	Другие источники информации о разломе
Тымский	canny_small, medium, erosion_small, medium	Харахинов и др., 1984 [121]
Лонгрийский	canny_small, medium	Рождественский, 1982 [94] Кожурин, Ким, 2010 Лободенко, 2010 [66]
Аукан-Лунский	canny_medium, erosion_many	Харахинов и др., 1984 [121]
Северо-Сахалинский	erosion_small	Ломтев, Жердева, 2015 [67] Лободенко, 2010 [66]
Совгаванский	canny_small	Харахинов и др., 1984 [121]
Западно-Сахалинский	erosion_medium canny_small	Харахинов и др., 1984 [121] Ломтев, Жердева, 2015 [67] Ломтев, Патрикеев, 2016 [68]
Лютогский	canny_small, medium	Харахинов и др., 1984 [121]
Центрально-Сахалинский	erosion_small, medium, many canny_small, medium	Харахинов и др., 1984 [121] Ломтев, Жердева, 2015 [67]
Мордвиновский	canny_medium, many	Харахинов и др., 1984 [121]
Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент)	canny_small, medium, many	Харахинов и др., 1984 [121] Василенко и др., 2001 [30] Василенко, Прытков, 2012 [14] Ломтев, Жердева, 2015 [67] Ломтев, Патрикеев, 2016 [68]
Слепиковский	canny_small, many	Харахинов и др., 1984 [121]
Пильтунский	canny_small	Рождественский, 1993 [91] Василенко и др., 2001 Ломтев, Жердева, 2015 [67]
Ламанонский	canny_small, medium	Харахинов и др., 1984 [121]
Гаромайский	canny_many	Василенко и др., 2001 [30] Булгаков и др., 2002 [1]
Вал-Лангрийский	canny_many	Василенко и др., 2001 [30]
Гыргылань-Дагинский	erosion_small	Василенко и др., 2001 [30]
Южно-Байкальский	canny_medium	Лободенко, 2010 [66] Харахинов, 2010
Удыльский	canny_small	Харахинов и др., 1984 [121]
Набильский	canny_small, medium, many	Харахинов и др., 1984 [121] Сим и др., 2016

Основные результаты оценки достоверности технологии дешифрирования представлены в таблице 5.

Таблица 5 – 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	Лонгрыйский	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 5

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 SRТМ (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 %	

На основе комплексного анализа сейсмического режима и линеаментного анализа севера Сахалина подтверждена достоверность литосферных и коровых разломов, зон трещиноватости и подвижек, примыкающих к области разломов, как подтвержденных данными геологических и геофизических исследований, так и новых зон линеаментов, свидетельствующих о повышенном напряженном состоянии земной коры исследуемых областей.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения локализации, конфигурации и параметров разломных зон острова Сахалин [58–61].

Таким образом, результаты проведенных экспериментов в виде полученных карт разломов острова Сахалин свидетельствуют о работоспособности и возможности практического применения разработанной технологии деифрирования для основы сейсмического районирования.

Выявление и картографирование линеаментов дает возможность также пересмотреть перспективность многих регионов, установить ранее неизвестные закономерности размещения полезных ископаемых. Изученные линеаменты позволяют по-новому подойти к разрешению многих проблем сейсмологии и тектоники.

## 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 исследо-

вания 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1 Активные разломы Сахалина / Р. Ф. Булгаков, А. И. Иващенко, Ч. У. Ким и др. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 2002. – Т. 36, № 3. – С. 227–246.

2 Александров, С. М. О связи глубинных структур и тектонических движений на Южном Сахалине и прилегающих акваториях / С. М. Александров, В. Н. Занюков. – Текст : непосредственный // Доклады VIII пленума Геоморфологической комиссии Ленина. – 1969. – С. 456–460.

3 Александров, С. М. Остров Сахалин / С. М. Александров. – Москва : Наука, 1973. – 184 с. – Текст : непосредственный.

4 Алексеев, Р. С. Границы изменения параметров напряженно-деформированного состояния и приуроченность к ним очагов землетрясений (на примере высокой Азии, Восточно-Европейской платформы и Сахалина) / Р. С. Алексеев, Л. А. Сим, Л. М. Богомолов. – Текст : непосредственный // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России : материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием / под ред. Е. А. Рогожина, Л. И. Надежки. – Москва : ИФЗ РАН, 2018. – С. 14–18.

5 Алексейчик, С. Н. Схема тектонического районирования Сахалина / С. Н. Алексейчик. – Текст : непосредственный // Геология и геохимия. – 1959. – Т. 8, № 2. – С. 81–85.

6 Анохин, В. М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение / В. М. Анохин. – Санкт-Петербург : Недра, 2006. – 161 с. – Текст : непосредственный.

7 Антонович, К. М. Спутниковый мониторинг земной поверхности / К. М. Антонович, А. П. Карпик, А. Н. Клепиков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2004. – № 1. – С. 4.

8 Бачманов, Д. М. База данных активных разломов Евразии / Д. М. Бачманов, А. И. Кожурин, В. Г. Трифионов. – Текст : непосредственный // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – № 4. – С. 711–736. – DOI 10.5800/GT-2017-8-4-0314.

9 Бесстрашнов, В. М. Палеосейсмогеологические исследования на Сахалине как основа для оценки сейсмической опасности и сейсмического риска / В. М. Бесстрашнов, А. Л. Стром. – Текст : непосредственный // Память и уроки Нейтегорского землетрясения 24–25 мая 1995 г. – Москва, 2000. – С. 113–116.

10 Бесстрашнов, В. М. Палеосейсмодислокации в зоне Центрально-Сахалинского разлома: их структурная позиция и значение для сейсмического районирования / В. М. Бесстрашнов, А. Л. Стром. – Текст : непосредственный // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. – Петропавловск-Камчатский, 2000. – С. 110–118.

11 Большая советская энциклопедия. В 30 т. Том 8. Дебитор – Евкалипт / ред. А. М. Прохоров, Н. К. Байбаков, А. А. Благонравов. – Москва : Советская Энциклопедия, Издание 3-е, 1969. – 771 с. – Текст : непосредственный.

12 Бондур, В. Г. Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев. – Текст : непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.

13 Василенко, Н. Ф. Геодезические предвестники Оморского землетрясения 22 декабря 1984 г. на Среднем Сахалине / Н. Ф. Василенко, Е. В. Богданова. – Текст : непосредственный // Вулканология и сейсмология. – 1988. – № 2. – С. 72–80.

14 Василенко, Н. Ф. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений / Н. Ф. Василенко, А. С. Прытков. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 1. – С. 42–48.

15 Викулин, А. В. Вихри в геологических процессах / А. В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во Камчатского гос. пед. университета, 2004. – 297 с. – Текст : непосредственный.

16 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.

17 Воейкова, О. А. Неотектоника и активные разрывы Сахалина / О. А. Воейкова, С. А. Несмеянов, Л. И. Серебрякова. – Москва : Наука, 2007. – 186 с. – Текст : непосредственный.

18 Гальцев-Безюк, С. Д. Роль разрывных дислокаций в формировании структурного плана Сахалина / С. Д. Гальцев-Безюк. – Текст : непосредственный // Изв. Сах. Отд. ВГО. – 1971. – Вып. 2. – С. 112–119.

19 Ганешин, Г. С. Остров Сахалин: Геологическое описание / Г. С. Ганешин. – Текст : непосредственный // Четвертичная система: Геоморфология. Геология СССР. – Москва : Недра. – 1970. – Т. 33. – С. 255–267.

20 География : учебное пособие / под ред. А. П. Горкина, В. В. Авдоница [и др.]. – Москва : РОСМЭН. – 2006. – С. 24. – Текст : непосредственный.

21 Геоинформационная поддержка принятия решений по использованию энергетических ресурсов Сахалина – Текст : непосредственный / В. А. Мелкий, И. Н. Тикунова, Е. Н. Ерёмченко и др. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 132–143.

22 Геологическая карта Дальнего Востока СССР масштаба 1:1 500 000 / Сост. Л. А. Варданянц // Министерство геологии СССР Всесоюзный научно-исследовательский геологический ин-т (ВСЕГЕИ). – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 1992. – Изображение картографическое ; неподвижное ; двухмерное: непосредственное.

23 Геологический словарь. В 2 т. / под ред. К. Н. Паффенгольца и др. – Москва : Недра, 1973. – 2 т. – 2-е изд. – С. 53. – Текст : непосредственный.

24 Геология СССР. Остров Сахалин. Геологическое описание / под ред. А. В. Сидоренко, А. А. Капица. – Москва : Недра, 1970. – Т. 33. – 431 с. – Текст : непосредственный.

25 Гордиенко, И. Г. Опытные-методические работы по использованию комплекса «Прогноз для автоматизированной обработки аэрокосмической информации» за 1983–1986 г. / И. Г. Гордиенко – Москва: ЦКАГЭ Объединения Аэрогеология, 1987. – 362 с. – Текст : непосредственный.

26 Горная энциклопедия в 5 т. / под ред. Е. А. Козловского и др. – Москва : Советская энциклопедия, 1984. – С. 27. – Текст : непосредственный.

27 Гуляев, Ю. П. О корректном подходе к математическому моделированию деформационных процессов инженерных сооружений по геодезическим данным / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 22–29.

28 Дальневосточный федеральный округ. Сахалинская область: Геологическая карта. Масштаб 1 : 5 000 000: Сайт Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского, 2010. – URL: <https://vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/sakhalin/geol.jpg> (дата обращения: 06.03.3021). – Текст : электронный.

29 Дворкин, Б. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б. А. Дворкин, С. А. Дудкин. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2013. – № 2. – С.16–36.

30 Деформации земной поверхности в эпицентральной зоне Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. / Н. Ф. Василенко, А. И. Иващенко, Ч. У. Ким и др. – Текст : непосредственный // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. – 2001. – С. 39–57.

31 Долгополов, Д. В. Совершенствование методики автоматизированного дешифрирования разрывных нарушений для информационного обеспечения мониторинга земель в зонах активной тектонической деятельности : на примере Курильских островов и Камчатки: специальность 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Долгополов Даниил Валентинович ; Московский госу-



дарственный университет геодезии и картографии. – Москва, 2003. – 180 с. – Текст : непосредственный.

