

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ»



УДК 528.8

На правах рукописи

ЗВЕРЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИРОДНО-РЕСУРСНЫХ И ПРИРОДООХРАННЫХ  
ЗАДАЧ**

25.00.34 — Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
д. т. н., проф. Малинников В. А.

Москва — 2019

## Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Опыт использования линеаментного анализа для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.....</b>	<b>11</b>
1.1. Общие сведения о линеаментном анализе. ....	11
1.2. Методы и алгоритмы линеаментного анализа цифровых изображений... ..	15
1.3. Программные пакеты автоматизированного линеаментного анализа цифровых изображений.....	22
1.4. Обзор результатов применения линеаментного анализа космических изображений земной поверхности для исследования экологического состояния, геодинамических процессов территории и прогнозной оценки природных ресурсов.....	27
Выводы по разделу.....	31
<b>2. Методика автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач. ....</b>	<b>32</b>
2.1. Физическая природа штрихов и линеаментов, выявляемых при линеаментном анализе космических изображений земной поверхности.....	32
2.2 Особенности использования космических изображений и цифровых моделей рельефа (ЦМР) в линеаментном анализе.....	35
2.3. Методика автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.....	41
2.4. Выводы по разделу.....	48
<b>3. Практическое применение разработанной методики автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.....</b>	<b>49</b>
3.1. Алгоритм автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для оценки перспективности территории на нефтегазоносность... ..	49

Выводы.....	69
3.2. Алгоритм автоматизированного линеamentного анализа космических изображений для оценки оползневой опасности.....	70
Выводы.....	88
3.3. Алгоритм автоматизированного линеamentного анализа космических изображений для геодинамического районирования территорий.....	89
Выводы .....	107
<b>Заключение.....</b>	<b>109</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>111</b>
<b>Список принятых сокращений.....</b>	<b>121</b>

## Введение

Для организации контроля рационального использования природной среды, не приводящего к ее резким изменениям, неносящим угрозу здоровью человека, в том числе и последующим поколениям необходимо актуальное геоинформационное обеспечение. В связи с этим важной задачей является поиск методов эффективной обработки космической информации в комплексе с наземными наблюдениями для удовлетворения природоохранных, экономических и культурно-оздоровительных потребностей населения, обеспечивающих устойчивое развитие природопользования. Сегодня, при решении таких задач, как оценка пригодности геологической среды для проведения строительных работ и безопасности возведенных сооружений, для оценки состояния природных и техногенных систем, поиска и разведки полезных ископаемых, оценки состояния растительных и земельных ресурсов и других видов оценки и контроля природной среды широко используются материалы многоспектральной, гиперспектральной и радиолокационной космической съёмки. Поскольку объёмы такой информации достаточно велики, особенно в последнем случае, то её обработка производится в автоматизированном режиме с помощью таких широко распространённых программных комплексов, как LESSA, ERDAS IMAGINE, ENVI и многие другие.

Одним из таких методов может служить линеаментный анализ. Суть данного метода заключается в дешифрировании геологических структур, проявляющихся на поверхности планеты в форме кольцевых структур и линий различной степени кривизны. А развитие современных спутниковых систем съёмки, позволяет получать данные для анализа в кратчайшие сроки.

**Актуальность темы.** Интенсивное внедрение космических методов в различные области науки и производства обусловлено принципиально новыми возможностями, главными из которых являются обзорность и оперативность получения изображений, объективность, достоверность и экономическая целесообразность их применения, а также возможность фиксации явлений и процессов, недоступных другими методами или требующих больших трудовых

затрат. К ним относятся, например, разрывная и трещинная тектоника, контролирующая размещение месторождений полезных ископаемых и развитие современных геодинамических процессов.

Зоны разрывных нарушений в большинстве случаев достаточно легко дешифрируются на космоснимках. Хуже обстоит дело с трещинной тектоникой. Ориентировка и особенности мелкой трещиноватости изучаются в обнажениях массивов горных пород. Это очень трудоемкий и длительный процесс, который в ряде случаев не позволяет выявить особенности трещинной тектоники. А зоны разрывных нарушений и трещин являются основными путями теплопереноса, миграции и концентрации полезных ископаемых и подземной воды, зонами повышенной сейсмической и вулканической активности и деформаций земной поверхности, местами развития эрозионных, оползневых и других негативных процессов. Поэтому их выявление и изучение актуально как для науки, так и для практики.

Суть данного метода заключается в дешифрировании линейных элементов ландшафта, связанных с зонами разрывных нарушений, трещиноватости и дробления горных пород, по которым происходит миграция магматических, жидких и газовых растворов и движение блоков земной коры, вызывающая развитие современных геодинамических процессов и образование месторождений полезных ископаемых и подземных вод.

**Степень разработанности научной проблемы.** Новые широкие возможности по изучению разрывной и трещинной тектоники появились в связи с появлением целой серии компьютерных программ по автоматизированному линеаментному анализу космических изображений.

В диссертационной работе обобщены результаты многолетних исследований различных авторов по применению автоматизированного линеаментного анализа космических снимков при решении различных геологоразведочных и инженерно-геологических задач на примере месторождений полезных ископаемых и геодинамических процессов, контролируемых зонами разрывных нарушений и трещин.

При анализе использовался пакет прикладных программ автоматизированного статистического анализа линейных элементов (штрихов) LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis).

В научной литературе широко обсуждается вопрос использования линеаментов для прогноза месторождений полезных ископаемых. Неоднократно отмечалась приуроченность месторождений к морфоструктурным линеаментам и особенно к местам (узлам) их пересечения.

Однако физическая природа линеаментов, дешифрируемых визуально и автоматизировано, остается во многом неясной. В первую очередь это касается платформенных областей, на которых обычно выделяется густая сеть протяженных ортогональных и диагональных систем линеаментов, нередко пересекающих всю платформу и уходящих за ее пределы. Рядом авторов отмечается, что выделение зон разрывных нарушений и трещин по линеаментам требует объективного обоснования их геологической природы. Однако при этом отмечается, что в горно-складчатых областях выделяемые по космическим снимкам линеаменты легче распознаются, так как в условиях достаточно хорошей обнаженности горных пород лучше проявлены прямые дешифровочные признаки зон разрывных нарушений и трещин.

Данный диспут касается в основном выделения лишь протяжённых (сквозных) линеаментов регионального и глобального уровней. Что же касается штрихов (локальных линеаментов), то объективность их выделения при автоматизированном анализе космических снимков подтверждена визуальным дешифрированием орографических и гидрографических линейных элементов, трассирующих зоны разрывных нарушений и трещин.

Основные исследования проведены автором в горно-складчатых областях и предгорьях с использованием таких статистических показателей как плотность штрихов разных простираний и роз-диаграмм штрихов.

Выполненное обобщение накопленного опыта по использованию автоматизированного линеаментного анализа космических снимков показало его

высокую эффективность для решения целого ряда поисковых и прогнозных задач геологоразведки и современной геодинамики.

**Цели и задачи диссертационного исследования.** Главной целью диссертационного исследования является разработка методики автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.

**Задачами диссертационного исследования,** направленными на достижение поставленной цели, являются следующие:

- обобщение существующего российского и зарубежного опыта использования линеаментного анализа космических изображений для решения геологических, природно-ресурсных и природоохранных задач;
- разработка методики применения линеаментного анализа для решения природно-ресурсных и природоохранных задач;
- разработка алгоритма поиска месторождений углеводородов на основе автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений;
- разработка алгоритма выявления оползневых склонов на основе автоматизированного линеаментного анализа синтезированных космических изображений;
- разработка алгоритма геодинамического районирования территорий на основе использования автоматизированного многоуровневого линеаментного анализа космических изображений.

**Объект исследования.** Теория и технология автоматизированного линеаментного анализа космических изображений с целью решения природно-ресурсных и природоохранных задач.

**Предмет исследования.** Космические изображения зон разрывных нарушений и трещин на земной поверхности, связанных с природно-ресурсными и экологическими явлениями и процессами.

**Научная новизна.** Впервые предложена адаптирующаяся методика автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для

решения природно-ресурсных задач, связанных с прогнозом месторождений полезных ископаемых и современных геодинамических проблем.

Научные результаты выносимы на защиту:

1. Адаптируемая методика применения линеаментного анализа для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.
2. Алгоритм поиска месторождений углеводородов на основе автоматизированного линеаментного анализа космических изображений.
3. Алгоритм выявления оползневых склонов на основе автоматизированного линеаментного анализа космических изображений.
4. Алгоритм геодинамического районирования на основе использования автоматизированного многоуровневого линеаментного анализа космических изображений.

**Теоретическая значимость:** Представленный в работе анализ возможностей автоматизированного линеаментного анализа космических изображений земной поверхности расширяет область его применения при решении природно-ресурсных и природоохранных задач. Результаты использования разработанной методики способствуют повышению научного уровня современных разработок по тематической обработке космических изображений земной поверхности. В разработанной адаптирующейся методике автоматизированного линеаментного анализа предложено комплексное использование космической информации о линеаментной тектонике и геодинамических режимах исследуемых территорий.

Сформулирована система основных идей и научных подходов по использованию автоматизированного линеаментного анализа космических снимков для решения различных научных проблем, связанных с закономерностями развития и структурной приуроченостью различных природных объектов и процессов, связанных с зонами максимальной проницаемости земной коры и геодинамической активности, зонами разрывных нарушений, трещиноватости и дробления горных пород.

**Практическая значимость:** разработанная методика позволяет решать широкий круг актуальных практических задач по повышению эффективности работ:

- по поиску месторождений полезных ископаемых и подземных вод;
- по прогнозу различных катастрофических геодинамических процессов;
- по оценке потенциальной пригодности геологической среды для проведения строительных работ и сохранности возведенных инженерных сооружений.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных в ходе диссертационных исследований научных результатов подтверждается их теоретическим обоснованием экспериментальными изысканиями на тестовых территориях, включающих сравнение с наилучшими результатами, полученные российскими и зарубежными учеными, полевыми исследованиями и научно-техническими отчетами по хоз. договорам (приложена справка о внедрении).

Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на:

- научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, Москва, 2014-2019 годах;
- «40-ых Гагаринских чтениях» Москва, 2014 год;
- International conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies» 18 – 21 July 2016 Sochi region, Mountain cluster, Russia
- 24th World Mining Congress/MINNG IN A WORLD OF INNOVATION/October 18-21, 2016 Rio de Janeiro/RJ Brazil.

Результаты диссертации использованы при выполнении хоздоговорных работ с ООО «Нефтедобывающее предприятие «Чепановское» в 2015-2018 гг. Результаты внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению «Геодезия и дистанционное зондирование», по специализации «Исследование природных ресурсов дистанционными методами». На базе выполненных

исследований разработано методическое пособие «Космический мониторинг чрезвычайных ситуаций».

# **1. Опыт использования линеаментного анализа для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.**

## **1.1. Общие сведения о линеаментах.**

Анализ результатов многолетних научных исследований, выполненных российскими и зарубежными учеными, с целью решения геологических, природно-ресурсных и природоохранных задач показал, что метод линеаментного анализа является одним из самых востребованных методов тематического анализа пространственной структуры земной поверхности. Данный метод, может быть эффективно использован для обнаружения и мониторинга линейных структур различной природы, отображаемых на космических изображениях земной поверхности.

Пионерскими исследованиями в этом направлении являются статьи В. Хоббса в которых, «впервые было дано определение линеаментам как выражающимся на фоне ландшафта линиям, обнаруживающим скрытые особенности строения коренной породы» [1]. В последующих работах, «многие ученые и исследователи предлагали собственные определения «линеамента», отличающиеся от определения В. Хоббса. В частности, Д. О'Лиэри и др. предлагали определять линеамент как картографируемый, простой или составной линейный элемент поверхности, чьи части образуют прямолинейные или слегка криволинейные структуры, четко отличающиеся от форм смежных элементов и которые, предположительно, отражают подповерхностные явления» [1]. Так же Д. О'Лиэри предложил объединить линеаменты, обнаруживаемые на местности и на аэрокосмических изображениях (фотолинеаменты) в одно понятие. Однако, многие ученые до сих пор дифференцируют понятие «линеамента», в зависимости от целей собственных исследований. Б.Б. Брок, например, «определял «линеамент» как геологический или топографический объект настолько прямолинейный, что его прямолинейность нельзя рассматривать как случайность» [2]. А В. Ц. Кэли в первую очередь учитывал длину линеаментов, указывая, что «линеаментами можно называть лишь

прямолинейные элементы на поверхности Земли, которые имеют значительную протяженность» [3].

Характерной особенностью линеаментов является групповое распространение. Зачастую эти группы (поля) строго упорядочены. Расстояние между линеаментами в пределах разных групп зависит от мощности и состава земной коры, простирания линеаментов, времени их возникновения и других геологических особенностей региона [2].

А. Добрэ применял «принцип равноудаленности элементов геологической структуры» [4]. В дальнейшем эта закономерность множество раз подтверждалась эмпирически.

Также описаны множественные случаи объединения одноранговых линеаментов в зоны, характеризующиеся сокращением расстояния между соседними линеаментами.

«В.И. Макаров и Л.И. Соловьева в 1976 г. выделили под линеаментными зонами достаточно протяженные (регионального порядка) полосы сгущения линеаментов сравнительно небольшой протяженности, которые прерывисто продолжают или нередко подставляют друг друга по простиранию зоны.» [4]

Я.Г. Кац и др. проанализировали линеаменты платформенных и складчатых областей и предложили разделить их на зоны трех типов [4]:

- Регионального значения
- Трансрегионального значения
- Глобального значения

Линеаментные поля отдельных регионов различаются [4]:

- плотностью линеаментов;
- упорядоченностью линеаментов;
- главным и второстепенными простираниями линеаментов;
- расположением отдельных линеаментов, относительно поля в целом;
- соотношением линеаментов с главными простираниями разрывных и складчатых структур региона и т.д.;

Сочетания этих характеристик создают различные линеаментные рисунки: «Г-образным, У-образным, Х-образным, ромбовидным и т.д.» [4]

Анализ научной литературы по вопросу классификации линеаментов показал, что до настоящего времени нет единого мнения.

«О.М. Борисов и А.К. Глух показали, что линеаменты объединяются часто в регматические пары (динамопары) и образуют перекрестный структурный план двух разновидностей – миндалевидно-петельчатый и решетчатый. Кроме того, ими выделены парагенетические ассоциации» [4]:

- Линеаментно-планетарная трещиноватость, представленная разноориентированной сеткой небольших по протяжению линеаментов, для которых характерны торцовые сочленения, частые изломы и т.п.;
- Регионально-линейная мегатрещиноватость, образованная зонами сгущения субпараллельных в сочетании с диагональными или кулисовидными короткими линеаменами с довольно крутыми сместителями; зонами – шириной до десятков, протяженностью до сотен километров и приуроченными к ним дайками основного – субщелочного состава (например, Карамазар) и очагами неглубоких землетрясений (например, Танды);
- Линеаментные пучки, сформированные преимущественно дуговидными линеаменами, отходящими от одного центрального (осевого) в одну сторону в виде «конского хвоста» и фиксирующимися по линейным и линейно-полосовым аномалиям рельефа;
- Линеаментные зоны, представляющие собой «колоссальные» по протяженности структуры литосферы континентов, уходящие в пределы океанов, шириной до сотен километров, сопровождающиеся интенсивной деструкцией земной коры, процессами вулканизма, и

частично включающими зоны геосинклинального развития, которые являются границами различных по строению сегментов литосферы.

В последующем Я.Г. Кац дополнил и переработал эту классификацию [4], «исходя из предположения о том, что линеаменты отражают в параметрах географической среды, геологической структуры и геофизических, геохимических, сейсмических и других полей разновозрастные и разноглубинные неоднородности земной коры» [4]. Вариант классификации линеаментов Я.Г.Каца приведен на рисунке 1.1.

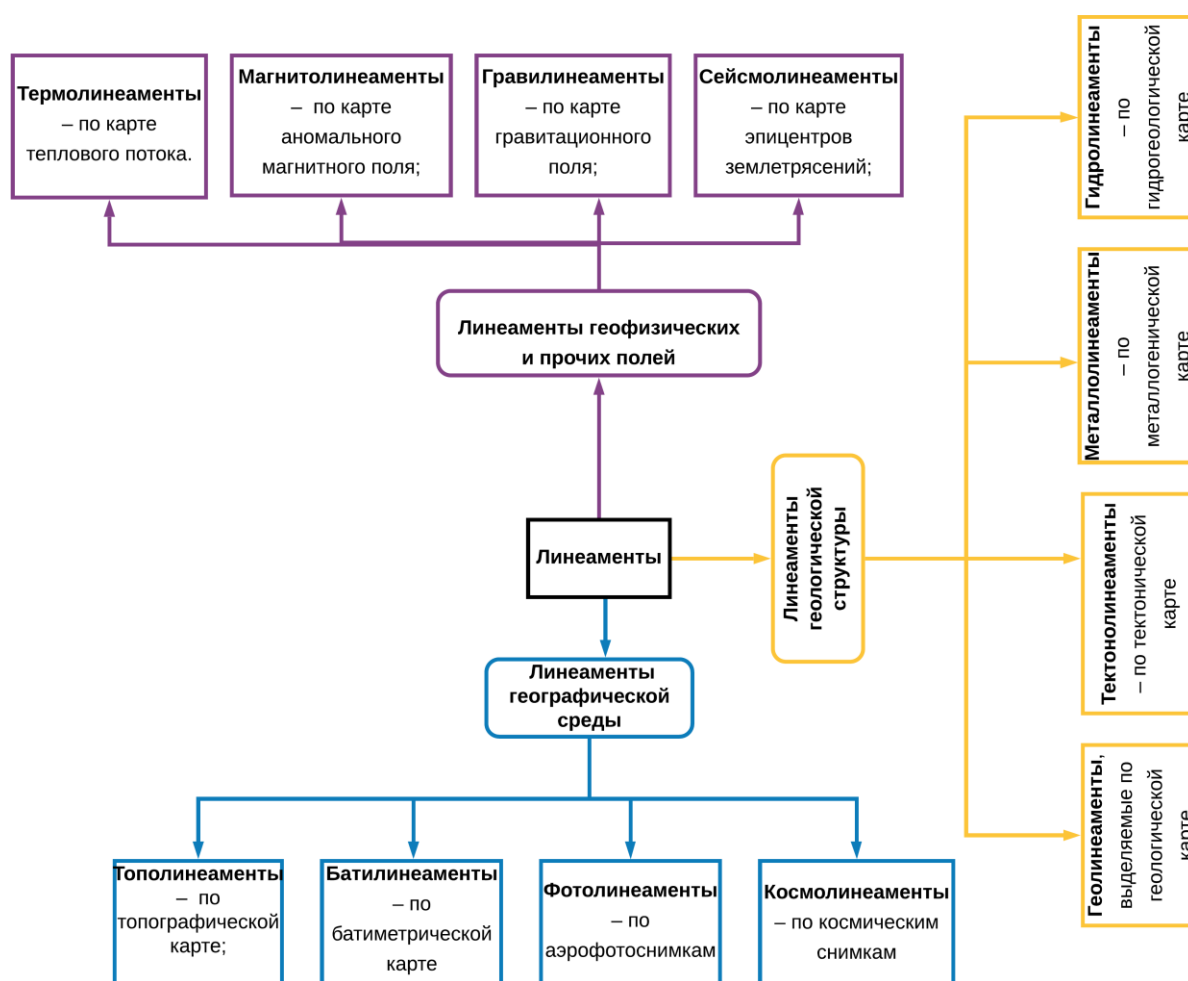


Рисунок - 1.1 Классификация линеаментов по Я.Г. Кацу

Исходя из этого можно дать следующее определение. Линеамент – линейный элемент поверхности, выраженный в рельефе и геологическом строении и зачастую обусловленный эндогенными процессами.

## 1.2. Методы и алгоритмы линейного анализа цифровых изображений.

На рисунке 1.2. приведены основные алгоритмы выделения границ. Эти алгоритмы относительно систем машинного зрения можно поделить на два класса [1].

Первый класс - алгоритмы не использующие априорные знания о сцене и обнаруживаемых границах — «автономные» алгоритмы. Эти алгоритмы не подвержены влиянию остальных компонентов системы и не зависят от контекстуальной информации. Область использования данных алгоритмов не ограничена специфическими изображениями. Решение о присвоении пикселя множеству точек границы, принимается на основании анализа его соседей.

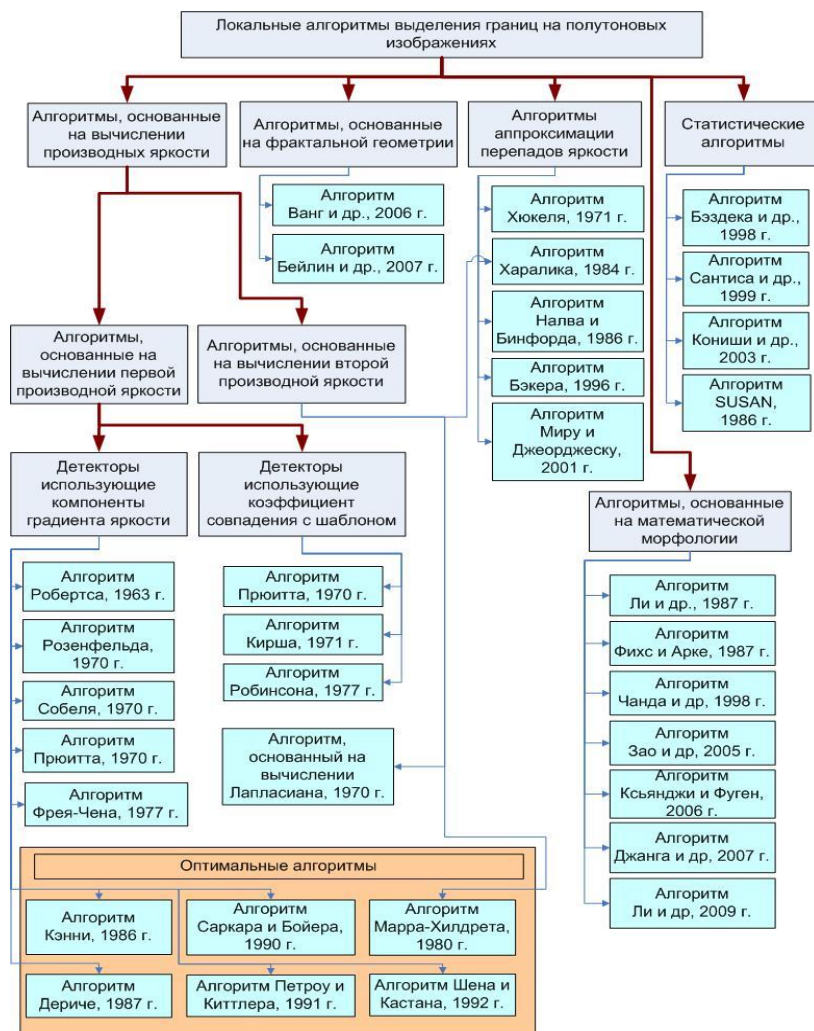


Рисунок 1.2 Локальные алгоритмы выделения границ на полутоновых изображениях [1].

Данные алгоритмы универсальны и могут применяться для решения общих задач.

Второй класс - «контекстуальные» алгоритмы. Их работа базируется на результатах работы остальных компонентов системы машинного зрения или же априорная информация о границах сцены. Эти алгоритмы применяются для решения специализированных задач.

### ***Алгоритмы, основанные на вычислении производных яркости***

«Решение о наличии границы принимается на основании значений градиента яркости» [1]. Данная группа алгоритмов основана на двух методах выделения границ [5]:

- Совпадение с шаблоном (СШ)
- Компоненты градиента (КГ)

Принцип действия этих методов заключается в оценке локального значения градиента или его проекции. Оба метода требуют использования масок. «В методе КГ задействованы две маски, определяющих компоненты градиента в двух ортогональных направлениях. В методе СШ количество масок зависит от необходимой точности определения параметров контура и может достигать до 12 и более. Для повышения точности оценки направлений контрастных перепадов используются более крупные маски с весовыми коэффициентами, зависящими от расстояния до центра маски. Эффективность этих операторов понижается, когда изображение зашумлено, поскольку, например, маски Прюитта и Собеля получены из предположения, что на изображении присутствует аддитивный белый шум, а модель формирования изображения линейная» [6].

### **Алгоритмы обнаружения границ, основанные на вычислении производных второго порядка.**

В этой группе алгоритмов используются два типа операторов:

- Производная второго порядка
- Лапласиан [7]

Основные преимущества Лапласиана перед производными второго порядка приведены на рисунке 1.3.

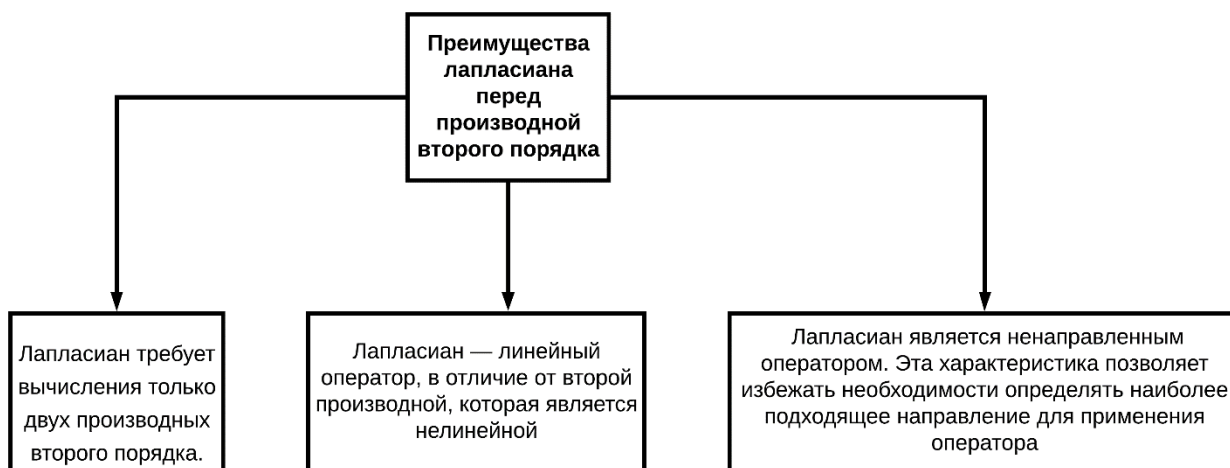


Рисунок – 1.3 Преимуществ лапласиана перед производной второго порядка

Недостатки дифференцирующих операторов приведены на рисунке 1.4.

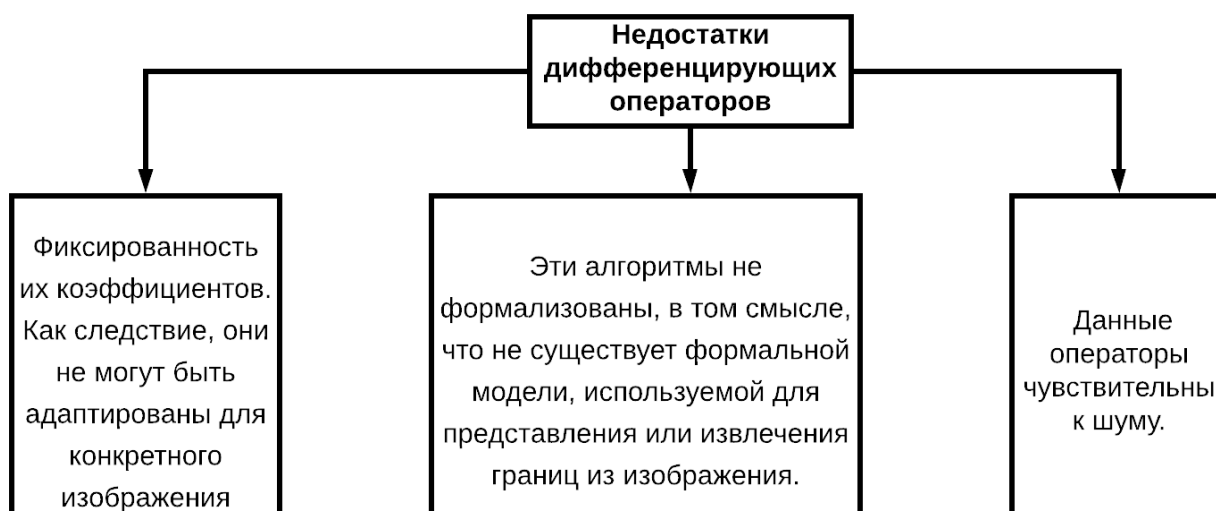


Рисунок – 1.4 Основные недостатки дифференцирующих операторов

Дифференцирующие операторы чувствительны к шуму. Чтобы уменьшить шумы было разработано множество алгоритмов [8, 9, 10]. Розенфельд и Трастон Для уменьшения шума на изображении было предложено большое количество алгоритмов. [8] [9]. Розенфельд и Трастон [10] «предложили проводить сглаживание изображения путем замещения значений пикселей изображения средними значениями, вычисленными на квадратном окне, центрированном на данном пикселе. Это делает алгоритмы обнаружения границ более устойчивыми

к влиянию шумов, но приводит к потере информации о граничных точках изображения» [1].

Создание оптимального алгоритма обнаружения границ требует компромисса между потерей исходной информации и фильтрацией шума.

Это порождает две проблемы:

- определение критериев эффективности
- проектирование фильтра, оптимального по этим критериям

Многие авторы предлагают собственные решения этих проблем.

Шанмугам и др. [11] проанализировали фильтры пространственных частот оптимальные для «получения максимальной энергии на конечном интервале указанной ширины в окрестности пикселей» [1] границ. Используя результаты данного исследования, они разработали фильтры с ограниченной полосой частот. «В результате исследования полученных фильтров оказалось, что границы на исходном изображении располагались в точках экстремума отфильтрованного изображения» [1].

Марр и Хилдрет [12] отталкивались от того, что «изображение границ получается, как множество точек перехода через ноль результата свертки исходного изображения с Лапласианом двумерного Гауссиана» [1]. Гауссиан был выбран в качестве фильтра по двум причинам:

- Он представляет компромисс пространственным и частотным разрешением
- Лапласиан Гауссиана может быть эффективно реализован, например, как разность двух Гауссианов, имеющих два близких масштаба

Еще один оптимальный алгоритм был предложен Кэнни [13,14]. Он изучил математическую проблематику получения фильтра оптимального для выделения, локализации и минимизации повторных откликов одного края. В результате исследования он определил, что подобный фильтр будет являться суммой четырех экспонент. «Он также показал, что этот фильтр может быть хорошо приближен первой производной Гауссиана. Кэнни ввел понятие

подавления немаксимумов (англ. Non-Maximum Suppression), которое означает, что пикселями границ объявляются пиксели, в которых достигается локальный максимум градиента в направлении вектора градиента. Детектор границ Кэнни до сих пор является одним из лучших детекторов» [1].

Алгоритм Кэнни нахождения границ на основе градиента заключается в общем виде представлен на рисунке 1.5

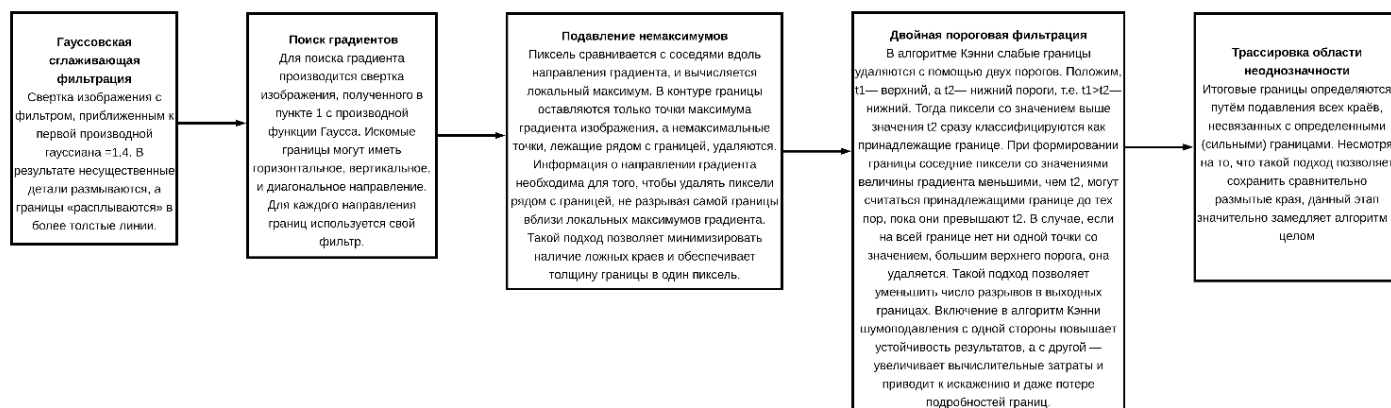


Рисунок – 1.5 Алгоритм Кэни в общем виде

Дериче переработал фильтр Кэнни, для обработки двумя рекурсивными фильтрами, движущимися в противоположных направлениях. Так же базируясь на фильтре Кэнни, Шен и Кастан разработали собственный экспоненциальный фильтр, реализованный при помощи рекурсивной фильтрации [1].