32 Занюков, В. Н. Сахалинская область: геологическая карта масштаба 1 : 2 000 000 / В. Н. Занюков, В. М. Тихомиров. – 1967. – URL: <https://www.kuriles-history.ru/maps/thematic/natural/id-132/> – Изображение картографическое ; неподвижное ; двухмерное : электронное.

33 Занюков, В. Н. Центрально-Сахалинский разлом и его роль в тектонике острова / В. Н. Занюков. – Текст : непосредственный // ДАН СССР. – 1971. – Т. 196, № 4. – С. 913–916.

34 Зверев, А. В. Применение автоматизированного линеаментного анализа космических снимков при поисках нефтегазовых месторождений, прогнозе землетрясений, склоновых процессов и путей миграции подземной воды / А. В. Зверев, А. Т. Зверев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2015. – № 6. – С. 14–20.

35 Зверев, А. Т. Изучение динамики линеаментов, вызванных землетрясениями в Южной Америке, с применением линеаментного анализа данных спутника ASTER (TERRA) / А. Т. Зверев, В. А. Малинников, А. Ареллано-Баеса. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 5. – С. 56–65.

36 Златопольский, А. А. Мультимасштабный анализ цифровой модели рельефа. Экспериментальные закономерности. / А. А. Златопольский. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 27–35.

37 Златопольский, А. А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект / А. А. Златопольский. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 3. – С. 38–46.

38 Златопольский, А. А. Особенности определения направления естественных объектов и текстур по растровым дистанционным данным / А. А. Златополь-

ский. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 52–56.

39 Златопольский, А. А., Автоматизированный анализ ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (программа «LESSA») / А. А. Златопольский, Б. В. Малкин. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 188–195.

40 Изосов, Л. А. Проблемы глобальной вихревой геодинамики. / Л. А. Изосов, Н. С. Ли. – Текст : непосредственный // Региональные проблемы. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 27–33.

41 Исследование из космоса предвестниковой цикличности при подготовке землетрясений, проявляющейся в динамике линеаментных систем / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев, Е. В. Гапонова, А. Л. Зима. – Текст : непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 1. – С. 3–30.

42 Карпик, А. П. Новый этап развития геодезии – переход к изучению деформаций блоков земной коры в районах освоения угольных месторождений / А. П. Карпик, А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 3–9.

43 Карпик, А. П. О возможности контроля положения опорных пунктов в системах геодезического мониторинга / А. П. Карпик, Л. А. Липатников. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 98–102.

44 Карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин масштаба 1: 1 250 000 / составление, оформление, дизайн Ю. П. Никитенко и др., картографическая основа – Росреестр. – Москва : ГУГК, 1981. – Изображение картографическое ; неподвижное ; двухмерное : непосредственное.

45 Кац, Я. Г. Основы линеаментной тектоники : учебное пособие / под ред. Я. Г. Кац, А. И. Полетаева, Румянцевой Э. Ф. – Москва : Недра, 1986. – 144 с. – Текст : непосредственный.

46 Киселев, В. А. О необходимости учета зон геодинамически активных разломов при кадастровой оценке земель населенных пунктов / В. А. Киселев, О. А. Трибуц. – Текст : непосредственный // Записки Горного Института. – 2012. – Т. 199. – С. 320.

47 Кожурин, А. И. Активная разломная тектоника юга центральной Камчатки / А. И. Кожурин, В. В. Пономарева, Т. К. Пинегина. – Текст : непосредственный // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 2(12). – С. 78–85.

48 Кожурин, А. И. Сейсмотектонические проявления землетрясения 27 (28) мая на севере Сахалина / А. И. Кожурин, М. И. Стрельцов. – Текст : непосредственный // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г. Информационно-аналитический бюллетень ФССН. Экстренный выпуск, октябрь 1995 г. – Москва : МЧС РОССИИ: РАН, 1995. – С. 95–100.

49 Кожурин, А. И. Следы сильных землетрясений на полуострове Шмидта – северной части острова Сахалин в голоценовое время / А. И. Кожурин, И. Ю. Лободенко, А. Л. Стром. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 4. – С. 23–29.

50 Колмогоров, В. Г. Современная активность разломов и сейсмичность Алтае-Саянской области / В. Г. Колмогоров, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 28–32.

51 Кольцевые структуры континентов Земли / В. Н. Брюханов, В. А. Буш, М. З. Глуховский и др. – Москва : Наука, 1987. – 184 с. – Текст : непосредственный.

52 Комиссаров, А. В. Классификация погрешностей в результатах лазерного сканирования / А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2015. – № 10. – С. 13–18.

53 Константиновская, Л. В. Дистанционные методы контроля / Л. В. Константиновская // Справочная информация. – 2021. – URL: <http://www.astronom2000.info> (дата обращения 02.04.2021). – Текст : электронный.

54 Космическая информация в геологии / В. Г. Трифионов, В. И. Макаров, Ю. Г. Сафонов, П. В. Флоренский. – Москва : Наука, 1983. – 370 с. – Текст : непосредственный.

55 Космогеология СССР : учебное пособие / Н. С. Афанасьева, В. И. Башилов, В. Н. Брюханов и др. – Москва : Недра, 1987. – 239 с. – Текст : непосредственный.

56 Кофф, Г. Л. Предварительная оценка последствий Углегорского землетрясения 4 (5) августа 2000 г. на Сахалине / Г. Л. Кофф, Р. Ф. Булгаков, А. И. Иващенко и др. – Южно-Сахалинск, 2000. – 96 с. – Текст : непосредственный.

57 Кропоткин, П. Н. Геологическое строение Тихоокеанского подвижного пояса / П. Н. Кропоткин, К. А. Шахварстова. – Москва : Наука, 1965. – 366 с. – Текст : непосредственный.

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

59 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.

60 Купцова, О. В. Разломы и методы их выявления на примере о. Сахалин / О. В. Купцова, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // IX Межвузовская молодежная науч. конф. «Школа экологической геологии и рационального недропользования».

пользования» : научное издание под редакцией проф. В. В. Куриленко (Санкт-Петербург, 2008 г.). – Санкт-Петербург : СПбГУ, 2008. – С. 236–237.

61 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.

62 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.

63 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.

64 Кучай, В. К. Предельная интенсивность землетрясений Сахалина по палеосейсмологическим данным / В. К. Кучай, Г. В. Полуниин. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 1986. – № 3. – С. 112–114.

65 Кучай, В. К. Современная орогенная структура южной части о. Сахалин / В. К. Кучай. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 1987. – № 1. – С. 50–57.

66 Лободенко, И. Ю. Голоценовые тектонические нарушения (палеосейсмодислокации) в зонах Хоккайдо-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов: специальность 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Иван Юрье-

вич Лободенко ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2010. – 165 с. – Текст : непосредственный.

67 Ломтев, В. Л. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы / В. Л. Ломтев, О. А. Жердева. – Текст : непосредственный // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3. – С. 56–68.

68 Ломтев, В. Л. Разломы Северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность / В. Л. Ломтев, В. Н. Патрикеев. – Текст : непосредственный // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3. – С. 44–58.

69 Лунина, О. В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии / О. В. Лунина. – Текст : непосредственный // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 407–434. – DOI 10.5800/GT-2016-7-3-0215.

70 Мазуров, Б. Т. Геодинамические системы (решение обратных задач геодезическими методами) / Б. Т. Мазуров. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22., № 1. – С. 5–17.

71 Мелкий, В. А. Аэрокосмический мониторинг вулканопасных территорий: теория и методы : специальность 05.24.04 «Кадастр и мониторинг земель» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мелкий Вячеслав Анатольевич ; Московский государственный университет геодезии и картографии – Москва, 2000. – 418 с. – Текст : непосредственный.

72 Мелкий, В. А. Обзор изданий картографических материалов в Сахалинской области Известия высших учебных заведений / В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 48–53.

73 Мельников, О. А. К вопросу геотектонического районирования о. Сахалин / О. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – Южно-Сахалинск : СахКНИИ, 1962. – Вып. 12. – С. 3–18.

74 Мельников, О. А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области / О. А. Мельников. – Москва : Наука, 1987. – 95 с. – Текст : непосредственный.

75 Монеронское землетрясение и наблюдения за деформациями земной поверхности на юго-западном побережье Сахалина / В. К. Захаров, Р. А. Сарычева, В. П. Семакин и др. – Текст : непосредственный // Современные движения земной коры: VI Всесоюзное совещание по современным движениям земной коры и IV межведомственное совещание по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах : тезисы докладов. – Таллин, 1972. – С. 46–47.

76 Набор инструментов для оценки качества Landsat ArcGIS // Сайт геологической службы США United States Geological Survey (USGS). – URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (дата обращения 24.03.2021). – Текст : электронный.

77 Несмеянов, С. А. Количественная оценка новейших движений и неоструктурное районирование горной области / С. А. Несмеянов. – Москва : Недра, 1971. – 144 с. – Текст : непосредственный.

78 Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 г.: макросейсмический эффект / Л. С. Оскорбин, А. А. Поплавский, М. И. Стрельцов и др. – Текст : непосредственный // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 134–160.

79 Николаев, Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы / Н. И. Николаев. – Москва : Недра, 1988. – 491 с. – Текст : непосредственный.

80 Об утверждении Положения о планировании космических съемок, приеме, обработке и распространении данных дистанционного зондирования Земли высокого линейного разрешения на местности с космических аппаратов типа «Ресурс-ДК» : постановление Правительства РФ от 10.06.2005 № 370 // Собрание законодательства РФ. – 10.06.2005. – № 30. – Ст. 182. – Текст : непосредственный.

81 Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка / С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. – Москва : ИТИ Технологии, 2015. – Издание 4-е. – 944 с. – Текст : непосредственный.

82 Парначёв, В. П. Основы геодинамического анализа: учебное пособие / В. П. Парначёв. – Томск : Изд-во НТЛ, 2011. – 308 с. – Текст : непосредственный.