### *Алгоритмы аппроксимации перепадов яркости*

Данные алгоритмы основаны на «согласовании изображения с моделью границы и выбор в качестве пикселей границы тех пикселей, для которых ошибка подгонки минимальна» [1]. «Разработчиком первого детектора, использующего параметрические модели для нахождения контуров на изображении является Хюккель. В данном детекторе элементы контура ищутся на некотором множестве точек изображения наилучшим образом, аппроксимирующим круглое окно» [5].

### *Статистические алгоритмы*

«Бездек и др. предложили алгоритм обнаружения границ на изображении, состоящий из четырех последовательных этапов: подготовка исходного

изображения, извлечение признаков, сглаживание и масштабирование. Они исследовали роль геометрии в получении признаков, используемых для обнаружения границ и в установке параметров для функций сглаживания признаков.» [1]. Основные результаты исследований Бэздека и др. приведены на рисунке 1.6.

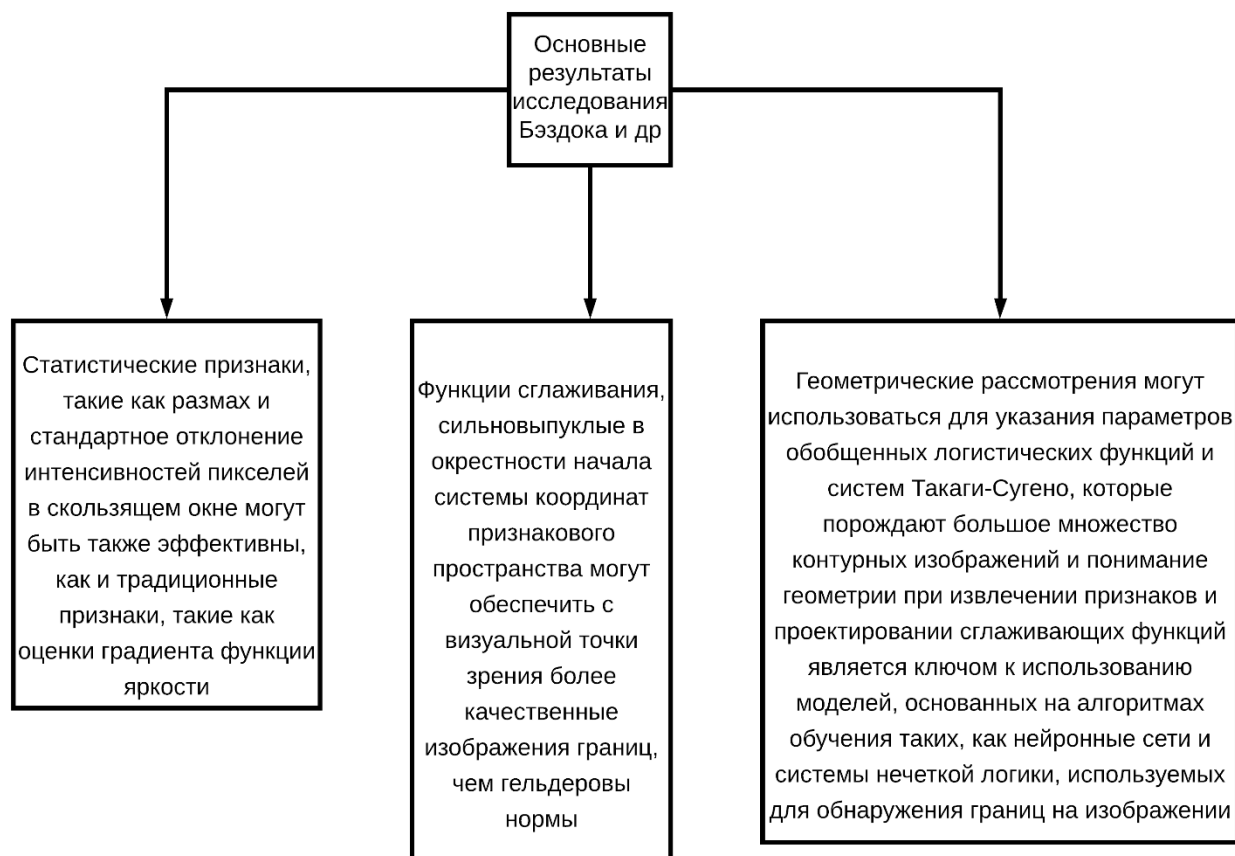


Рисунок – 1.6 Краткие результаты исследования Бэздека и др.

Де Сантис и Синисгали [15] предложили статистический «алгоритм обнаружения границ, предполагающий использование модели линейного стохастического сигнала, получаемого из описания изображения. В качестве модели границы принималась резкая локальная вариация среднего значения уровня серого тона. Параметры моделирования для каждого пикселя оценивались авторами данного метода посредством Байесовской процедуры. Решение о включении пикселя в контурное изображение принималось путем проверки гипотезы с помощью метода максимального правдоподобия» [1].

Смит и Брэди [16] «предложили статистический алгоритм обнаружения особенностей на изображении (границ, линий), в котором используются локальные статистики, рассчитываемые на основе подмножества пикселей, чей цвет незначительно отличается от цвета центрального пикселя. Название SUSAN происходит от сокращения полного английского названия алгоритма: Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus» [1]

### *Алгоритмы, основанные на фрактальной геометрии*

Термин фрактал ввел Мандельброт [17] «для описания нерегулярных, но самоподобных форм естественных объектов» [1]. Фрактальную геометрию можно использовать для различения текстур самоподобных множеств. «Хотя Хаусдорфова размерность является главной количественной характеристикой текстур, существует проблема реализации эффективных алгоритмов оценки Хаусдорфовой размерности. По этой причине для выделения границ на цифровых изображениях, как правило, используют оценки Хаусдорфовой размерности» [1].

Ванг и др. [18] разработали алгоритм выделения границ на цифровых изображениях, «основанный на анализе мультифрактального спектра исходного изображения» [1]. Сначала «оцениваются значения грубозернистых экспонент Гельдера для каждого пикселя исходного изображения, а затем мультифрактальный спектр методом оценки ядра» [1]. Оценка данного алгоритма, проведенная авторами, показала его высокую эффективность и возможность выделить более тонкие границы, чем по алгоритму Собеля.

В 1972 г. Дуда и Хартом разработали преобразование Хафа. Его смысл заключается в переходе от изображения к параметрическому пространству, где геометрические фигуры задаются набором параметров. В дальнейшем другие авторы продолжили их исследования и адаптировали данный метод для нужд геологии [1].

Помимо указанных алгоритмов, существует множество алгоритмов выделения линеаментов основанных на анализе расположения таких объектов как вулканы, горячие источники, эпицентры землетрясений и др формы [19, 20,

21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Идея этой группы алгоритмов основана на том что подобные объекты всегда связаны с геологическими структурами, следовательно, и линеаментами. «При этом наличие пространственных связей между обнаруженными линеаментами и соотнесенными точечными объектами исследуемого поля точек, позволяет специалисту-интерпретатору более надежно, по сравнению с алгоритмами первой группы, установить степень достоверности результатов автоматизированного линеаментного анализа. Однако возможность обнаружения линеаментов данными алгоритмами во многом зависит от степени достоверности и полноты исходных данных о точечных объектах» [1]. Эти алгоритмы так же обладают двумя существенными недостатками:

- Выделение линеаментов зависит от количества и достоверности выделения указанных объектов;
- Они не позволяют отслеживать кратковременные изменения линеаментов.

### **1.3. Программные пакеты автоматизированного линеаментного анализа цифровых изображений.**

Программное обеспечение для автоматизированного обнаружения и анализа линеаментов развивается в двух направлениях.

Первое - это развитие инструментария для поиска и выделения линейных структур в универсальных ГИС пакетах. К ним можно отнести такие программные пакеты как ArcGIS, MapInfo, QGIS, SAGA. Однако, данные инструменты зачастую представляют только самые базовые возможности для поиска и выделения линеаментов, и более подходят для дальнейшей обработки уже имеющихся полей линеаментов, чем для их дешифрирования [1].

Второе направление – создание специалистами собственных программ для линеаментного анализа, основанных на авторских технологических схемах. Сюда входят такие программы как LINDENS [30], WinLESSA [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37], Alina [38, 39, 40, 41, 42], LINEAMENT [43],

PLANETAMONITORING [44], Гео-ПК [1]. Приведем их краткое описание самых распространенных программных пакетов.

### **Программный пакет LESSA.**

Входными данными могут быть полутоновые изображения, бинарные изображения и цифровые модели рельефа. Анализ построен на выявлении линейных элементов рельефа – штрихов. Для полутоновых изображений штрихами будут границы однородных областей, для цифровых моделей рельефа – оси долин и хребтов. Программа выделяет штрихи восьми различных простираний. Есть два пути для их дальнейшего анализа.

Первый – статистический анализ штрихов. Он позволяет строить псевдоцветные изображения (поля) плотности штрихов различных простираний, вытянутость роз-диаграмм штрихов, близость роз-диграмм к кресту, отличие друг от друга и тд.

Второй – построение протяженных линеаментов. Полученные штрихи объединяются в спрямленные линии в зависимости от их простирания. Однако, полученные таким образом линии требуют дальнейшей экспертной оценки, и являются не более чем подсказкой о расположении линеаментов.

### **Программный пакет ALINA**

В качестве входных данных используются плановые аэрокосмические снимки. «Суть метода в формировании и последующем анализе матрице направлений границ перепадов яркости изображения, каждый элемент которой имеет свою ориентацию и определяется функцией свертки ориентированной розы-диаграммы, заданной апертуры поля градиента яркости изображения» [42].

### **Программный пакет LEFA**

В качестве входных данных используются растровые изображения и цифровые модели рельефа.

Возможности линеаментного анализа:

- Выявление линейных элементов;
- Определение характеристик линейных элементов;
- Построение роз-диграмм линейных элементов;

- Объединение линейных элементов в линеаменты по методу коллинеарности

Первый базируется на преобразовании Хафа и позволяет «оценивать максимальный допуск разрыва в пикселях для конкретной линии, дискретизация значений координат Хафа ( $\rho$  и  $\theta$ ), количество пиков Хафа (houghpeaks)» [45].

Второй алгоритм основан на разбивке и спрямлении элементов границ изображения. Решение об объединении отдельных элементов в линеаменты принимается, основываясь на их коллинеарности. Его результаты зависят от следующих параметров - «максимальная разница  $k/b$  (отношение углового коэффициента уравнения сравниваемых линий к свободному члену), максимальное расстояние между центральными точками сравниваемых линий, минимальное количество линий, необходимое для объединения в линеаменты, порядок полинома линии, получаемой в результате» [45].

### **Программный пакет LINEAMENT**

В качестве входных данных могут использоваться растровые изображения, цифровые модели рельефа, геофизические и геохимические поля.

Основные достоинства в сравнении с аналогами:

- Совместимость с пакетом ArcView;
- Возможность настройки и изменения картографической проекции;
- Возможность экспорта данных в различные форматы;

Возможности линеаментного анализа:

- Выделение линеаментов по направлениям;
- Выделение кольцевых структур;
- Построение роз-диаграмм линеаментов;
- Подсчет плотности линеаментов;

### **Программный пакет Гео-ПК**

В качестве входных данных могут использоваться растровые изображения и цифровые модели рельефа.

Отличительной особенностью:

- Возможность предварительной обработки данных;
- Геометрические преобразования;
- Наличие инструментов для классификации изображений;
- Наличие инструментов для мультифрактального анализа и сегментации изображений;
- Плагиновая архитектура, позволяющая изменять возможности программы под конкретные задачи.

Возможности линеаментного анализа:

- Выделение линеаментов;
- Выделение кольцевых структур;
- Выделение полей штрихов;
- Геостатистический анализ линеаментов, кольцевых структур и полей штрихов;

Основные недостатки программных пакетов для линеаментного анализа приведены на рисунке 1.7.

В заключение можно сказать, что несмотря на недостатки каждый пакет может применяться для исследований. Выбор конкретного программного пакета должен быть обусловлен задачами конкретного исследования. По нашему мнению, наиболее широкий спектр статистических характеристик полей штрихов и линеаментов представляет пакет LESSA.

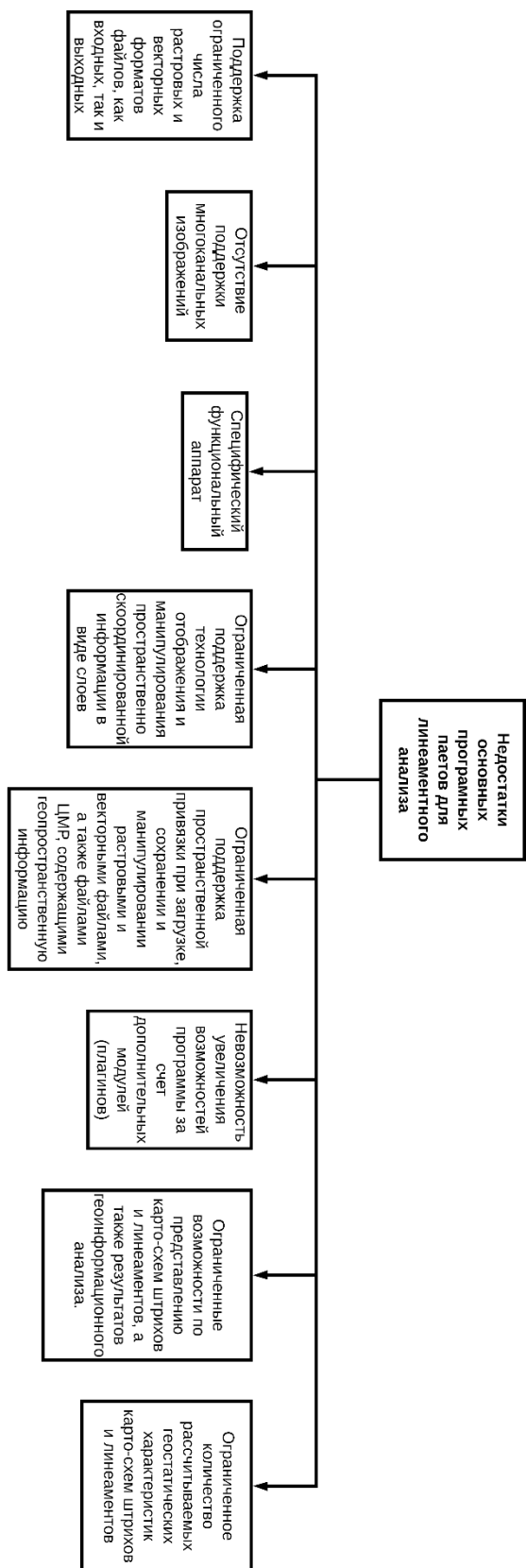


Рисунок - 1.7 Недостатки программных пакетов для линеamentного анализа

#### **1.4. Обзор результатов применения линеаментного анализа космических изображений земной поверхности для исследования экологического состояния, геодинамических процессов территории и прогнозной оценки природных ресурсов.**

Основы для линеаментного анализа была создана в работах геологов конца XIX века таких как М. Бертран, А.П. Карпинский, Т. Кьсрулф, Н.И. Андрусов, Э. Зюсс и многие другие. В начале XX века У. Хоббс обобщил их и сформулировал понятие линеамента. Дальнейшее развитие было приведено в работах Р. Зондера, Г. Штиллса, Б.А. Буша, Д.И. Гарбара, А.Г. Рябухина, В.Д. Скарятин, И.В. Флоринского, В.Е. Хаина и многих других.

Многие исследователи отмечают связь систем линеаментов с тектоническими разломами различных иерархических уровней [46, 14, 47]. Так же отмечают что точки пересечения линеаментов являются местами повышенной трещиноватости земной коры и как следствие местами развития современных эндогенных и экзогенных процессов [48, 2, 49]. В этих точка отмечается усиление перенесения флюидов и повышается возможность концентрации редких элементов [50, 49, 51]. В подобных местах зачастую отмечается и большее разнообразие ландшафтов.

При поиске нефти и газа основными объектами дешифрирования на космических изображениях являются линеаменты и кольцевые структуры. Установлено, что нефтегазоносные структуры во многих нефтегазоносных бассейнах контролируются региональными разломами или узлами пересечения разломов и линеаментов. Разрывные нарушения создают благоприятные условия для формирования структур, которые определяют характер распределения фаций и масштабов отложений, их гидрогеологические и другие свойства, способствующие накоплению углеводородов. При этом сетка линеаментов, отдешифрированная на космических изображениях, контролирует распределение тектонических структур и зоны трещиноватости, которые определяют коллекторные свойства горных пород. Например, в Восточно-Сибирской нефтегазоносной провинции около 70% локальных структур,

перспективных для поиска нефти и газа, приурочены к зонам региональных разломов. В Западно-Сибирской провинции на основе структурно-геоморфологического анализа космических изображений выявлена субширотная и субмеридианальная зональность. Крупные положительные структуры осадочного чехла контролируются субширотными зонами, а разделяющие их перемычки и седловины – субмеридианальными. Как известно, для нефтегазонакопления наиболее благоприятны линейные зоны растяжения. Такие зоны в виде линеаментов нередко хорошо проявлены на космических изображениях [52].

В последнее время повышенный интерес проявляется к связи современных геодинамических зон с аварийностью инженерных сооружений. Данные процессы могут привести к авариям на инженерных сооружениях и большим экономическим и экологическим потерям. Для территории Западной Сибири сделана попытка выяснить закономерности пространственного размещения нефтегазоносных объектов относительно дизъюнктивных систем. За основу взяты карты дизъюнктивов и плотностей их размещения для Западно-Сибирской плиты и смежных с ней территорий. В результате выяснилось, что существует пространственное совпадение и сходство ориентировки узлов плотности дизъюнктивов и зон нефтегазоносности. Выявлена также определенная приуроченность нефтяных и газоносных зон к площади разной плотности дизъюнктивов. Так, известные зоны преимущественного нефтенакпления пространственно совпадают с полями повышенной плотности дизъюнктивов, а преимущественного газонакопления – с площадями малой их плотности. Избирательная приуроченность нефтяных и газовых структур к полям различной плотности дизъюнктивов свидетельствует о том, что на площадях, где плотность локальных нарушений превышает некоторый оптимум, мала вероятность обнаружения крупных газовых залежей. Поэтому, используя преимущественную приуроченность зон газо и нефтенакпления к различным уровням плотности дизъюнктивов, можно карту, составленную на основе аэрокосмических дистанционных исследований, использовать для подтверждения и уточнения

известных карт прогноза нефтегазоносности. Использование автоматизированных методов дешифрирования линеаментов на космических изображениях открывает новые перспективы перед исследователями и практика [53, 54]. Это, в первую очередь, связано с достоверностью получаемых результатов, свободных от субъективных ошибок дешифрирования, что нередко приводило к прямо противоположным результатам при визуальном (или инструментально-визуальном) дешифрировании одного и того же космического изображения.

Прогнозирование зон развития трещиноватости, позволяет научно обоснованно спроектировать сетку и систему размещения горизонтальных скважин, обеспечивающим тем самым возможность интенсификации добычи нефти и увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН) месторождений является детализация изучения трещиноватости пород-коллекторов и разработка на этой основе залежей нефти горизонтальными скважинами.

Примерно 60% месторождений углеводородов приурочено к зонам повышенной трещиноватости. Она способствует повышению миграции флюидов, способной влиять на емкость и способность к фильтрации пород-коллекторов нефтегазоносных комплексов. При выделении подобных зон важно правильно интерпретировать выделенные линеаменты и связать их с стратиграфическими разделами [55].

Исследованиями ученых России показана эффективность использования космического метода изучения линеаментного поля земной коры для решения задач сейсмологии, которое реагирует на динамику напряженно-деформированного состояния коры в период подготовки землетрясения и после него [53, 56, 57]. Выполненные исследования в зоне разрыва Сан-Андреас (Калифорния, США) показали, что наиболее чувствительным индикатором является соотношение продольных и поперечных линеаментов. Реакция систем линеаментов на космических изображениях в зоне готовящегося сейсмического явления начинается за 2–3 месяца до землетрясения, достигая максимума в период 20 дней до него. При этом рост секущих (поперечных) линеаментов

закономерно опережает рост согласных (продольных) линеаментов [53, 56, 57]. Исследование напряженно-деформированного состояния земной коры в период подготовки Калининградского землетрясения показало, что наиболее информативной для целей прогноза землетрясения является общая картина предвестниковой динамики линеаментов разных направлений. Проведенные исследования продемонстрировали возможность получения информации о подготовке землетрясения с использованием космического сейсмического мониторинга на основе планомерного изучения динамики линеаментных систем. Было установлено господствующее развитие диагональной системы линеаментов, связанной с планетарной трещиноватостью, обусловленной ротационным механизмом планеты. На основании результатов линеаментного анализа разновременных рядов космических изображений выявлено постепенное увеличение радиуса деформаций, связанных с механизмом подготовки землетрясения. Развитие и применение системы космического сейсмического мониторинга в нефтегазоносных районах позволит накопить фактический материал по отработке и практическому использованию метода оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений путем слежения за динамикой линеаментных систем с использованием постоянно пополняемого (обновляемого) временного ряда космических изображений.

Однако следует отметить, что при функционировании нефтегазового комплекса страны имеется целый ряд нерешенных проблем по всем направлениям его деятельности (поиску месторождений нефти и газа, их освоению, добыче, транспортировке и переработке углеводородного сырья), которые связаны с негативным воздействием на природные экосистемы и качество окружающей среды.

Особую роль играют растущие антиклинальные складки. Подобные процессы являются тектонической аномалией, которая потенциально может быть связана с наличием месторождения. Помимо этого, требуется выделение блоковой структуры. Современные карты, построенные по сейсмическим профилям, зачастую не отображают многие разломы в силу редкой сети

профилей и их низкого пространственного разрешения. Линеаментный анализ космических изображений в свою очередь позволяет выделить большее число разноранговых разломов. «И, хотя положение каждого отдельного линеамента случайно, в совокупности они выстраиваются в гармоническую закономерную ассоциацию, отражающую напряженное состояние земной коры в изучаемом районе» [58].

Многие исследователи (В.И.Макаров, А.И.Полетаев, В.Н.Короновский, В.Г.Бондур, А.Т.Зверев, Я.Г.Кац) сходятся в том, что появление и развитие программ для автоматизированного линеаментного анализа позволяет повысить достоверность получаемых результатов.

### **Выводы по разделу**

Из выше изложенного следует, что теория и практика линеаментного анализа космических изображений в настоящее время находятся в стадии активного развития, а оценки взаимосвязи линеаментов и характеристик, исследуемых природных и антропогенных объектов и процессов, являются достаточно поверхностными и имеют качественный характер. Как следствие, специалисты придают первоочередное значение развитию других дистанционных методов решения природно-ресурсных и природоохранных задач. Например, методами спутниковой интерферометрии или при помощи специализированных сетей приёмников GPS; путём фиксации интенсивности тепловых потоков над изучаемыми территориями; с помощью мониторинга состояния ионосферы, ледового покрова водоёмов и др. Вместе с тем, по мнению автора, потенциал линеаментного анализа космических изображений при решении природно-ресурсных и природоохранных задач далеко не исчерпан. Дальнейшее развитие соответствующих методов и методик способно существенно повысить роль изучения линеаментов при решении указанных задач. Знание особенностей линеаментной тектоники региона дает возможность более точного прогноза месторождений углеводородов.

## **2. Методика автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.**

### **2.1. Физическая природа штрихов и линеаментов, выявляемых при линеаментном анализе космических изображений земной поверхности.**

При анализе физической природы линеаментов, выявляемых и статистически обрабатываемых при автоматизированном линеаментном анализе космических изображений необходимо различать физическую природу штрихов (линейных элементов ландшафта) и протяженных (сквозных) линеаментов. Если физическая природа первых, как будет показано ниже, не вызывает особых возражений, то физическая природа последних широко дискутируется в научной литературе.

Физическая природа штрихов легко устанавливается при сравнительном анализе топографической карты и схемы штрихов, полученной при автоматизированном линеаментном анализе космических изображений. На космических изображениях достаточно четко видно, что большинство штрихов совпадает с линейными элементами речных долин и овражно-балочных систем. Это не случайность, т.к. прямолинейные эрозионные формы рельефа, к которым относятся речные долины, овраги и балки обычно приурочены к зонам растяжения и наибольшего дробления горных пород, которыми являются зоны разрывных нарушений и трещин. Подобное соответствие полей элементарных линейных элементов (штрихов) космического изображения с гидросетью отмечалось и ранее [54, 59]. Таким образом, физическая природа штрихов, выявляемых при автоматизированном линеаментном анализе космических изображений вполне очевидна – на снимках высокого разрешения они в основном связаны с линейными объектами, а при низком разрешении (250 м и хуже) предположительно с линейными элементами морфоструктуры. Данное обстоятельство вполне объяснимо, т.к. связано с линейными размерами выделяемых штрихов. Штрихи в программе «LESSA» имеют размер по

умолчанию 10 пикселей, что при пространственном разрешении 30 м соответствует не местности 300 метрам, а при разрешении 250 метров соответствует 2,5 километрам. Поэтому в первом случае большинство линейных элементов ландшафта связано с овражно-балочными системами и с прямолинейными участками малых рек. Во втором случае линейные элементы ландшафтов составляют по протяженности более 2,5 километров, что уже соответствует прямолинейным отрезкам крупных рек, форм рельефа и геологических структур (разрывных и складчатых).

Протяженные линеаменты, выделяемые при автоматизированном линеаментном анализе космических изображений, прослеживаются на больших отрезках изображений или пересекают его полностью, от чего и получили название сквозных линеаментов. Физическая природа протяженных линеаментов, выделяемых на космических изображениях при визуальном и автоматизированном дешифрировании, дискутируется давно – есть как активные сторонники их реального существования, так и активные противники.

Активные сторонники линеаментов (Макаров, Трофимов, Бондур, Михайлов, Кац, Анохин, Егоров, Гончаров, Жирков, Каттерфельд, Нечаев, Шульц и др.) имеют различные представления о их физическом смысле. Основные из этих представлений показаны на рисунке 2.1.

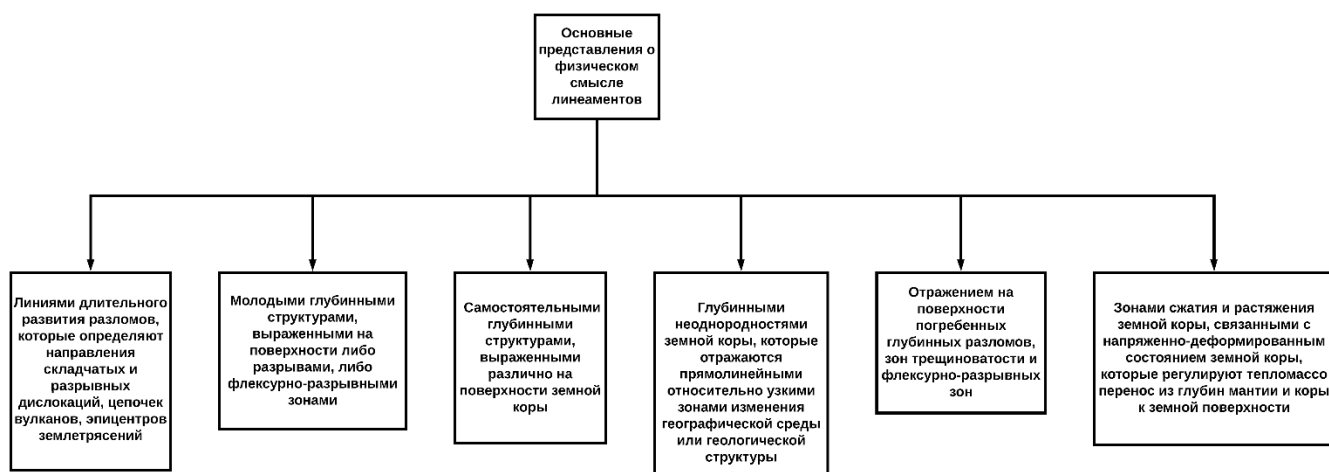


Рисунок - 2.1 Основные представления о физическом смысле линеаментов

Я.Г. Кац с коллегами предложили объединить линеаментные сообщества в зоны, системы и поля, различающиеся степенью плотности, упорядоченностью, доминирующими простираниями линеаментов и морфологией [4]. Зоны – это узкие протяженные концентрации линеаментов. Системы – это закономерные сочетания разноориентированных линеаментных зон. Поля – это закономерные сочетания различно ориентированных линеаментных систем. По мнению Я.Г. Каца с коллегами, линеаменты и их сообщества характеризуют дискретность земной коры [4] и дают представление о строении глубинных уровней земной коры.

В настоящее время при геодинамическом районировании широко используется морфоструктурное районирование с выделением сейсмических и асейсмических узлов морфоструктурных линеаментов [60, 61, 62].

Морфоструктурные линеаменты – это линейные зоны, ограничивающие блоки земной коры.

Морфоструктурные блоки – это территория, в пределах которой все статистические показатели признаков существенно не изменяются.

Активные противники реального существования в земной коре линеаментов, дешифрируемых на космических изображениях, основывают свою позицию как частое несоответствие выделяемых линеаментов известным зонам разрывных нарушений и трещин, а также несоответствие схем линеаментов, составленных разными исследователями на одну и ту же территорию. Особенно это касается работ, проводимых на платформах. В горно-складчатых областях выделяемые линеаменты легче идентифицировать, т.к. «разломы и контакты в структурно-вещественных комплексах нередко обнажены и прослеживаются местами в виде активных современных тектонических нарушений» [63].

Следует отметить, что при интерпретации результатов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений с использованием программы LESSA для выделения сквозных линеаментов, бывает весьма затруднительно выбрать тот предел обобщения (порог) линеаментов, максимально соответствующий разломам, известным по наземным

полевым и геофизическим исследованиям. Все зависит от порога и от размеров окна, в котором производится выделение линеаментов. Поэтому как отмечают Н.В. Короновский с коллегами [63], у разных авторов нередко получаются совершенно различные результаты.

Учитывая все вышеизложенное при проведении данного диссертационного исследования, при решении выше поставленных задач, использовалась в основном статистическая информация о полях штрихов. Информация о сквозных линеаментах использовалась лишь при геодинамическом районировании.

## **2.2. Особенности использования космических изображений и цифровых моделей рельефа (ЦМР) в линеаментном анализе.**

В данном разделе обсуждается вопрос о целесообразности и специфике информации, получаемой при автоматизированном линеаментном анализе космических изображений и цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Основная цель линеаментного анализа, имеющая научное и практическое значение, — выявление зон трещин и разрывных нарушений, которые являются зонами максимальной проницаемости и динамики земной коры и поэтому во многом обуславливают закономерность размещения месторождений полезных ископаемых (в том числе и углеводородов), развитие эндогенных (землетрясений, вулканов, деформаций земной поверхности и др.) и экзогенных (эрозионных, оползневых, карстовых, суффозионных и др.) негативных процессов [64, 65].

Прежде чем перейти к рассмотрению различных потенциальных возможностей выявления линеаментов по снимкам и ЦМР, проанализируем прямые и косвенные дешифровочные признаки зон разломов и трещин и установим, какие из них проявлены на снимках, а какие — в ЦМР. Результаты данного анализа покажут возможности и ограничения применения снимков и ЦМР при линеаментном анализе. Общими признаками зон разрывных нарушений и трещин является их линейность,

проявленная в различных элементах ландшафта. Для выявления региональных зон разрывных нарушений и трещин и прослеживания их по простиранию необходима большая обзорность и генерализация карт и снимков. Это достигается использованием более мелкомасштабных карт и космических снимков со средним и низким пространственным разрешением.

Анализ и обобщение, опубликованных научных работ [66, 67, 68, 6, 69, 70] позволили провести следующую классификацию прямых и косвенных дешифровочных признаков разрывов.

К прямым геологическим признакам наличия разрывных дислокаций (зон разрывных нарушений и трещин) относят:

- нарушение сплошности геологической структуры; смещение в плане фотомаркирующих слоев горных пород или горизонтов, вдоль какой-либо прямой или слегка изгибающейся линии;
- нарушение условий залегания слоев горных пород, т.е. заметное или резкое изменение простирания их по одной линии и т. п.;
- наличие зон трещин, смятия, брекчирования, расланцевания, линейное проявление магматизма, вулканизма, эпицентров землетрясений, термальных водных источников, дегазации.

К косвенным признакам наличия зон разломов и трещин относят ряд геоморфологических, гидрогеологических и геоботанических индикаторов.