83 Парфенов, Л. М. Континентальные окраины и островные дуги мезозойд Северо-Востока Азии / Л. М. Парфенов. – Новосибирск : Наука, 1984. – 191 с. – Текст : непосредственный.

84 Прытков, А. С. Деформации земной поверхности о. Сахалин по данным GPS наблюдений / А. С. Прытков, Н. Ф. Василенко. – Текст : непосредственный // VI научно-техническая конференция: Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 1–5.

85 Пушаровский, Ю. М. Введение в тектонику Тихоокеанского сегмента Земли / Ю. М. Пушаровский. – Москва : Наука, 1972. – 221 с. – Текст : непосредственный.

86 Пушаровский, Ю. М. О тектонике Сахалина / Ю. М. Пушаровский. – Текст : непосредственный // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1964. – № 12. – С. 42–61.

87 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.

88 Рогожин, Е. А. Тектоника очага зоны Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. на Сахалине / Е. А. Рогожин. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 1996. – № 2. – С. 45–53.

89 Рождественский, В. С. Роль сдвигов в формировании структуры Сахалина, месторождений углеводородов и рудоносных зон / В. С. Рождественский. – Текст : непосредственный // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – Т. 1. – С. 80–109.



90 Рождественский, В. С. Тектоническое развитие о. Сахалин / В. С. Рождественский. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 1987. – № 3. – С. 42–51.

91 Рождественский, В. С. Геодинамическая эволюция Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы / В. С. Рождественский. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 1993. – № 2. – С. 76.

92 Рождественский, В. С. О влиянии сдвигов на формирование структуры о. Сахалин / В. С. Рождественский. – Текст : непосредственный // Геология и разведка. – 1984. – № 9. – С. 16–22.

93 Рождественский, В. С. О сдвиговых смещениях вдоль зоны Тымь-Поронайского разлома на о. Сахалин / В. С. Рождественский. – Текст : непосредственный // ДАН СССР. – 1976. – Т. 230, № 3. – С. 678–680.

94 Рождественский, В. С. Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин / В. С. Рождественский. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 1982. – № 4. – С. 99–111.

95 Рудич, Е. М. Основные закономерности тектонического развития Приморья, Сахалина и Японии как зоны перехода от континента к океану / Е. М. Рудич. – Москва : Изд-во АН СССР, 1962. – 659 с. – Текст : непосредственный.

96 Рудич, Е. М. Основные этапы развития рельефа и новейшая тектоника Южного Сахалина / Е. М. Рудич, С. Н. Скиба. – Текст : непосредственный // Вестн. МГУ. Сер. геол.-геогр. – 1959. – № 3. – С. 209–220.

97 Сайт Copernicus Open Access Hub. – URL: <https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения 24.03.2021). – Текст : электронный.

98 Сайт EO Browser. – URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> (дата обращения 24.03.2021). – Текст : электронный.

99 Сайт LandViewer от EOS. – URL: <https://eos.com/landviewer> (дата обращения 24.03.2021). – Текст : электронный.

100 Сайт United States Geological Survey (USGS). – URL: <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 03.03.2021 г.). – Текст : электронный.

101 Сейсмотектоническая обстановка острова Сахалин / Е. А. Рогожин, Г. И. Рейснер, В. Н. Бесстрашнов и др. – Текст : непосредственный // Изв. РАН Физика Земли. – 2002. – № 3. – С. 35–44.

102 Смекалин, О. П. Сейсмический режим разломов очага могодского землетрясения в голоцене по палеосейсмическим данным / О. П. Смекалин, А. В. Чипизубов, В. С. Имаев. – Текст : непосредственный // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ : тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. – Иркутск : ФГБУН ИЗК СО РАН, 2021. – № 4. – С. 218–219.

103 СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений / Минстрой России. – Москва : Федеральное государственное унитарное предприятие «Центр проектной продукции массового применения», 1995. – 48 с. – Текст : непосредственный.

104 СНиП 2.01.09–91. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. – Москва : АПП Центр научно–технического прогресса. – 1992. – 33 с. – Текст : непосредственный.

105 Соловьёв, В. В. Новейшая тектоника о. Сахалин. Проблемы изучения четвертичного периода / В. В. Соловьёв. – Хабаровск, 1968. – С. 46–50. – Текст : непосредственный.

106 Соловьёв, В. В. Новейшая тектоника. Остров Сахалин: Геологическое описание / В. В. Соловьёв. – Текст : непосредственный // Геология СССР. – Москва : Недра, 1970. – Т. 33. – С. 342–354.

107 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства / Госстрой России. – Москва: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве, 1997. – 77 с. – Текст : непосредственный.

108 Спектральные характеристики Landsat 8 OLI, Landsat 8 TIRS // Сайт геологической службы США United States Geological Survey (USGS). – URL:

<https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer> (дата обращения 24.03.2021). – Текст : электронный.

109 Стрельцов, М. И. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 г. на Сахалине / М. И. Стрельцов. – Москва : Янус-К., 2005. – 180 с. – Текст : непосредственный.

110 Стыценко, Е. А. Картографирование территории муниципального образования с использованием методики автоматизированного дешифрирования разносезонных зональных космических изображений / Е. А. Стыценко. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 3. – С. 94–99.

111 Сычугова, Л. В. Метод автоматического дешифрирования линеаментных структур по оптическим и радиолокационным данным: на примере территории Кашкадарьинской области (Узбекистан) / Л. В. Сычугова, Д. Ш. Фазилова // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2020. – 10(79). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10793> (дата обращения: 10.03.2021). – Текст : электронный.

112 Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга : учебник / А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин, Д. Д. Дмитриев и др., под ред. И. Н. Ищука. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – 292 с. – Текст : непосредственный.

113 Терещенков, А. А. Земная кора Сахалина и окружающих акваторий / А. А. Терещенков, И. К. Туезов, В. В. Харахинов. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 1982. – № 1. – С. 82–91.

114 Тихонов, Н. И. Динамика сейсмического режима юга Сахалина / Н. И. Тихонов. – Текст : непосредственный // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – Т. 6. – С. 5–20.

115 Трифонов, В. Г. Неотектоника подвижных поясов / В. Г. Трифонов. – Москва : ГЕОС, 2017. – 144 с. – Текст : непосредственный.

116 Трифонов, В. Г. Особенности развития активных разрывов / В. Г. Трифонов. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 1985. – № 2. – С. 16–26.

117 Трубина, Л. К. Моделирование как средство реализации практико-ориентированного подхода при подготовке экологов / Л. К. Трубина. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы образования. – 2019. – Т. 2. – С. 219–222.

118 Уставич, Г. А. Особенности применения цифрового оборудования при геодезической съемке линейно-протяженных объектов / Г. А. Уставич, А. В. Иванов, Н. Б. Романескул. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 212–216.

119 Уткин, В. П. Сдвиговые дислокации и методика их изучения / В. П. Уткин. – Москва : Наука, 1980. – 144 с. – Текст : непосредственный.

120 Уткин, В. П. Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода / В. П. Уткин. – Текст : непосредственный // Литосфера. – 2019. – 19 (5). – С. 780–799.

121 Харахинов, В. В. Разломы Сахалина / В. В. Харахинов, С. Д. Гальцев-Безюк, А. А. Терещенков. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 1984. – № 2. – С. 77–86.

122 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 119–131.

123 Хоан, Ф. С. Разработка технологии автоматизированного обнаружения и анализа линеаментов и кольцевых структур на космических изображениях : специальность 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хоан Фам Суан; Московский государственный университет геодезии и картографии. – Москва, 2012. – 173 с. – Текст : непосредственный.

124 Чернова, И. Ю. Автоматизированный линеаментный анализ : учебно-методическое пособие / И. Ю. Чернова, И. И. Нугманов, Р. И. Кадыров. – Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012. – 38 с. – Текст : непосредственный.

125 Шевырёв, С. Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab / С. Л. Шевырёв. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.

126 Шерман, С. И. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга / С. И. Шерман. – Текст : непосредственный // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 115–122.

127 Шкарин, В. Е. Использование данных радиолокационной космической съемки для исследования районов современного вулканизма (на примере Ключевской группы вулканов) / В. Е. Шкарин, Д. А. Шаповалов. – Текст : непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 4. – С. 79–88.

128 Щепин, М. В. ALINA Автоматизированный анализ изображений аэрокосмических фотопланов / М. В. Щепин. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : сборник научных статей. – 2005. – Т. 3. – С. 143–146.

129 Щепин, М. В. Автоматизированный анализ ландшафтных и тектонических структур по аэрокосмическим снимкам. Программа ALINA. Снимки системы LANDSAT / М. В. Щепин. – Текст : непосредственный // Сб. тезисов третьей всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли». – 2005. – С. 196.

130 Щепин, М. В. Автоматизированный программный метод анализа изображений аэрокосмических фотопланов. Создание векторизованной тематической карты лесных массивов / М. В. Щепин. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : сборник научных статей. – 2005. – Т. 2. – С. 321–324.

131 Щепин, М. В. Выявление кольцевых структур по результатам обработки изображений космических снимков / М. В. Щепин, С. В. Евдокимов, Ю. В. Головченко. – Текст : непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2007. – Т. 4. – С. 74–87.

132 Щепин, М. В. Программа ALINA. Метод свернутых роз. Метод геологических исследований и геологического районирования на основе программной обработки аэрокосмических изображений / М. В. Щепин. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса : сборник научных статей. – Москва : ООО «Азбука-2000», 2007. – Т. 2. – С. 162–171.

133 Эпицентральные наблюдения роя ощутимых землетрясений 2001 года на юге острова Сахалин. Инструментальные и макросейсмические данные / А. И. Иващенко, Ч. У. Ким, Л. Н. Поплавская и др. – Текст : непосредственный // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 161–193.

134 Active faults and palaeoseismology in northeastern Sakhalin / Н. Tsutsumi, A. I. Kozhurin, M. I. Streltsov et al. – Текст : непосредственный // J. Geogr. – 2000. – Vol. 109, № 2. – P. 294–301.