К геоморфологическим косвенным признакам отнесены:

- тектонические прямолинейные уступы или тектонические подножия склонов, вдоль которых обычно проходит прямолинейная граница между коренными и рыхлыми породами, тектонические долины и котлованы, окаймленные крутыми уступами;
- узкие прямолинейные или слабоизогнутые гряды и гребни, образованные дайковыми или жильными телами магматических пород, заполняющими полости разрывов, иногда прослеживаются по фототону как узкие светлые (кислые и средние породы) или, наоборот, темные (основные породы) полосы;

- прямолинейные ложбины или эрозионные борозды, поперечные уклону склона; резко выраженные в рельефе седловины на водоразделах, вытянутые в одну линию;
- спрямленные участки речных русел, долин, временных водотоков или повторяемость спрямления водных потоков под определенным углом; коленообразные изгибы рек; прямолинейная направленность противоположных боковых притоков, составляющих вместе единое направление; смещение гидросети вдоль протяженной линии; линейное расположение озерных впадин, заболоченных участков, карстовых воронок, оползневых склонов; спрямленные линии морских и озерных берегов и болотных котловин;
- прямолинейные резкие границы между различными формами рельефа или природными ландшафтами.

К гидрогеологическим косвенным признакам отнесены:

- линейное расположение родников и источников (особенно в аридных районах);
- более четкое проявление полос подземного стока, которые в зоне нарушения сплошности горных пород более обводнены и выделяются на снимках более темным фототоном.

К геоботаническим признакам относится:

- приуроченность к зонам разрывных нарушений и трещин более густой или влаголюбивой растительности, что связано с обводнением этих участков, а также более благоприятными условиями почвообразования.

Перечисленные прямые геологические и косвенные признаки по простиранию разрывных зон могут сменять друг друга. Все эти изменения в их непрерывной последовательности требуют одновременного использования снимков различных уровней генерализации — от детальной и локальной до микро- и макрорегиональной. В целом круто падающие нарушения дешифрируются и выявляются надежнее, чем пологие.

Как видим, ни один из перечисленных прямых геологических и косвенных гидрогеологических и геоботанических признаков наличия зон трещин и разрывных нарушений не может быть выявлен по ЦМР. Геоморфологические признаки при наличии высокого пространственного разрешения в значительной степени могут быть отражены в ЦМР, но они также проявлены и на снимках, при этом мелкие формы рельефа на снимках высокого разрешения выявляются вполне надежно, а по ЦМР их выделение достаточно проблематично. Таким образом, практически ко всем признакам линеamentный анализ целесообразнее проводить по снимкам, а не по ЦМР. Более того, дизъюнктивные дислокации по снимкам выявляются гораздо более уверенно и полнее, чем по ЦМР.

По разным источникам информации выявляются разные системы разрывных дислокаций, отличающихся кинематикой, динамикой, иерархическими уровнями, возрастом и другими признаками. Поэтому в геологии уже с середины XX столетия существует классификация (разделение) разрывных зон, выделяемых по геологическим, геохимическим, почвенным, геоботаническим и другим картам [4]. ЦМР относится к источнику информации, который аналогичен топографическим картам соответствующего масштаба. Аэрокосмоснимки относятся совершенно к другому типу источника информации, т.к. в них задействован весь комплекс прямых и косвенных признаков проявления в ландшафте индикаторов зон трещин и разрывных нарушений геологической среды. Для иллюстрации данного положения проведем экспериментальные работы с целью показа принципиально различных возможностей ЦМР и космических снимков. В качестве исходных материалов используем ЦМР (разрешение 90 м/пиксель), полученную с SRTM, и космические зональные изображения, полученные с Landsat-7 (разрешение 30 м/пиксель). В качестве тестового участка возьмем территорию Краснополянского округа Большого Сочи с долиной р. Мзымты, заложенной в Краснополянском грабене [71]. Горные хребты и притоки р. Мзымты имеют преимущественно общекавказское северо-западное

направление, а Краснополянский грабен относится к поперечным разрывным дислокациям. Наличие продольных и поперечных линеаментов, выраженных в орографии и ландшафте, позволяет объективно оценить возможности ЦМР и космических изображений для изучения линеаментной тектоники. На рис. 2.2 приведены ЦМР и основные статистические показатели линеаментов, выявленные при автоматизированном линеаментном анализе ЦМР. На рис. 2.2а хорошо видны горные хребты и секущий их прямолинейный отрезок р. Мзымты, заложенный в Краснополянском грабене. Грабен имеет протяженность 15 км; ширину 2–3 км. Сквозные линеаменты при пороге 60 (рис. 2.2 б) и 70 (рис. 2.2 в) имеют разные простирания с наличием как общекавказских северо-западных, так и косесекущих субширотных направлений. Из поперечных линеаментов четко проявлен Краснополянский разлом, пересекающий по диагонали весь тестовый участок. Линии вытянутости роз-диаграмм штрихов (рис. 2.2г) имеют общекавказское северо-западное простирание. Распределение плотности штрихов (рис. 2.2д) также в целом контролируется основными орографическими и геологическими структурами Кавказа. Лишь на хребте Аибга (левобережье р. Мзымты) намечаются аномальные участки плотности штрихов, ориентированные в северо-восточном направлении. На рис. 2.3 приведено синтезированное космическое изображение, полученное с использованием вегетационного индекса NDVI и результаты его автоматизированного линеаментного анализа. На синтезированном изображении четко прослеживаются р. Мзымта и ее прямолинейный отрезок, приуроченный к Краснополянскому грабену. Хорошо видны горные хребты общекавказского северо-западного простирания. Сквозные линеаменты при пороге 60 (рис. 2.2б) имеют преимущественно поперечные по отношению к горным хребтам северо-восточные направления с наличием подчиненных северо-западных и субширотных простираний. При пороге 70 (рис. 2.3в) проявлены лишь поперечные северо-восточные линеаменты.

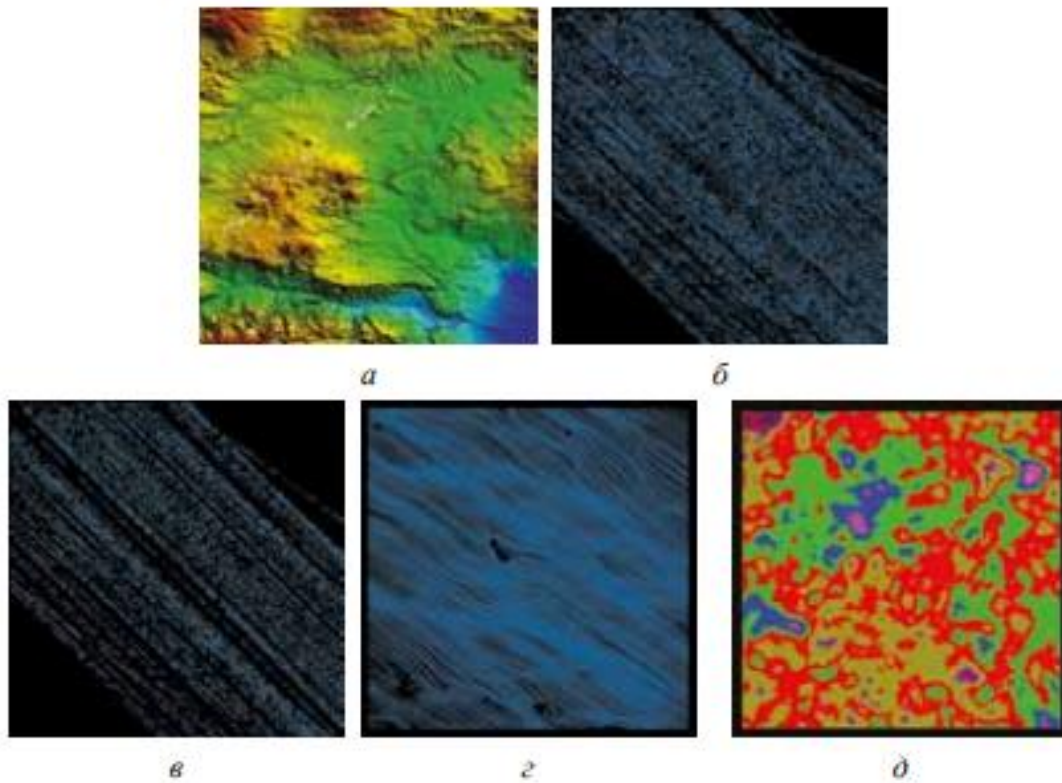


Рисунок - 2.2 а - Цифровая модель рельефа, б - сквозные линеаменты при пороге 60, в – сквозные линеаменты при пороге 70, г - линии вытянутости, д – общая плотность штрихов

Данные направления преобладают также в распределении плотности штрихов (рис. 2.3 д). Результаты автоматизированного анализа ЦМР и космических изображений показали, что при их использовании выявляются линеаменты разных типов. При использовании ЦМР (по орографическим элементам) выявляются в основном продольные линеаменты, отвечающие общекавказскому направлению. При использовании космических изображений по ландшафтным индикаторам выявляются в основном секущие линеаменты, осложняющие основные геологические структуры. Таким образом, выполненные экспериментальные работы подтвердили вывод о том, что, во-первых, при использовании разных первичных материалов (аэрокосмических, топографических, геофизических и др.) выявляются разрывные дислокации разных типов и иерархических уровней. Во-вторых, для наиболее полного и достоверного их выявления необходимо

комплексное использование имеющихся съемочных, картографических и других материалов, т.к. каждый из данных видов информации позволяет выявить лишь те линеаменты, которые проявлены в соответствующих ландшафтных, топографических, геофизических, геохимических и других природных полях.

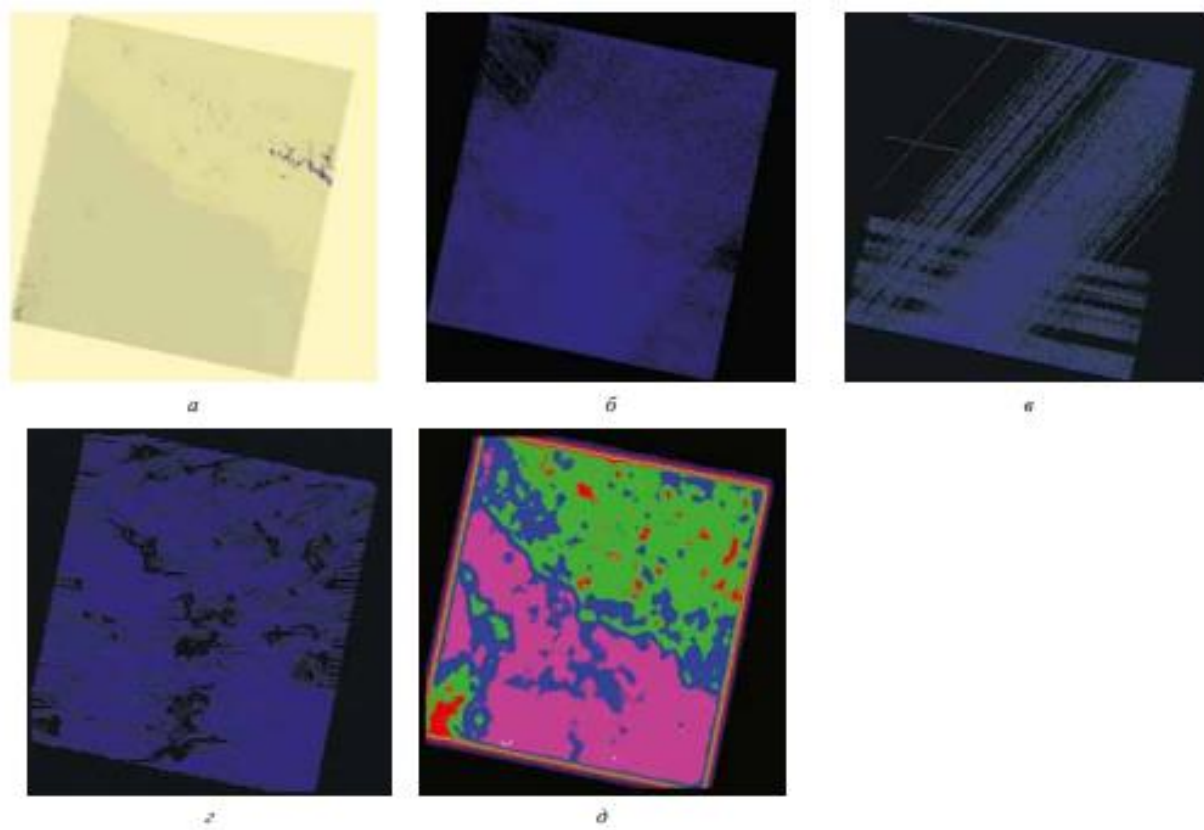


Рисунок 2.3 а - вегетационный индекс NDVI, полученный по снимку Landsat-7, б - сквозные линеаменты при пороге 60, в - сквозные линеаменты при пороге 70, г - линии вытянутости роздиаграмм, д - плотность штрихов

### **2.3. Методика автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохраных задач.**

Разработанная методика использования автоматизированного анализа космических изображений для решения природно-ресурсных задач охватывает все типы природных ресурсов местоположение и состояние которых связано с линеаментами — зонами разрывных нарушений, трещиноватости и дробления

горных пород. Прежде всего это касается месторождений полезных ископаемых (рудных, нерудных, углеводородных, подземных вод и др.), а также земельных ресурсов, сохранность которых зависит от развития современных геодинамических процессов (оползней, карста, эрозии, землетрясений и др.). Как правило, образование месторождений и развитие современных геодинамических процессов связано не со всеми имеющимся в районе семейством линеаментов, а с линеаментами определенных простираний. Поэтому главнейшая задача, стоящая перед исследователем — обнаружить связь природно-ресурсных объектов с линеаментами определенных простираний и на этом основании осуществить прогноз на наличие месторождений или мест развития современных геодинамических процессов, влияющих на сохранность земельных водных и других ресурсов.

Разработанная технологическая схема автоматизированного линеаментного анализа космических изображений земной поверхности для решения природно-ресурсных и природоохранных задач представляющая собой системный набор этап (процедур) обработки многозональных космических изображений земной поверхности, показана на рис. 2.4.

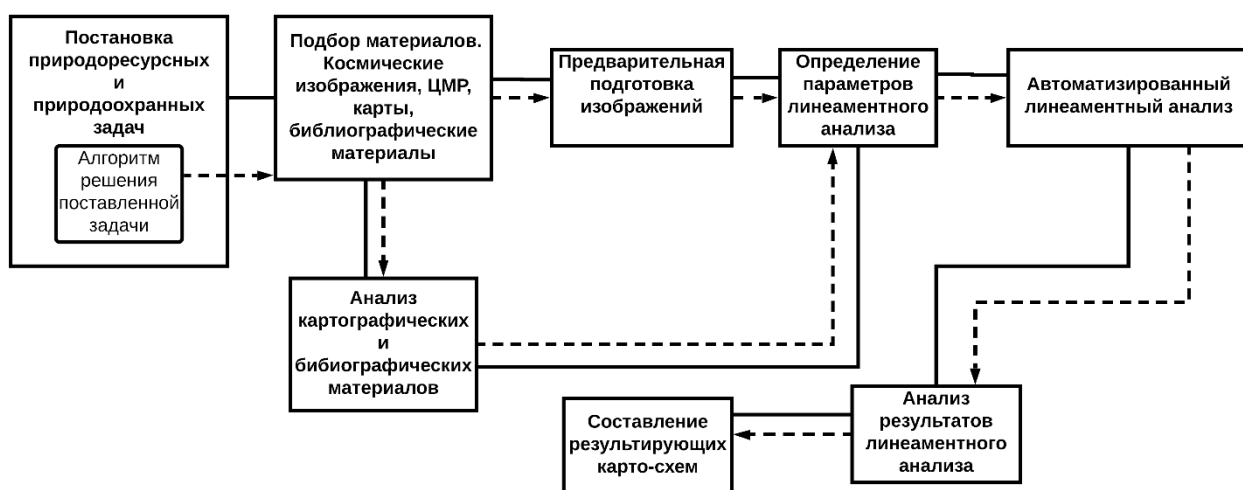


Рисунок – 2.4. Методика автоматизированного линеаментного анализа космических изображений.

**Блок «Постановка природно-ресурсных и природоохранных задач».**

Определение цели и задач планируемых исследований, исходя из требований

заказчика или поставленной научно-практической проблемы, требующей теоретического и экспериментального исследования. При этом практически единственным ограничением для использования линеаментного анализа космических снимков является необходимая связь исследуемых объектов и процессов с зонами максимальной проницаемости земной коры (зоны разломов, трещин и узлы их пересечения) и путями миграции водных и газовых растворов (глубинные флюиды, трещинные подземные воды и прочее).