135 Al-maitah, K. J. Location of the Dams Using Gis Techniques: A Case Study of the Hrh Tasneem Bint Ghazi for Technology Research Station / K. J. Al-maitah, A. Jordan. – Текст : непосредственный // Proc. of Third National GIS Symposium in Saudi Arabia. – Le Meridian: Al-Khobar, 2007 –145 p.

136 Asmus, V. V. Software system for satellite data processing of applied tasks in remote sensing of the Earth / V. V. Asmus. – Текст : непосредственный // Pattern Recogn. Image Anal. – 2016. – Vol. 19. № 3. – P. 372–379.

137 Besstrashnov, V. M. Traces of prehistoric earth-quakes along the Hokkaido-Sakhalin fault, Northern Sakhalin / V. M. Besstrashnov, A. L. Strom. – Текст : непосредственный // Proc. Eighth Intern. Congr. Intern. Assoc. for Engineering Geology and the Environment. – Rotterdam, Brookfield: Balkema. – 1998. – P. 697–702.

138 Canny, J. F. A Computational Approach to Edge Detection / J. F. Canny. – Текст : электронный // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – Vol. pami-8, No. 6. – 6 p. – URL: [http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERCE\\_ASS/canny1986.pdf](http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERCE_ASS/canny1986.pdf) (accessed 24 March 2021).

139 Casas, A. M. LINDENS: A program for lineament length and density analysis / A. M. Casas. – Текст : непосредственный // Comput. Geosci. – 2000. – Vol. 26. – P. 1011–1022.

140 Galamhos, C. Progressive probabilistic Hough transform for line detection. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition / C. Galamhos, J. Matas and J. Kittler. – 1999. – P. 554–560. – URL: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 22 March 2021). – Текст : электронный.

141 Hobbs, W. H. Lineaments of the Atlantic border region / W.H. Hobbs. – Текст : непосредственный // Bull. Geol. Soc. Amer. – 1904. – Vol. 15. – P. 483–506.

142 McCalpin, J. P. Paleoseismology / J. P. McCalpin. – Текст : непосредственный // 2nd Ed. International Geophysics Series. – London. New York: Academic Press, 2009. – Vol. 95. – 801 p.

143 PlanetaMonitoring. Программный комплекс обработки спутниковых данных / В. В. Асмус, А. А. Бучнев, В. А. Кровотынцев, В. П. Пяткин, Г. И. Салов. – Текст : непосредственный // Проблемы информатики. – 2013. – № 3. – С. 85–99.

144 Scholz, C. H. The Mechanics of earthquakes and Faulting / C. H. Scholz. – Текст : непосредственный // 3rd Ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – P. 471. – ISBN 9781316681473.

145 Surface faults and damage associated with the 1995 Neftegorsk earthquake / T. Shimamoto, M. Watanabe, Y. Suzuki et al. – Текст : непосредственный // J. Geol. Soc. Jap. – 1996. – Vol. 102, № 10. – P. 894–907.

146 The 2000 Mw Ulegorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data / M. G. Kogan, R. Burgman, N.F. Vasilenko, et al. – Текст : непосредственный // Geophys. Res. – 2003. – Vol. 30, № 3. – P. 21–24.

147 Tveite, H. The QGIS Line Direction Histogram Plugin / H. Tveite. – 2015. – URL: <http://plugins.qgis.org/plugins/LineDirectionHistogram/>. – Текст : электронный.

148 Udhi, C. Lineament density information extraction using DEM SRTM data to predict the mineral potential zone / C. Udhi, T. Arum. – Текст : непосредственный // International Journal of Remote Sensing and Earth Science. – 2016. – Vol. 13, № 1. – P. 67–74.

149 USGS EROS Archive. Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis / Website USGS (U.S. Geological Survey). – URL: <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 22 March 2021). – Текст : электронный.

150 Volkov, S.N. DIGITAL LAND MANAGEMENT: NEW APPROACHES AND TECHNOLOGIES / S.N. Volkov, E.V. Cherkashina, D.A. Shapovalov. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects. – 2019. – С. 012074. – URL: [https://www.elibrary.ru/author\\_items.asp](https://www.elibrary.ru/author_items.asp) (accessed 22 March 2021).

151 Yeats, R. Active Faults of the World / R. Yeats. – Текст : электронный // Oregon State University. – Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2012. – P. 634. – URL: [www.cambridge.org/9780521190855](http://www.cambridge.org/9780521190855) (accessed 22 March 2021).

152 Zlatopolsky, A. A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA / A. A. Zlatopolsky. – Текст : непосредственный // Comput. Geosci. – 1997. – Vol. 23, № 1. – P. 45–62.

153 Zlatopolsky, A. A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis-experimental results / A. A. Zlatopolsky. – Текст : непосредственный // Comput. Geosci. – 1992. – Vol. 18, № 9. – P. 1121–1126.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

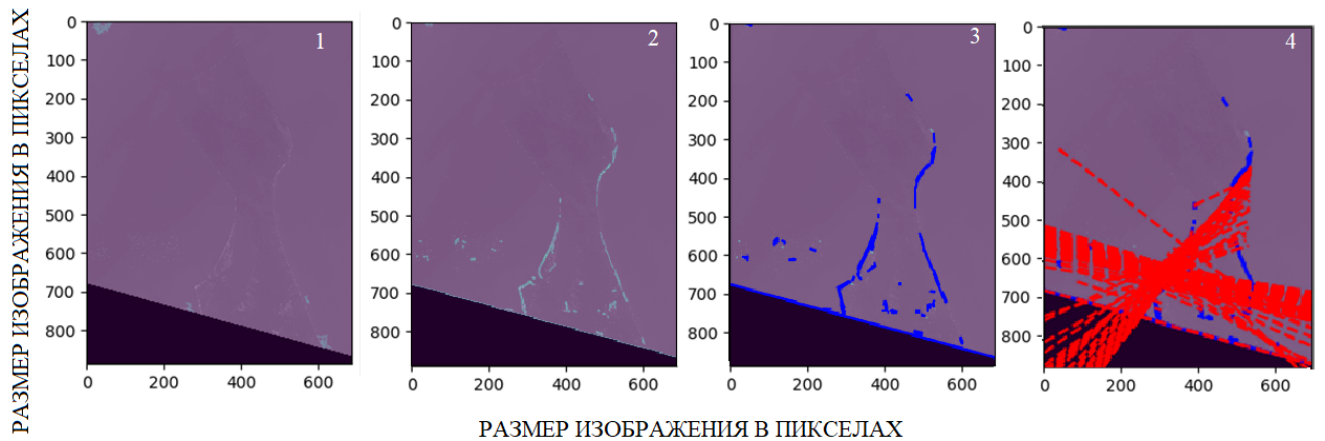
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
НАИЛУЧШЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА  
ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗЛОМОВ**

Таблица А.1 – Результаты исследования по выбору канала для дешифрирования разломов

Номер канала	Спектральный диапазон (название канала)	Возможность дешифрирования в режиме Canny			Возможность дешифрирования в режиме Erosion		
		small	medium	mannu	small	medium	mannu
1	Ультрафиолетовая часть спектра (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	Канал показывает мелководье и мельчайшие частички пыли и дыма в воздухе, что не соответствует критериям дешифрирования разломов					
2	Видимая синяя часть спектра (Blue)	Неясность в оценке дешифровочных признаков, так как видимый диапазон обычно имеет элементы простой геометрии (линии) объектов искусственного происхождения (дороги, газопроводы)					
3	Видимая зеленая часть спектра (Green)	Морфометрическое дешифрирование (геолого-геоморфологическое исследование), основанное на статистическом анализе пространственного распределения формы, фототона, текстуры и структуры изображения, не дает точных результатов в видимом канале					
4	Видимая красная часть спектра (Red)	Потоки тепла над разломами обуславливают наличие прямых дешифровочных признаков на изображении. Объекты дешифрирования явно различаются на снимке по прямым дешифровочным признакам (яркость, тон, форма) в различных режимах дешифрирования					

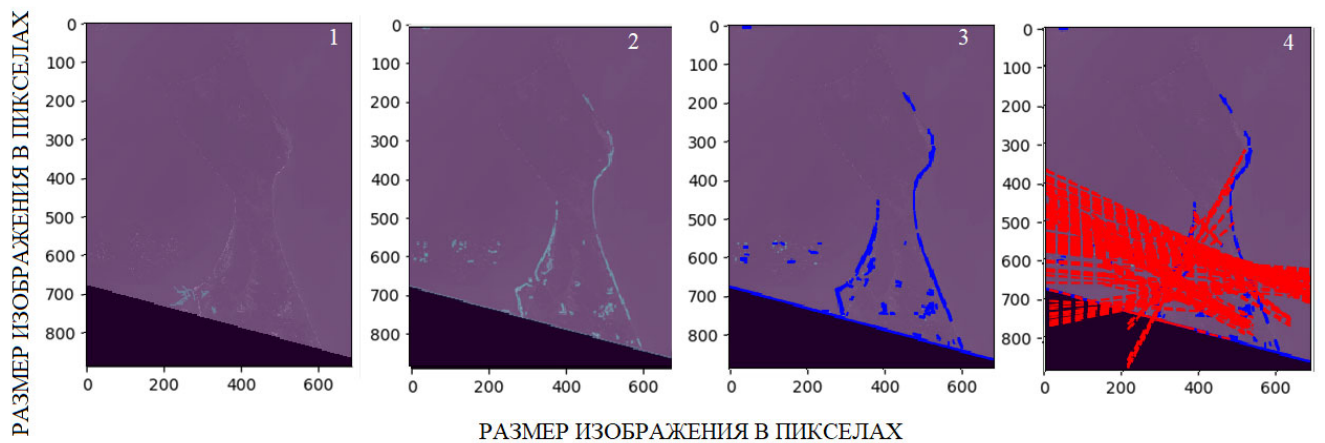
## Окончание таблицы А.1

Номер канала	Спектральный диапазон (название канала)	Возможность дешифрирования в режиме Canny			Возможность дешифрирования в режиме Erosion		
		small	medium	many	small	medium	many
5	Ближний инфракрасный диапазон (NIR)	Данную область спектра хорошо отражает вода в листьях здоровых растений. Высокий уровень шума канала (избыток информации) не позволяет проводить дешифрирование разломов в режимах максимальной чувствительности линий (Canny many, erosion many) программы LEFA					
6	Коротковолновый инфракрасный диапазон (SWIR)	Благодаря хорошему отображению различий сухой земли от влажной, скал от почв отражаются прямые геометрические дешифровочные признаки					
7	Коротковолновый инфракрасный (SWIR 2)	Отражаются прямые геометрические дешифровочные признаки разломов (линеаменты) по форме и тону изображения					
8	Панхроматический (PAN)	Возможно выделение фрагментов, существенно отличающихся по своим статистическим спектральным характеристикам					
9	Коротковолновый ИК-диапазон, отражающий перистые облака (Cirrus, SWIR)	Исходные данные канала не соответствуют требованиям дешифровки ни в одном режиме (недостаток информации: отсутствует различие дешифрируемых объектов), но данные позволяют проследить наличие облачности в месте съемки					
10	Длинноволновый тепловой диапазон (TIR1)	Исходные данные каналов не соответствуют требованиям дешифровки ни в одном режиме из-за недостатка информации (различия в фототонах проявляются только при большом перепаде температур, к примеру, дешифрируются лишь очертания острова, граница «суша – море»)					
11	Тепловой диапазон (TIR2)						



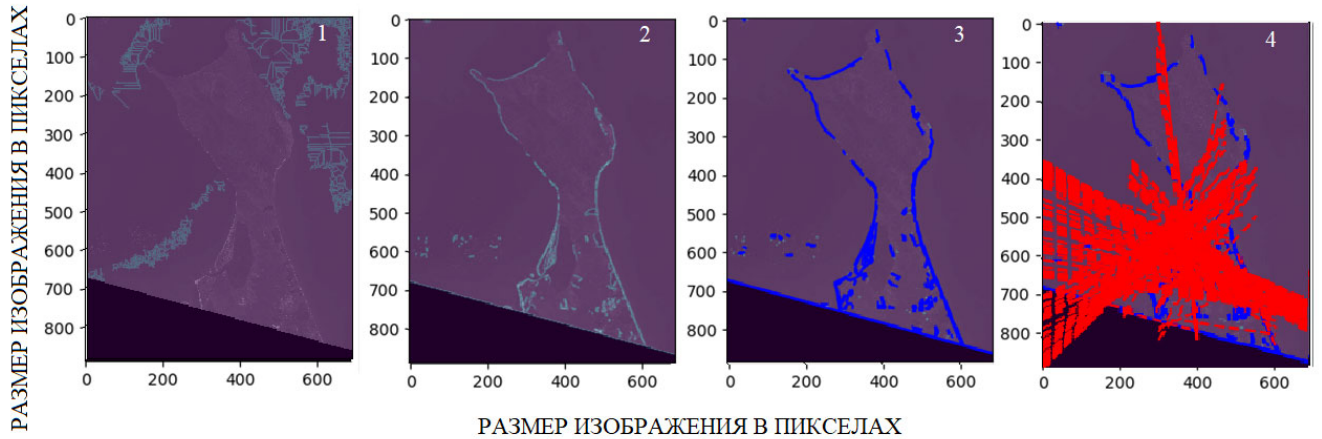
1 – выделение границ в режиме средней чувствительности Erosion; 2–4 – в режиме средней чувствительности Canny (2 – выделение границ, 3 – выделение штрихов, 4 – выделение соединенных линеаментов)

Рисунок А.1 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 1-го канала



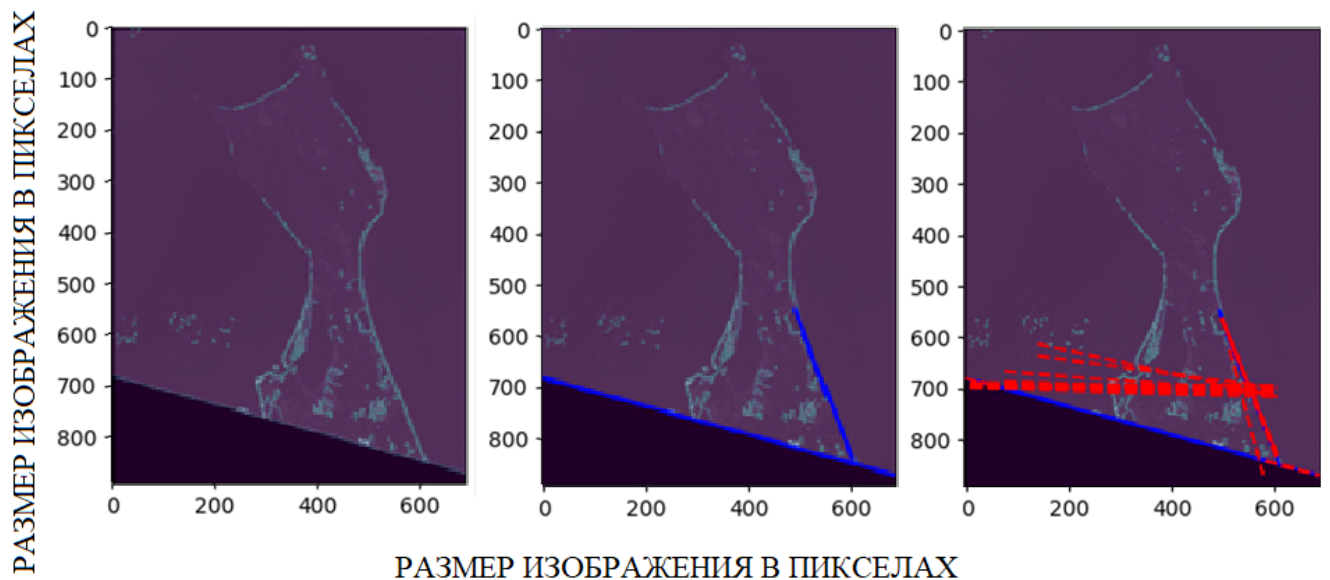
1 – выделение границ в режиме средней чувствительности Erosion; 2–4 – в режиме средней чувствительности Canny (2 – выделение границ, 3 – выделение штрихов, 4 – выделение соединенных линеаментов)

Рисунок А.2 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 2-го канала



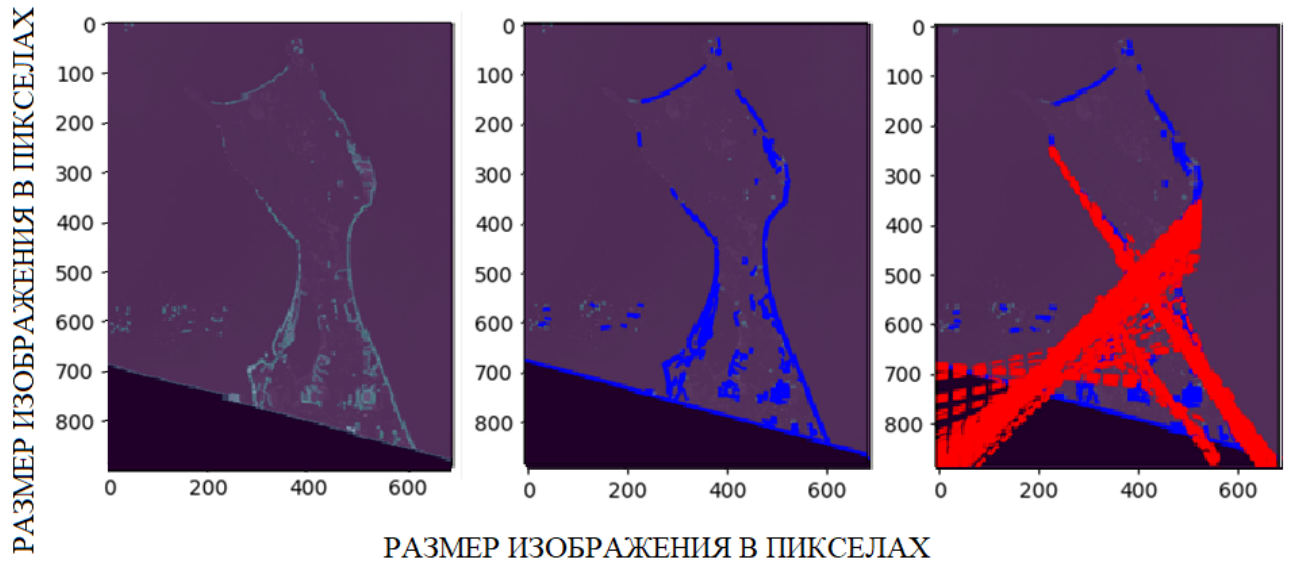
1 – выделение границ в режиме средней чувствительности Erosion; 2–4 – в режиме средней чувствительности Canny (2 – выделение границ, 3 – выделение штрихов, 4 – выделение соединенных линеаментов)