**Блок «Подбор материалов».** Подбор картографических и библиографических материалов и космических изображений. В данном блоке подбирается необходимая информация о районе работ –

- карты или описания явлений и процессов;
- карты или описание местности;
- карты или описание геологии;
- подходящие космические изображения или цифровые модели рельефа.

**Блок «Подготовка изображений».** Предварительной обработкой исходных материалов и включает в себя геометрическую, атмосферную и фотограмметрическую коррекцию, синтез и генерализация изображений.

При решении ряда задач достаточно использования разовой космической съемкой с получением снимков среднего или высокого разрешения. Это целесообразно при выявлении оползневых склонов, прогнозе месторождений полезных ископаемых, оценке приуроченности карстовых воронок к зонам разломов.

Однако, в целом ряде случаев использование снимков с разным пространственным и спектральным разрешением необходимо. Это прежде всего относится к изучению проблем, связанных с геодинамическим районированием, одной из задач которого является выделение блочной структуры земной коры на разных иерархических уровнях ее организации (глобальном, региональном, локальном, детальном). Совершенно очевидно, что при изучении динамики процессов необходимо использовать разновременные космические снимки.

Помогающие выделить закономерности и направленности развития процессов в пространстве и времени.

**Блок «Анализ картографических и библиографических материалов».**

Оценка района проведения работ по имеющимся материалам. Анализа космических снимков совместно с картографическими и литературными источниками и данными полевых исследований, если последние проводились. Главная цель использования картографических и литературных материалов и полевых данных – выделение эталонных и тестовых участков, на которых имеются объекты, явления и процессы, аналогичные исследуемым. Это позволяет проанализировать связи статистических показателей штрихов и сквозных линеаментов с ними.

**Блок «Определение параметров линеаментного анализа».** Определение входных параметров для линеаментного анализа, определение основных направлений морфоструктур и орографических элементов. Выбор диагностических статистических показателей штрихов и сквозных линеаментов, связанных с изучаемыми объектами, явлениями и процессами, вначале на эталонных участках, а затем проверка установленных закономерностей на тестовых участках.

Эти диагностические статистические показатели являются индикаторами изучаемых объектов, и их наличие в изучаемом районе указывает на присутствие в нем этих объектов. На этом строится прогноз. При прогнозе учитываются особенности строения эталонных и тестовых участков и их соответствие с исследуемой территорией. В случае несоответствия в ряде случаев прогноз сделать невозможно. В данном случае необходимо подобрать эталонные и тестовые участки сходные строением с исследуемой территорией.

Чтобы получить реальную картину статистических характеристик линеаментов важно выбрать минимальную длину штриха, набор необходимых направлений (от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ), диапазон возможного разброса углов для каждого направления.

В данной работе использован осредненный разброс  $22,5^\circ$ . При размере скользящего окна  $10 \times 10$  пикселей, размер изображения составлял от  $500 \times 500$  до  $2000 \times 2000$  пикселей, т.к. на изображениях большего размера часть линеаментов не выражена из-за дугообразной формы. Скользящее окно должно быть сопоставимо размерами с искомым объектом. Использование космических снимков с разным пространственным разрешением приводит к существенному изменению набора и направления штрихов. Так, например, использование высокого разрешения приводит к тому что вместо общей линии русла реки выделяются старицы, меандры, прирусловые валы. Таким образом при тщательном подходе к выбору и анализу исходных данных и параметров расчета появляется возможность получить объективные данные о системах штрихов разных иерархических уровней. Которые отображают строение территории и связь штрихов с разномасштабными объектами и процессами.

Выбор порога выделения сквозных линеаментов. Чем выше порог, тем меньше наблюдается проявленных на снимке сквозных линеаментов. е подбираются такие системы линеаментов, которые в наибольшей степени соответствуют особенностям строения территории. Иногда используются линеаменты, проявленные при разных порогах. Так, например, при прогнозе землетрясений использование сквозных линеаментов проявленных при разных порогах позволило разделить землетрясения разной интенсивности и выдвинуть предположение о реальной возможности разработки методики прогноза силы готовящегося землетрясения [54].

**Блок «Линеаментный анализ»** проведение линеаментного анализа по заданным в предыдущем блоке параметрам. Получение:

- полей плотности штрихов как по всей совокупности, так и определенных простираний при разных уровнях генерализации исходных данных. Данные схемы, особенно схемы определенных простираний, в целом ряде случаев могут использоваться как конечный результат автоматизированного линеаментного анализа. Как будет показано далее, именно схемы плотности штрихов

использованы в этой работе при прогнозе нефтегазовых месторождений, трещинных подземных вод и оползневой опасности;

- роз-диаграмм штрихов и их производных (средние направления роз, линии вытянутости, сходство розы с крестом и прочее) при разных уровнях генерализации. Розы-диаграммы и их производные использованы в данной работе для геодинамического районирования и выявления блочной структуры земной коры на разных иерархических уровнях ее развития;
- получением схем и роз-диаграмм сквозных линеаментов. Несмотря на дискуссионность вопроса достоверность выделения протяженных линеаментов на космических снимках [63], они могут быть с успехом использованы при анализе морфоструктурных линеаментов и для геодинамического районирования. В наших исследованиях сквозные линеаменты использованы для определения путей миграции аллювиальных подземных вод.

**Блок «Анализ результатов линеаментного анализа».** Прогнозные карты составляются на основе наличия на исследуемой территории диагностических статистических показателей – индикаторов. Примером подобных прогнозных карт в данной диссертационной работе являются прогнозы нефтегазовых месторождений и оползневой опасности.

В основе методики составления карт геодинамического районирования лежит другой признак – анизотропность, то есть отличие физических свойств, в нашем случае это ориентировка штрихов в разных простираний.

Нередко блоки земной коры отличаются ориентировкой дизъюнктивов – разломов и трещин. Это отражается в рисунке роз-диаграмм штрихов. Контуры полей, отличающиеся ориентировкой и размерами лучей роз-диаграмм, соответствуют границам блоков земной коры. Используя данные с разным пространственным разрешением, можно выделить блоки, относящиеся к разным уровням организации земной коры и разным иерархическим уровням. Данный

теоретический вывод положен нами в основу геодинимического районирования, осуществленного в данной диссертационной работе на примере БАМ.

**Блок «Составление результирующих схем».** Составление прогнозных природно-ресурсных и природоохранных карт и геодинимического районирования.

Предложенная методика является универсальной. Однако, для повышения ее эффективности и скорости работы данную методику можно адаптировать под конкретные задачи при помощи специальных алгоритмов. Пример подобной адаптации представлен на рисунке 2.5 и описан в разделе 3.

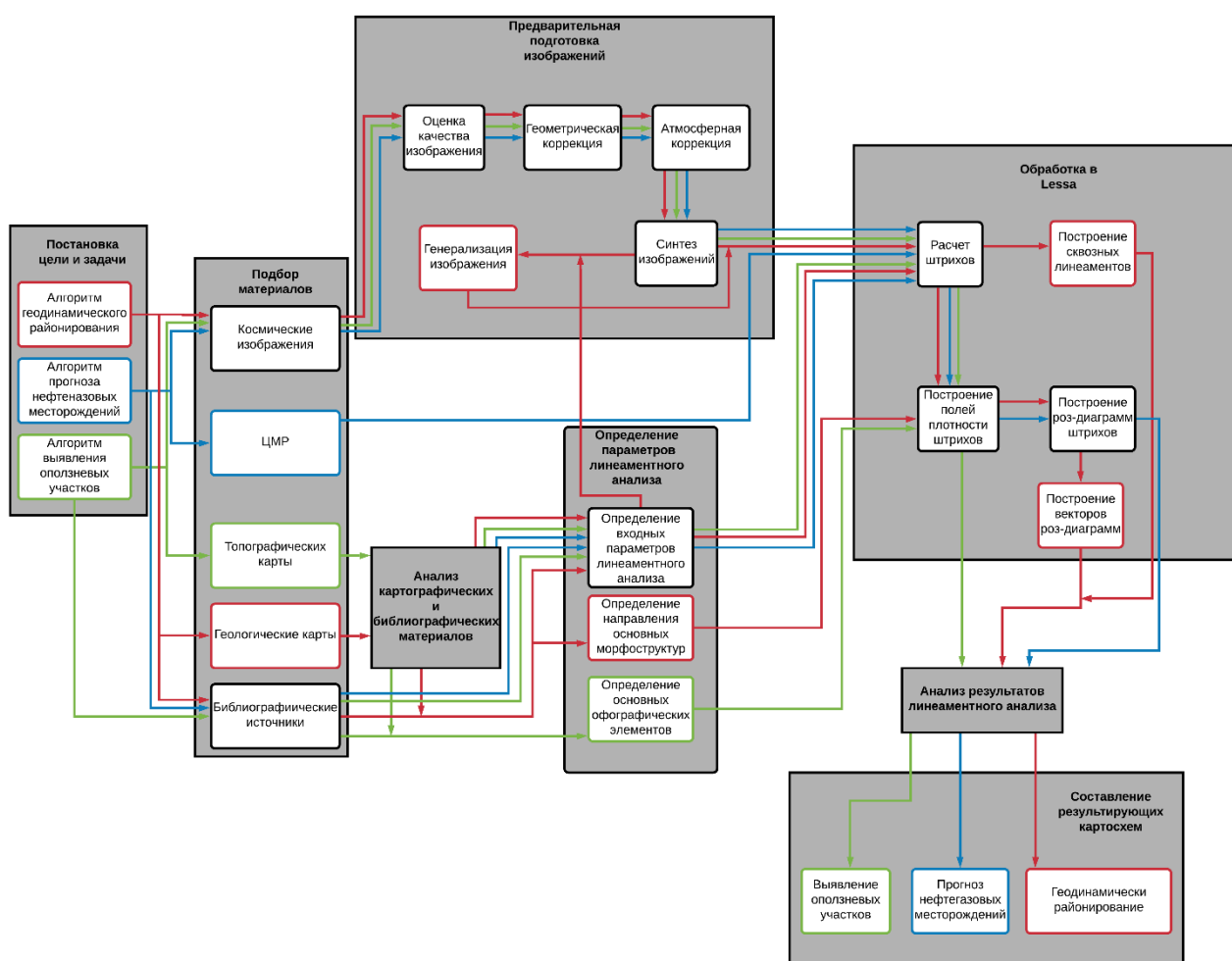


Рисунок 2.5 Схема методики автоматизированного линеamentного анализа адаптированной при помощи алгоритмов. Красный цвет – алгоритм геодинимического районирования. Синий – алгоритм прогноза нефтегазовых месторождений. Зеленый – алгоритм выявления оползневых участков.

## **Выводы по разделу:**

Как показал анализ научных исследований, выполненных с использованием различных программ линеаментного анализа при интерпретации результатов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для выделения сквозных линеаментов, бывает весьма затруднительно выбрать тот предел обобщения (порог) линеаментов, максимально соответствующий разломам, известным по наземным полевым и геофизическим исследованиям. Все зависит от порога и от размеров скользящего окна, в котором производится выделение линеаментов. Поэтому как отмечают Н.В. Короновский с коллегами [63], у разных авторов нередко получаются совершенно различные результаты.

Кроме того, наши исследования показали, что при обработке ЦМР выявляются лишь линеаменты, которые выражены в рельефе. При использовании же космоснимков выявляются все зоны трещиноватости и разломов, выраженные в ландшафтах, в том числе кроме рельефа в почвенном и растительном покрове и в горных породах. Поэтому использование только ЦМР при решении задач природно-ресурсной и экологической направленности во многих случаях бывает неэффективным.

Обзор результатов прогноза залежей различных типов природных ресурсов с использованием линеаментного анализа космических изображений показал, что в качестве индикаторов наличия залежей могут быть использованы различные наборы статистических показателей развития поля штрихов и линеаментной (разрывной) тектоники (плотность штрихов, плотность линеаментов, роз диаграммы штрихов и линеаментов и другие).

Представленная выше адаптивная методика автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач позволяет провести исследования особенностей штриховых и линеаментных полей для конкретно рассматриваемой задачи.

### **3. Практическое применение разработанной методики для решения различных природно-ресурсных и природоохранных задач.**

#### **3.1. Алгоритм автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для оценки перспективности территории на нефтегазоносность.**

Многолетние исследования показали, что количество зон трещиноватости и разрывных нарушений на единицу площади является одним из наиболее значимых критериев оценки перспектив нефтегазоносности [72, 73, 74, 75]. С появлением компьютерных технологий обработки космических снимков появилась возможность быстрого, полного и объективного получения сведений по разрывной тектонике. С этой целью используется автоматизированный линеаментный анализ космических снимков.

Впервые автоматизированный линеаментный анализ для поисков нефтегазовых месторождений использован в конце XX в. на территории Йемена с помощью программного пакета LESSA [75]. В качестве статистических показателей развития линеаментной тектоники использованы общая плотность штрихов, степень отличия роз-диаграмм штрихов от круга и вектор направленности роз-диаграмм. Были выявлены интервалы величин данных статистических показателей, совпадающие с известными месторождениями нефти. Эти интервалы принимались за индикаторы возможного наличия залежей нефти.

Прогноз на наиболее вероятные местоположения месторождений нефти делался на основе выявления мест совпадений всех трех индикаторов. Однако экспериментальной проверки данный метод прогноза не прошел. Как наши показали более поздние исследования, главное значение имеет не общее количество, а плотность трещин и разломов, определенных простираний.

Для проверки данного утверждения был проведен автоматизированный линеаментный анализ трех месторождений Северного Кавказа. Проверка проводилась при помощи специального алгоритма проведения линеаментного анализа, представленного на рисунке 3.1.

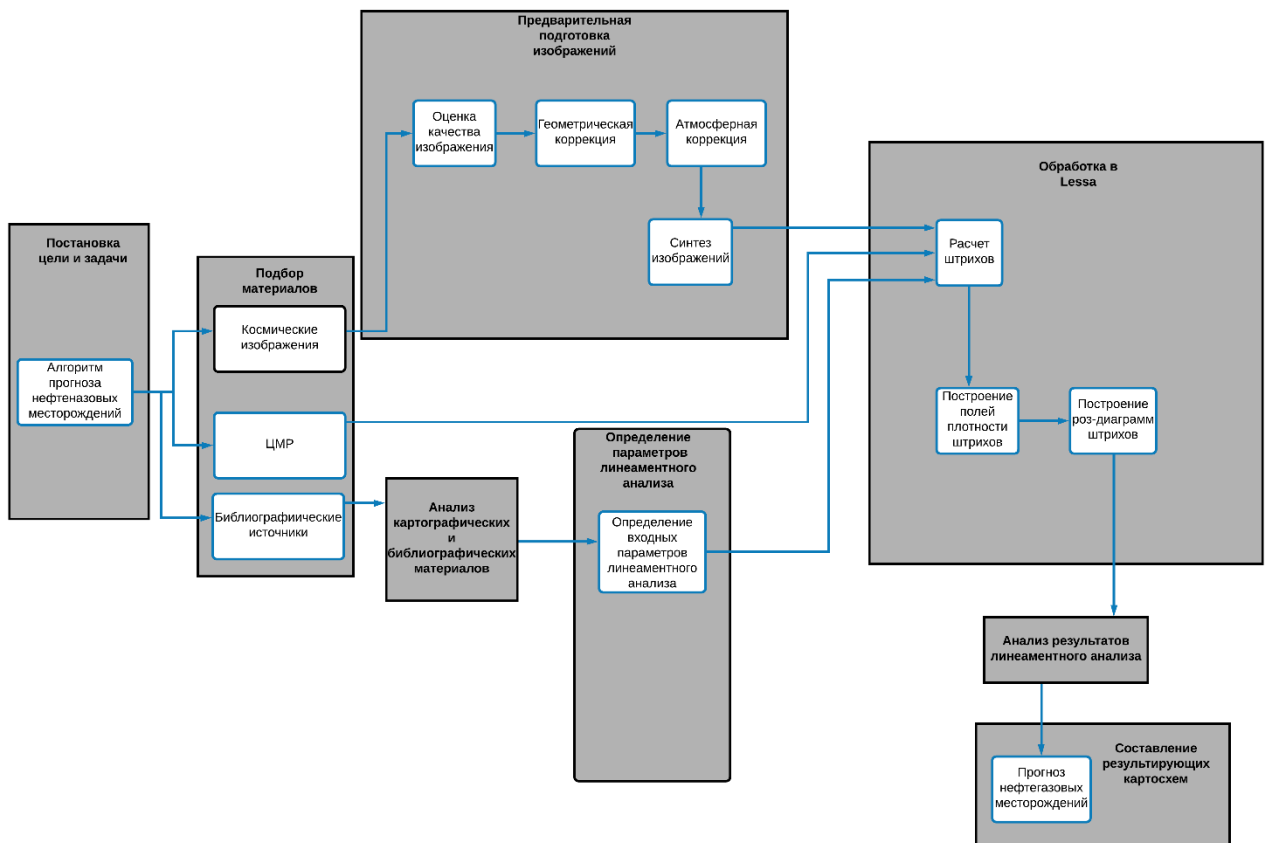


Рисунок - 3.1 Алгоритм поиска нефтегазовых месторождений с использованием линеamentного анализа космических снимков.