Рисунок А.3 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 3-го канала



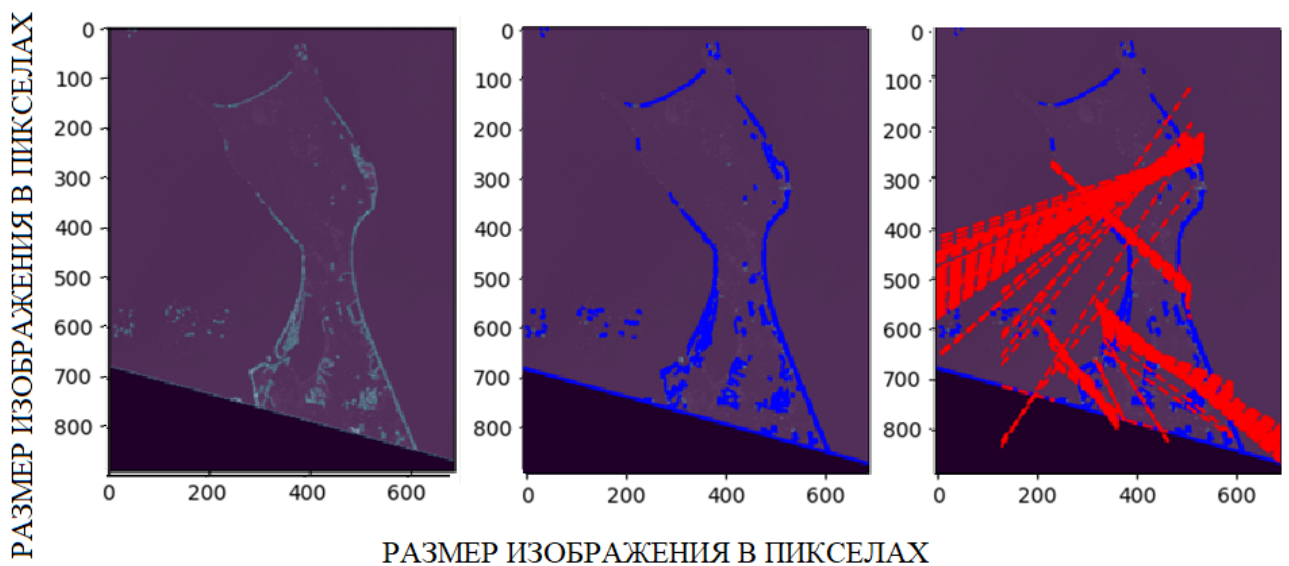
Слева направо: 1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов; 3 – выделение соединенных линеаментов

Рисунок А.4 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 4-го канала в режиме малой чувствительности линий Canny



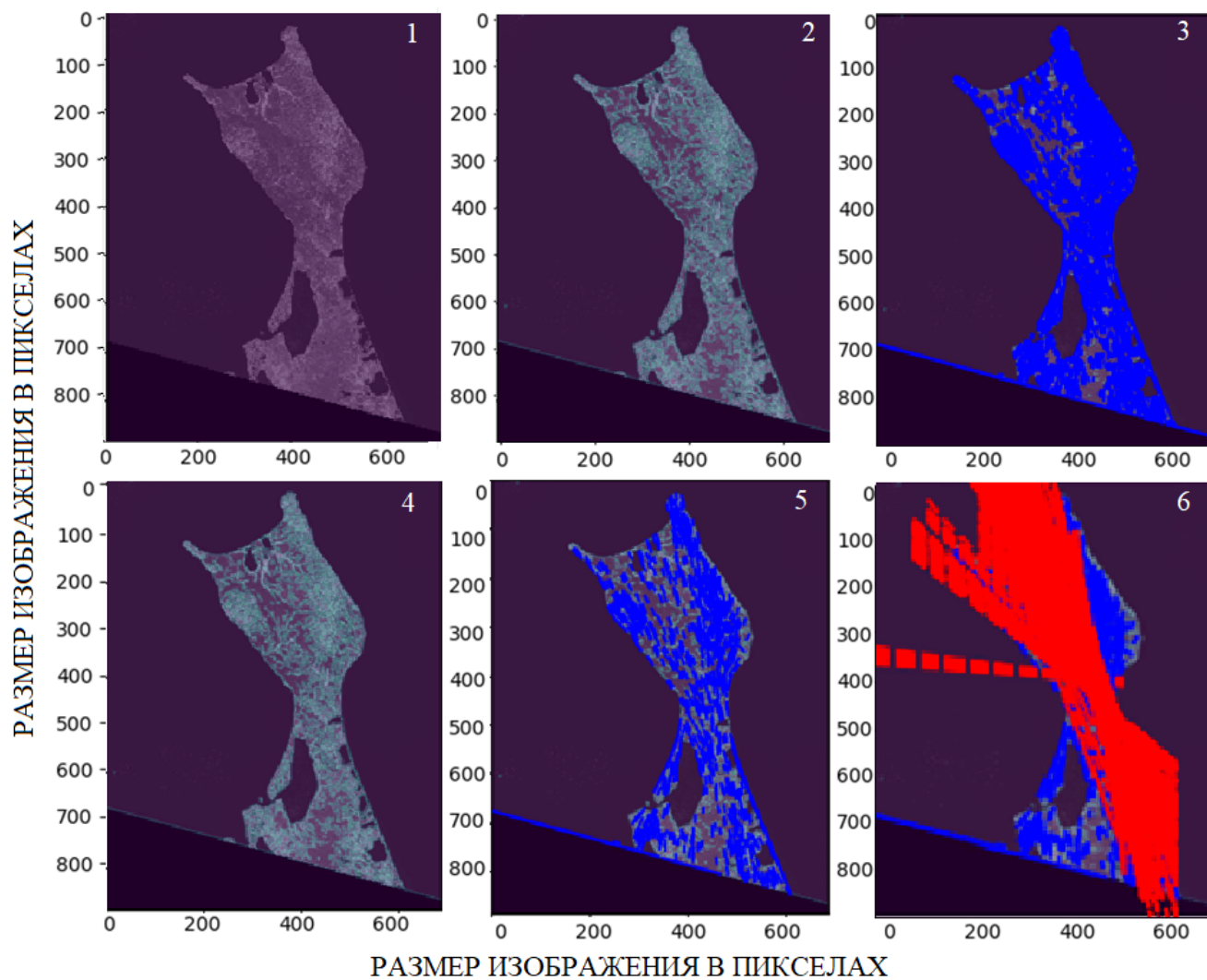
Слева направо: 1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов; 3 – выделение соединенных линеаментов

Рисунок А.5 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 4-го канала в режиме средней чувствительности линий Canny



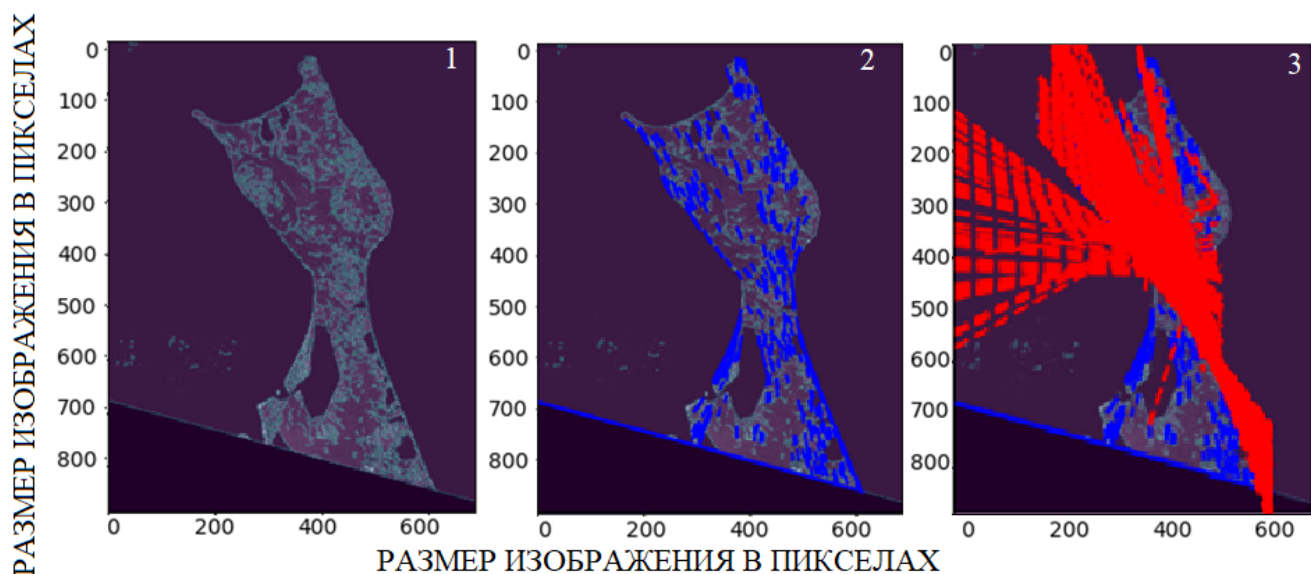
Слева направо: 1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов; 3 – выделение соединенных линеаментов

Рисунок А.6 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 4-го канала в режиме максимальной чувствительности линий Canny



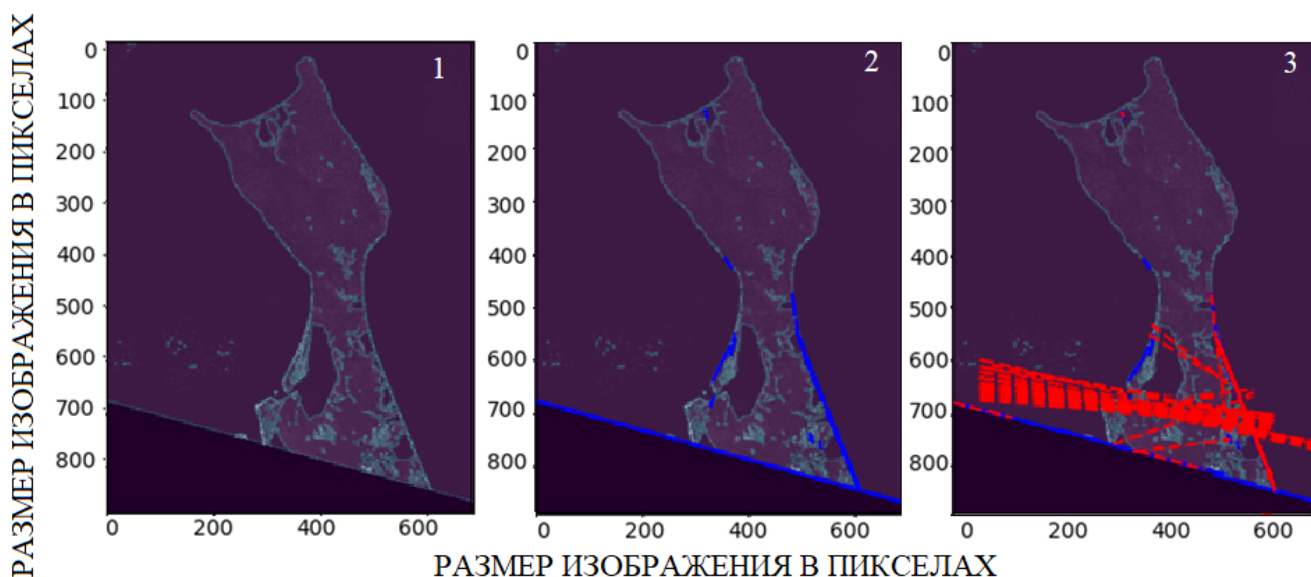
1 – выделение границ в режиме средней чувствительности Erosion; 2 – выделение границ в режиме средней чувствительности Canny; 3 – выделение штрихов в режиме средней чувствительности Canny; 4 – выделение границ в режиме малой чувствительности Canny; 5 – выделение штрихов в режиме малой чувствительности Canny; 6 – выделение соединенных линеаментов в режиме малой чувствительности Canny

Рисунок А.7 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 5-го канала



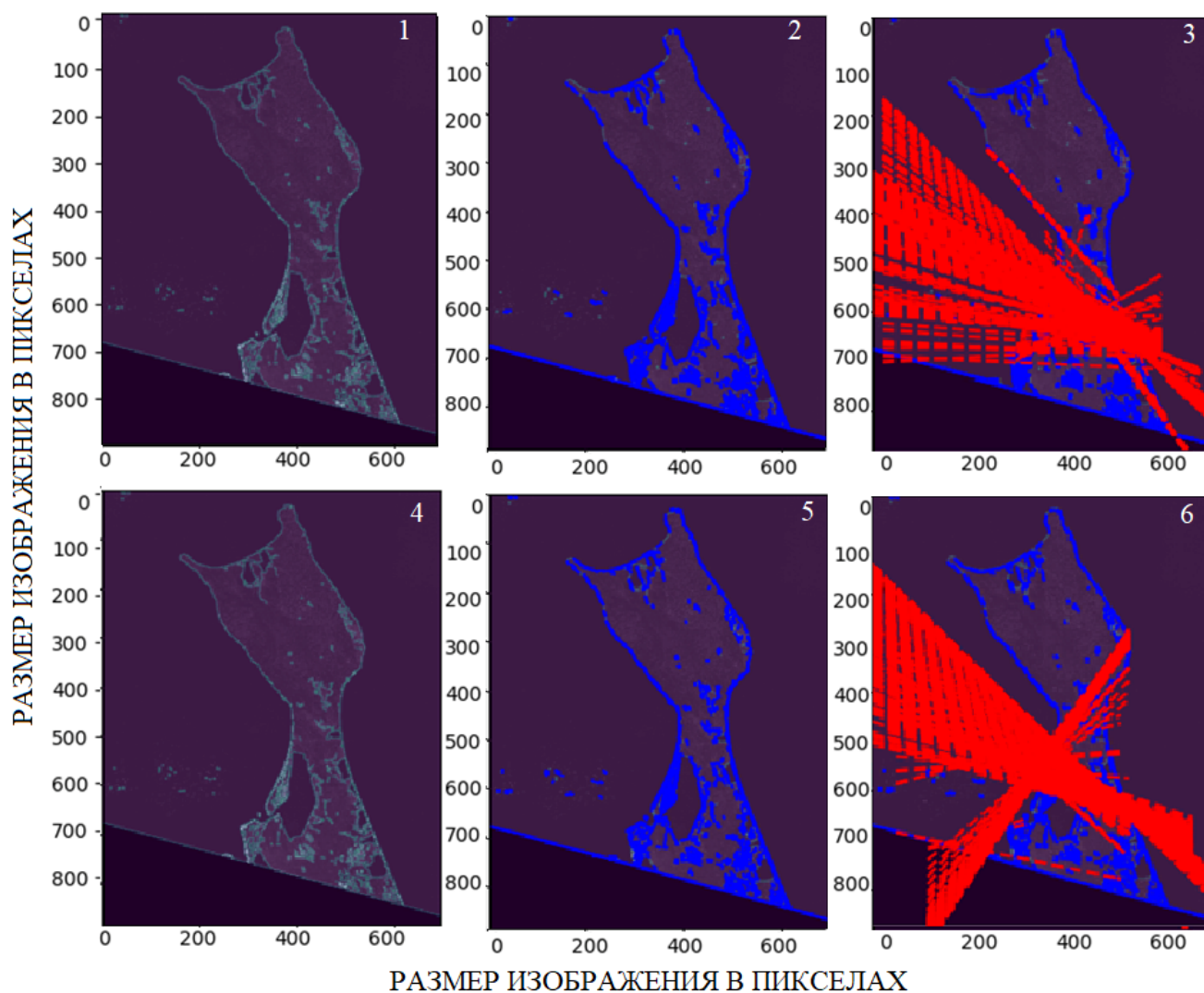
1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов; 3 – выделение соединенных линеаментов

Рисунок А.8 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 6-го канала в режиме малой чувствительности линий Canny



1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов; 3 – выделение соединенных линеаментов

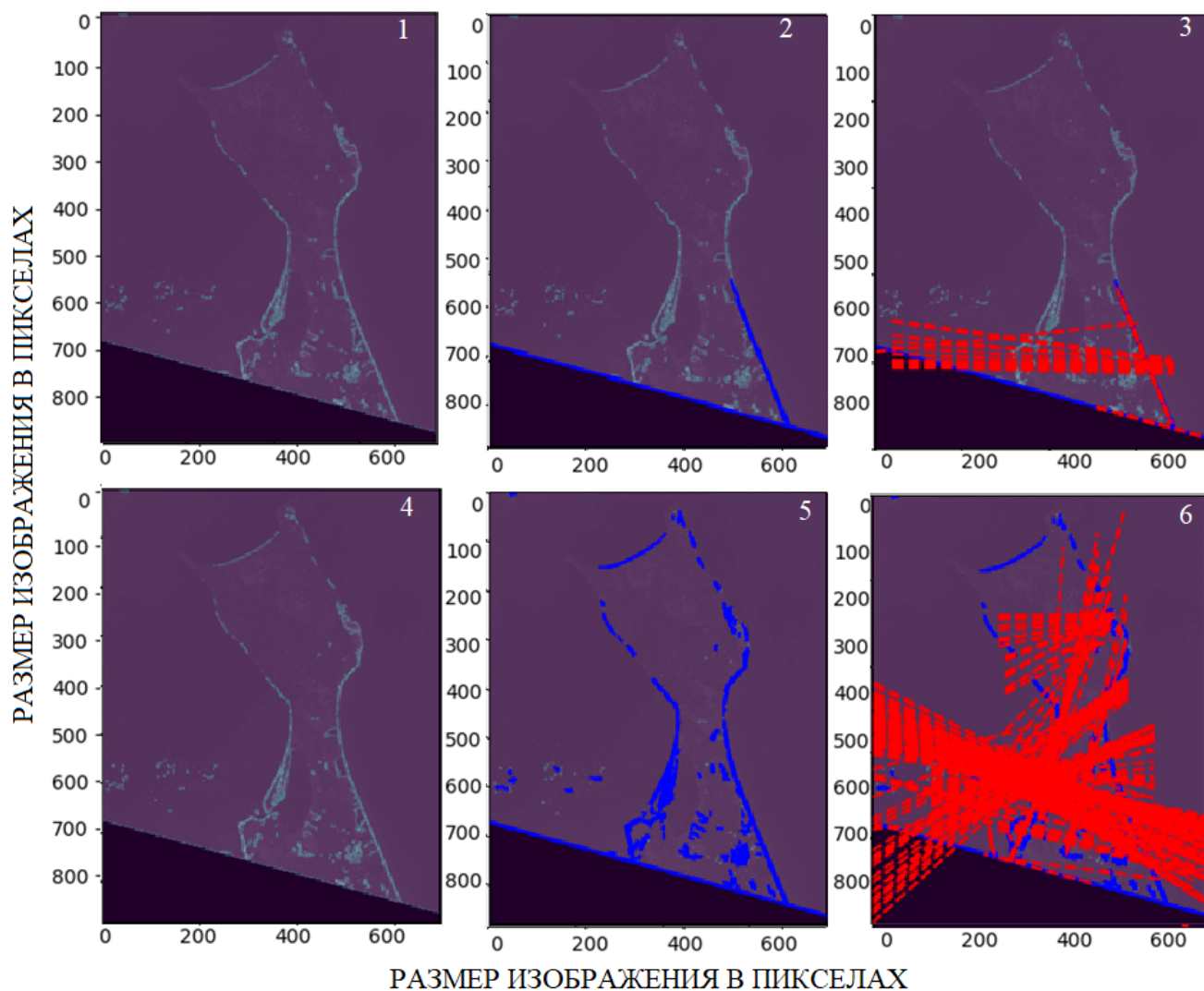
Рисунок А.9 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 7-го канала в режиме малой чувствительности линий Canny



1, 2, 3 – в режиме средней чувствительности Canny (1 – выделение границ, 2 – выделение штрихов-линементов, 3 – выделение соединенных линементов); 4, 5, 6 – в режиме максимальной чувствительности Canny (4 – выделение границ, 5 – выделение штрихов-линементов, 6 – выделение соединенных линементов)