Первое из них Журавское нефтегазовое месторождение (северо-восточная часть Ставропольского свода). Месторождение хорошо разбурено. Добывается газ, разрабатываются расположенные ниже по стратиграфическому разрезу палеогеновых отложений залежи нефти. Нефтяные и газовые залежи, залегающие на глубине около 2000 м, расположены к северо-востоку от п. Журавское в северо-восточном углу карты масштаба 1:100 000 (листа L-38-99).

В эксперименте использовалась программа LESSA, зональные космические снимки Landsat-7 (ETM+), имеющие пространственное разрешение 30 м/пиксель, цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM с разрешением 90 м/пиксель и топографическая карта масштаба 1:100 000 (L-38-99).

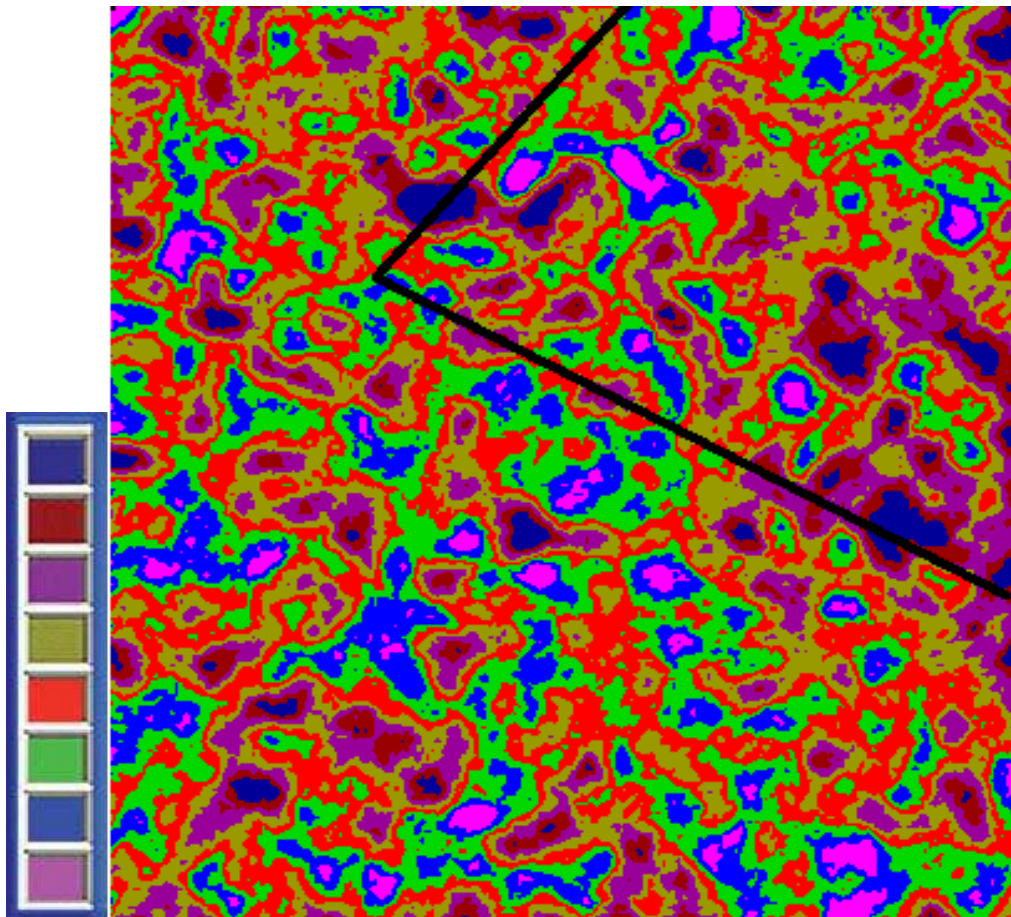


Рисунок 3.2 Общая плотность штрихов, выделенных по снимку, для Журавского месторождения со шкалой плотности штрихов. Черной линией оконтурена территория месторождения.

Выполнен автоматизированный линеаментный анализ ЦМР и синтезированного космического изображения Landsat-7, полученного при синтезе спектральных каналов зеленого, красного и среднего ИК (1,55–1,75 мкм) диапазонов. Это позволило не только выявить индикаторные статистические показатели линеаментов, но и провести сравнительный анализ результатов, получаемых при линеаментном анализе снимков и ЦМР. В результате обработки снимка и ЦМР получены схемы плотности штрихов как общей (по всем простираниям), так и для каждого простирания отдельно (осреднение  $22,5^\circ$ ):  $0^\circ$  (1);  $22,5^\circ$  (2);  $45^\circ$  (3);  $57,5^\circ$  (4);  $90^\circ$  (5);  $112,5^\circ$  (6);  $135^\circ$  (7)

и 157,5<sup>0</sup>(8). Схемы приведены на рисунках 3.2, 3.3, 3.4 для снимка, и 3.6, 3.7, 3.8 для ЦМР. Черными линиями околтурена территория месторождения.

Полученные схемы плотности штрихов сравнивались со схемами пространственного расположения залежей углеводородов Журавского месторождения. На схемах суммарной плотности штрихов всех простираций, выявленных при автоматизированной обработке космического изображения и ЦМР, аномалии плотности (максимальная и минимальная), как и ее среднее

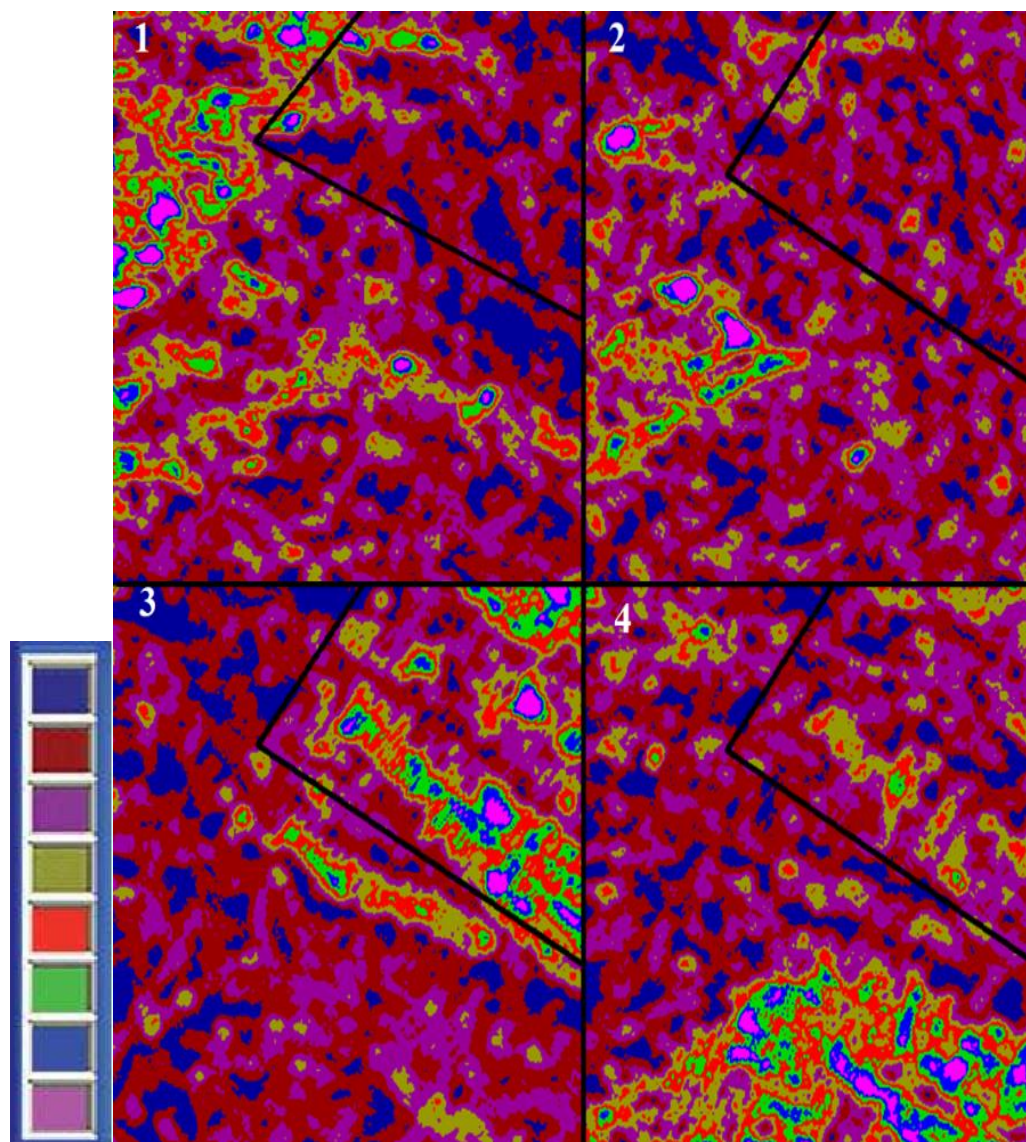


Рисунок - 3.3 Плотность штрихов 1,2,3 и 4 простираций со шкалой плотности штрихов. Черными линиями околтурена территория месторождения.

значение, не имеют видимой связи с залежами углеводородов. Аномалии плотности штрихов достаточно равномерно распределены по всей площади.

Подобный же бессистемный характер имеют штрихи с простираниями:  $0^{\circ}$  (1);  $22,5^{\circ}$  (2);  $45^{\circ}$  (3);  $57,5^{\circ}$  (4);  $90^{\circ}$  (5);  $112,5^{\circ}$  (6);  $135^{\circ}$  (7) и  $157,5^{\circ}$  (8). Закономерная связь распределения плотностей штрихов с месторождением наблюдается при ориентировках  $45^{\circ}$  и  $135^{\circ}$ , выявленных при обработке синтезированного космического изображения. Первое направление является поперечным (перпендикулярным) к основным орографическим элементам, а второе совпадает с направлением орографических элементов. При этом наибольшая плотность штрихов с направлением  $45^{\circ}$  территориально приурочена к возвышениям рельефа, а с направлением  $135^{\circ}$  – к понижениям.

Наиболее богатая нефтяная залежь приурочена к возвышению, протягивающемуся севернее реки, на которой расположен п. Журавское. Эта зона характеризуется повышенной плотностью штрихов с ориентацией  $45^{\circ}$ . Повышенная плотность штрихов  $135^{\circ}$  соответствует менее богатым залежам углеводородов.

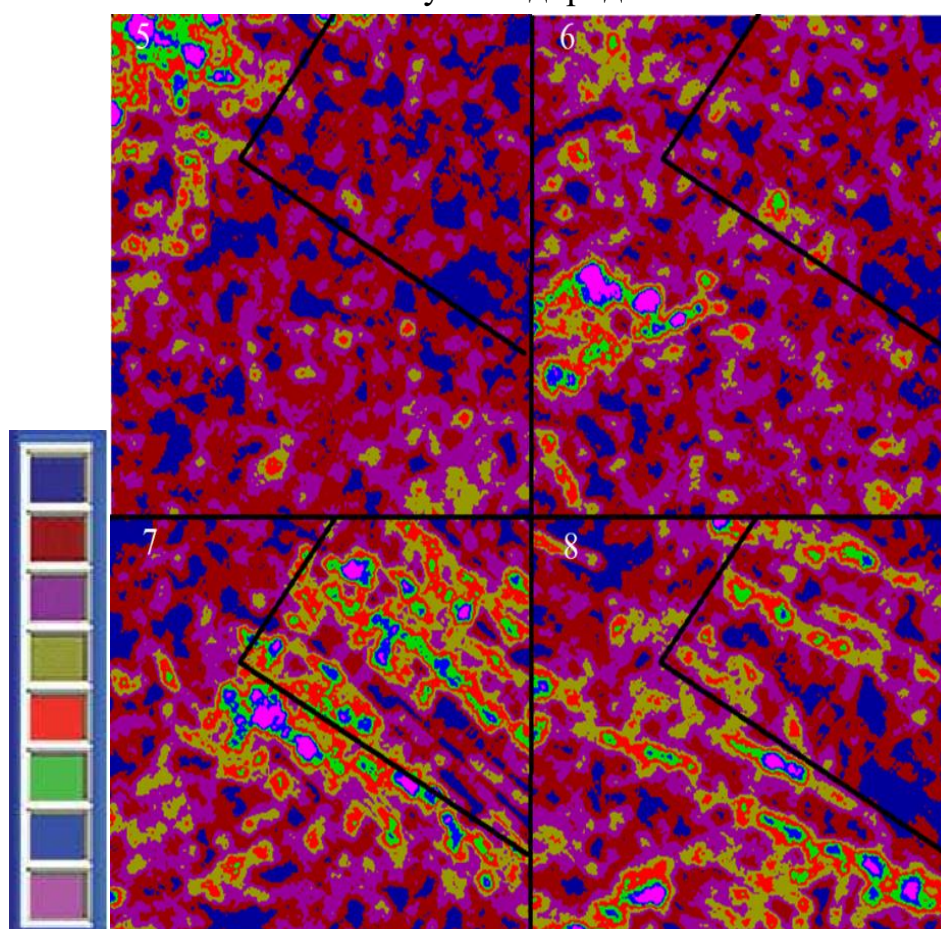


Рисунок - 3.4 Плотность штрихов 5,6,7 и 8 простираний со шкалой плотности штрихов. Черными линиями оконтурена

На схемах плотности штрихов, полученных при обработке ЦМР (рис. 3.5), связь месторождения с штрихами присуща только направлению  $135^{\circ}$ . Это объясняется тем, что при обработке ЦМР выявляются лишь те линеаменты, которые выражены в рельефе. При использовании же космоснимков выявляются все зоны трещиноватости и разломов, выраженные в ландшафтах. Для Журавского месторождения характерна тесная корреляционная связь наиболее богатых углеводородных залежей с зоной повышенной плотности поперечных линеаментов с простиранием СВ  $45^{\circ}$ . С продольными линеаментами общекавказского простирания ЮВ  $135^{\circ}$  связаны более бедные залежи углеводородов.