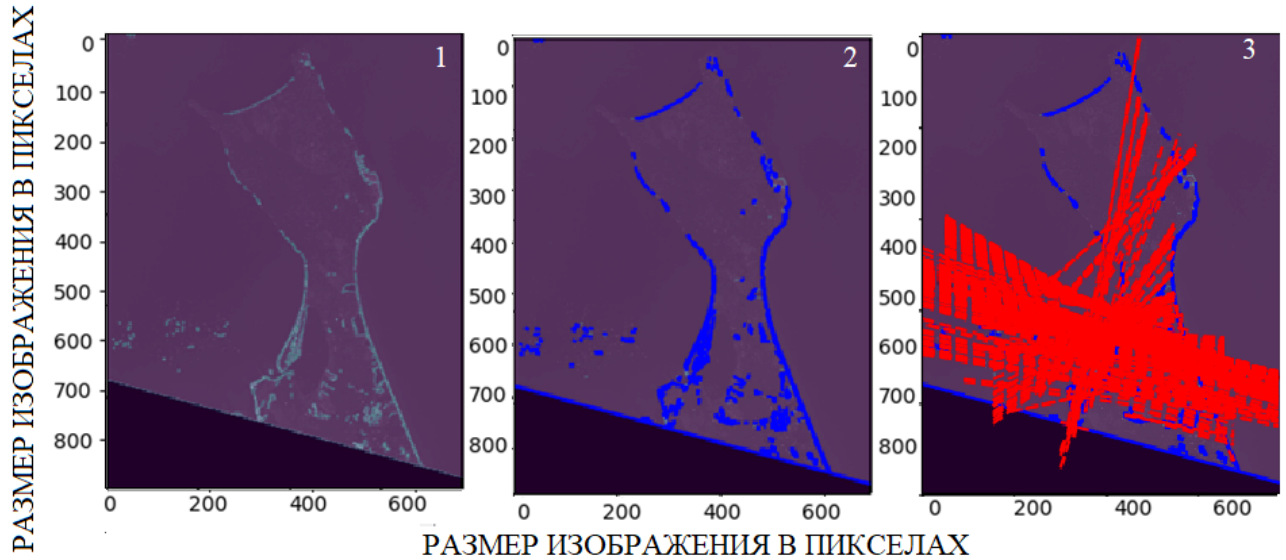
Рисунок А.10 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 7-го канала





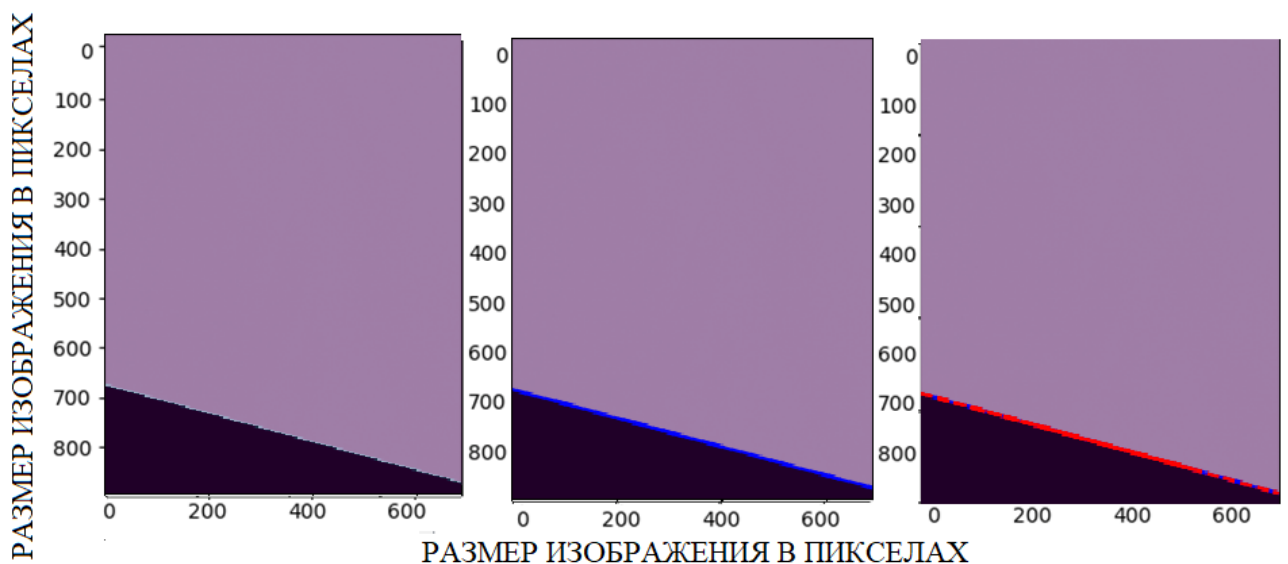
1, 2, 3 – в режиме малой чувствительности Canny (1 – выделение границ, 2 – выделение штрихов-линементов, 3 – выделение соединенных линементов); 4, 5, 6 – в режиме средней чувствительности Canny (4 – выделение границ, 5 – выделение штрихов-линементов, 6 – выделение соединенных линементов)

Рисунок А.11 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 8-го канала



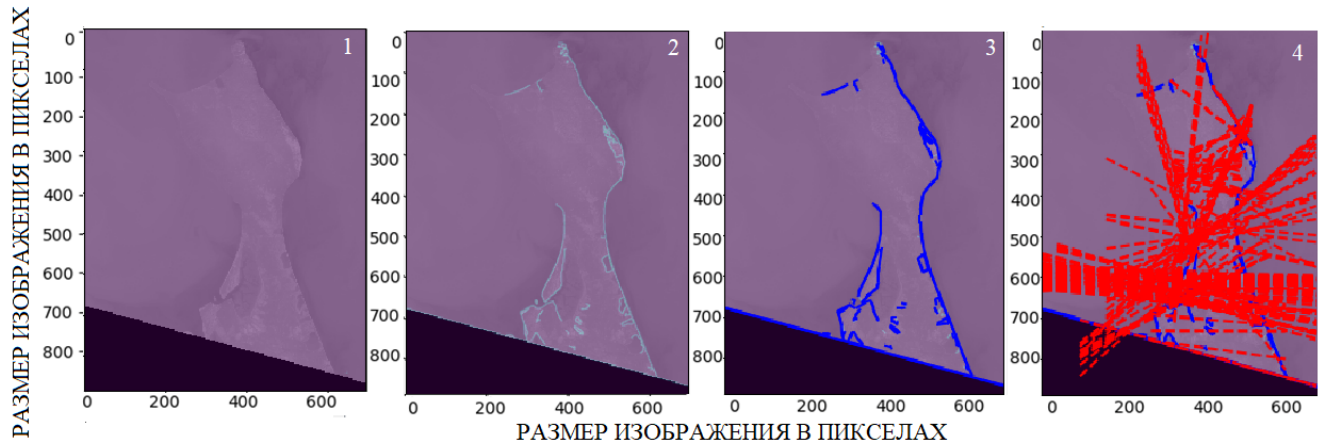
1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов-линеаментов; 3 – выделение соединенных линеаментов

Рисунок А.12 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 8-го канала в режиме максимальной чувствительности линий Canny



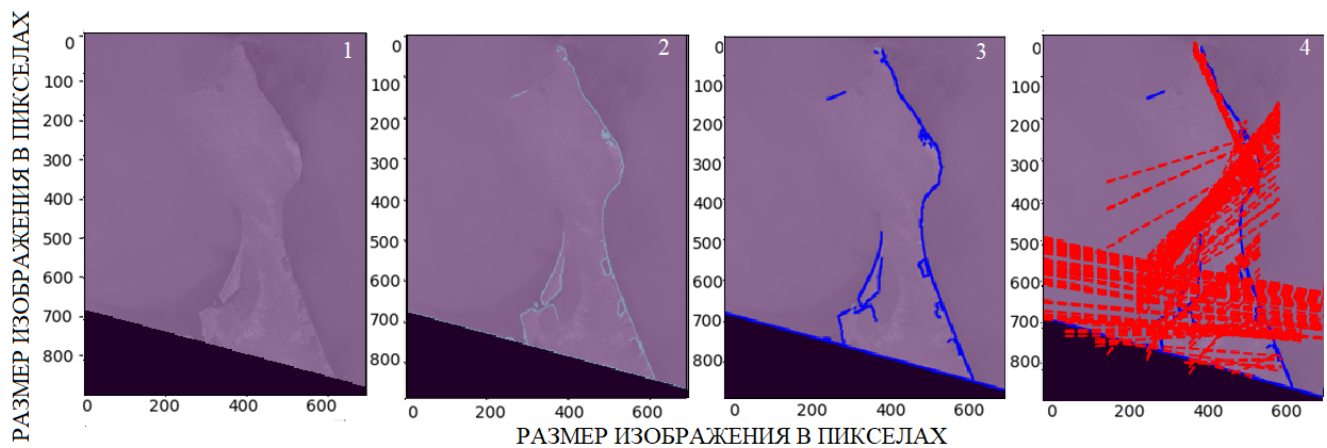
1 – выделение границ; 2 – выделение штрихов-линеаментов; 3 – выделение соединенных линеаментов

Рисунок А.13 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке Landsat 8 в спектральном диапазоне 9-го канала в режиме минимальной чувствительности линий Canny



1 – исходные данные; 2–4 – обработка в режиме средней чувствительности Canny  
(2 – выделение границ, 3 – выделение штрихов-линеаментов, 4 – выделение  
соединенных линеаментов)

Рисунок А.14 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке  
Landsat 8 в спектральном диапазоне 10-го канала



1 – исходные данные; 2–4 – обработка в режиме средней чувствительности Canny  
(2 – выделение границ, 3 – выделение штрихов-линеаментов, 4 – выделение  
соединенных линеаментов)

Рисунок А.15 – Пример дешифрирования разломов на спутниковом снимке  
Landsat 8 в спектральном диапазоне 11-го канала

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



АО «Дальневосточное ПГО»  
ОСП «СахГРЭ»

693005, г. Южно-Сахалинск, ул. А.  
Матросова, 26  
телефон: +7 (4242) 723619  
факс: +7 (4242) 722383  
e-mail: [sakhgre@rusgeology.ru](mailto:sakhgre@rusgeology.ru)

Диссертационный совет  
24.2.402.01  
г. Новосибирск,  
ул. Плеханова, 10,  
СГУГиТ

**Акт внедрения результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы Купцовой Олеси Витальевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.19. – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия на тему «Разработка технологии дешифрирования изображений с использованием геофизических данных для выявления разрывных нарушений», были внедрены в работу обособленного структурного подразделения «Сахалинская геологоразведочная экспедиция» акционерного общества «Дальневосточное производственно-геологическое объединение» при проведении мелко- и среднемасштабных геолого-съёмочных работ.

Директор ОСП «СахГРЭ»



Г.А. Хайбуллина