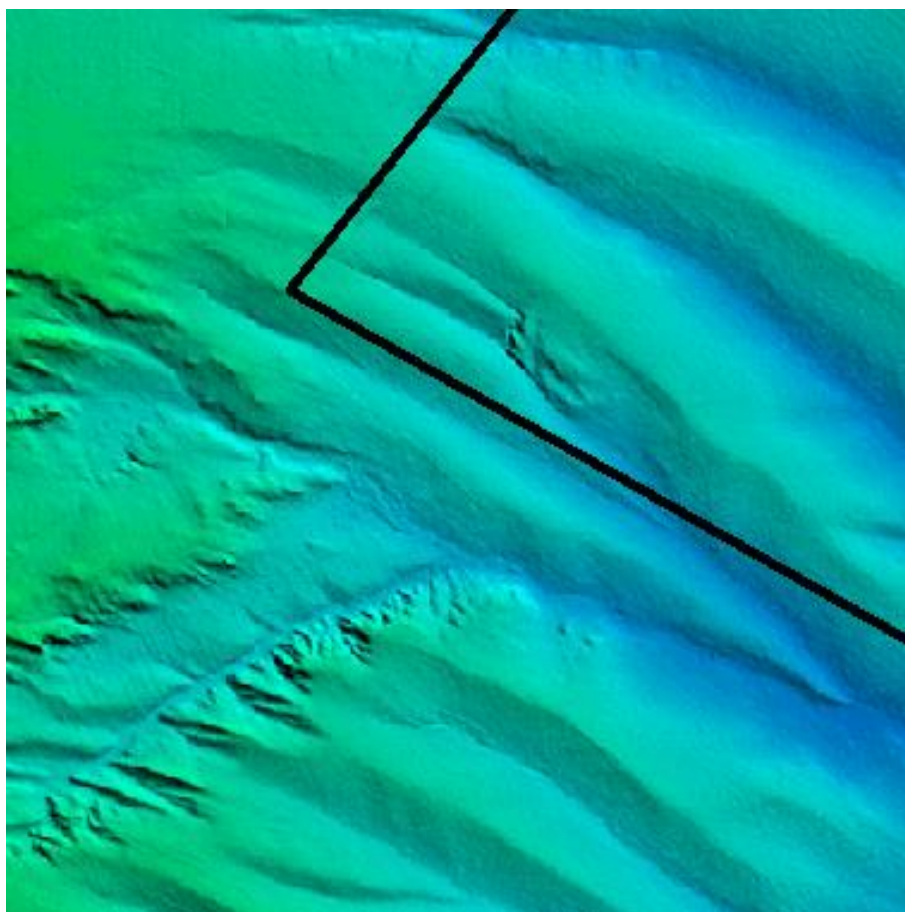
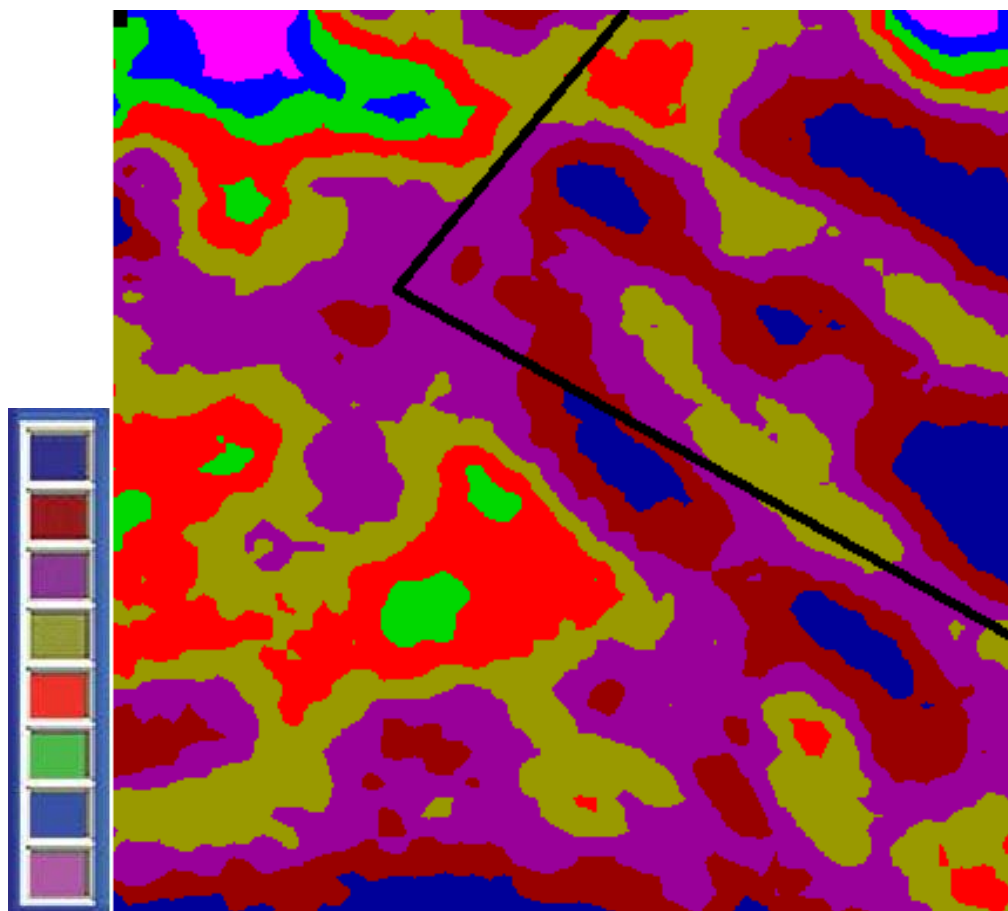


Рисунок – 3.6 Общая плотность штрихов, полученных по ЦМР со шкалой плотности штрихов. Черной линией оконтурена территория месторождения.

Использование для анализа ЦМР Журавского месторождения подтвердило наличие приуроченности части углеводородных (более бедных) залежей к зоне повышенной плотности продольных линеаментов и отсутствие таковой с поперечными линеаменами. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что поперечные линеаменты, представляющие собой зоны разрывных нарушений, трещин и дробления нередко не выражены в рельефе и поэтому не выявляются при анализе ЦМР.



Таким образом, для прогноза нефтегазовых месторождений аналогичных по геологическим условиям залегания Журавскому месторождению следует использовать плотность штрихов, которые являются поперечными к основным орографическим элементам, и в меньшей степени плотность продольных штрихов. Полученные результаты позволяют сделать

прогноз на наличие углеводородных залежей южнее п. Журавское, где отмечается зона повышенной плотности штрихов с простиранием 45°.

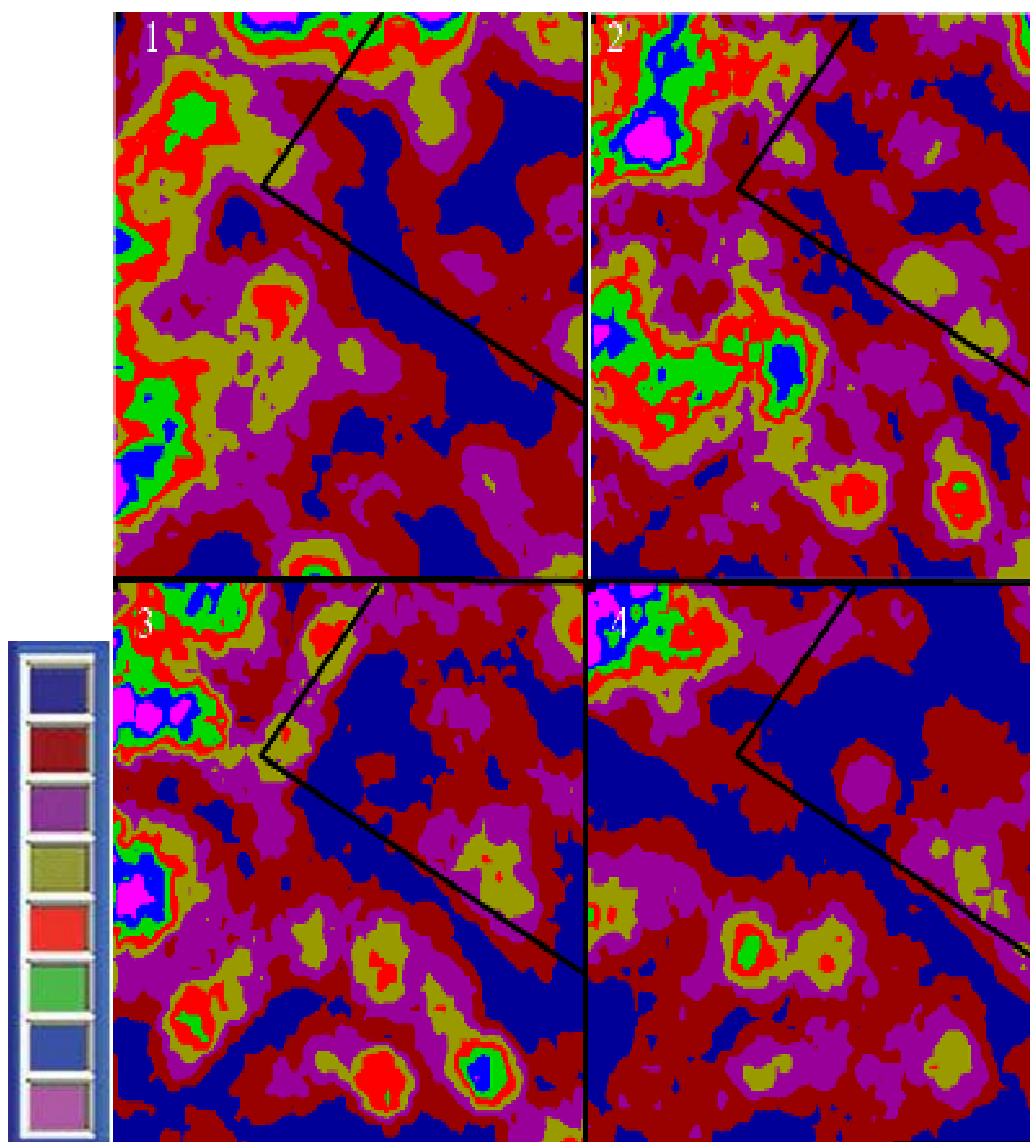


Рисунок – 3.7 Плотность штрихов 1, 2, 3 и 4 простираний со шкалой плотности штрихов. Черными линиями оконтурена территория месторождения.

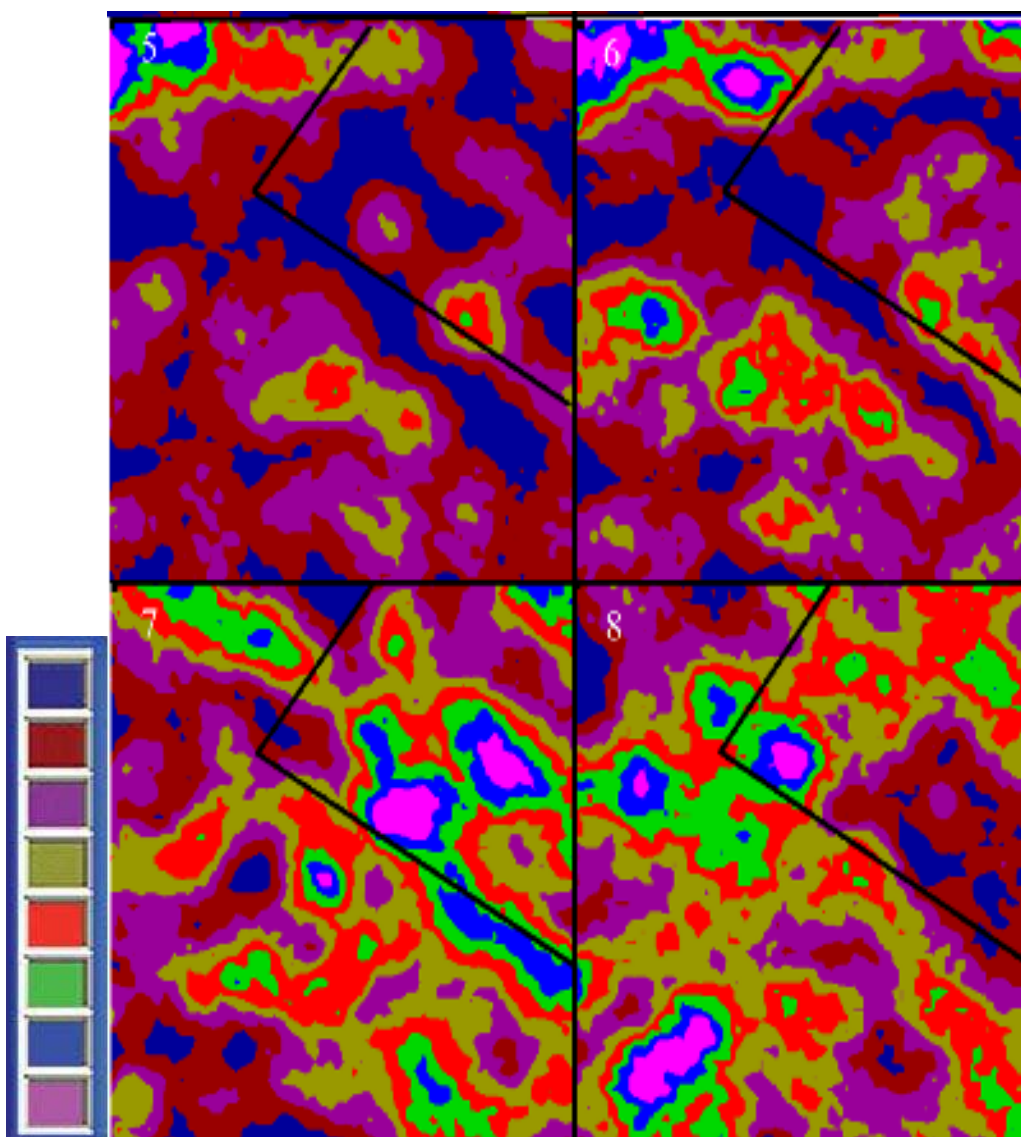


Рисунок – 3.8 Плотность штрихов 5, 6, 7 и 8 простираций со шкалой плотности штрихов. Черными линиями околтурена территория месторождения.

### **Прасковейское месторождение**

Рассмотрим Прасковейское нефтяное месторождение, расположенное в западной части Прикаспийской низменности. В административном отношении оно расположено в Будённовском районе Ставропольского края. В непосредственной близости от месторождения расположены г. Будённовск и с. Прасковейское.

Прасковейское месторождение в тектоническом отношении приурочено к Ачикулакскому валу, осложняющему южную часть Прикумской системы поднятий платформенной территории Восточного Предкавказья. Отличительной

особенностью Ачикулакского вала является практически полное отсутствие

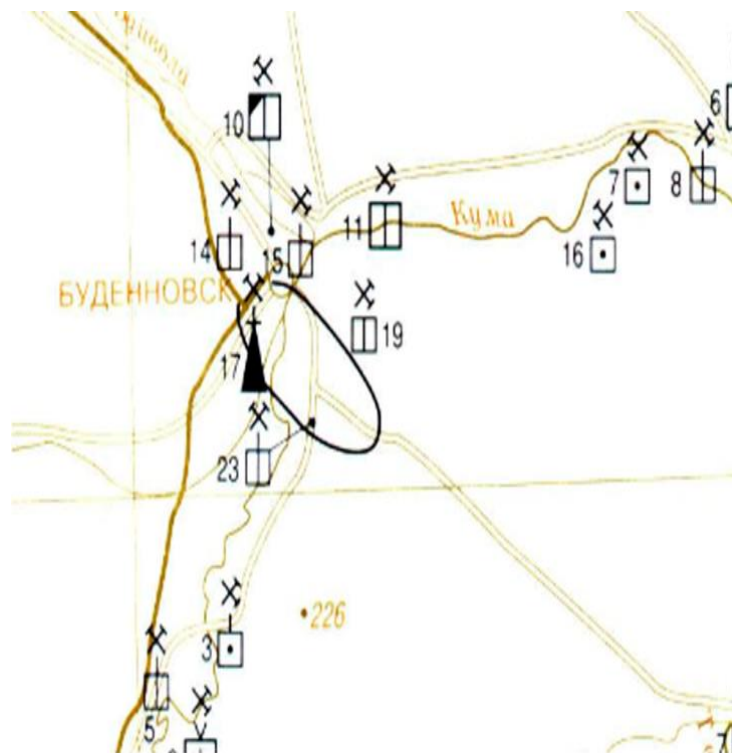


Рисунок – 3.9 Фрагмент карты полезных ископаемых [76]. Овалом выделено Прасковейское месторождение.

юрских отложений в его пределах.

Промышленная нефтеносность установлена в карбонатных отложениях хадумского горизонта рюпельского яруса, кумско-керестинской и черкесской свит лютетского яруса палеогенового возраста и маастрихского яруса верхнемелового возраста (рис. 3.9)

В работе был использован снимок спутника Landsat-8 за июнь 2015 года. Также в работе была использована ЦМР в низком разрешении.

В качестве исходного материала для автоматизированного линейamentного анализа использованы не только зональные, но и синтезированные космические изображения с целью изучения влияния на конечный результат анализа типа исходного материала. Как будет показано далее, такая зависимость отсутствует, т.е. вне зависимости от используемых спектральных зон и их синтеза конечный результат сходен. Это указывает на то, что выявленные закономерные связи

Прасковейского нефтяного месторождения с линеаментами некоторых простираний весьма устойчивы и мало зависят от выбранных спектральных зон космической съемки.

В результате автоматизированного линеamentного анализа зональных и синтезированных изображений получены розы-диаграммы и схемы плотности как всей совокупности линеamentов, так и линеamentов определенных простираний (направлений). Всего таких простираний выделено восемь с осреднением  $22.5^{\circ}$ :  $0^{\circ}$  (1);  $22,5^{\circ}$  (2);  $45^{\circ}$  (3);  $57.5^{\circ}$  (4);  $90^{\circ}$  (5);  $112,5^{\circ}$  (6);  $135^{\circ}$  (7) и  $157,5^{\circ}$ (8).

На рисунке 3.10 приведены обработанные картографические и космические материалы: фрагмент топографической карты масштаба 1:200 000 с нефтяными скважинами (жирные точки), фрагменты изображений Landsat-8 красного и ближнего ИК-каналов космической съемки и синтезированное изображение, полученное при синтезе красного, ближнего ИК-каналов и ЦМР Прасковейского нефтяного месторождения. Далее черные точки обозначают буровые скважины.

На рисунке 3.11 приведена схема плотности всей совокупности штрихов, полученная при обработке космического изображения красной зоны спектра.

На этой схеме и на схемах, приведенных далее, жирными точками показаны нефтяные скважины, которые имеются на использованной в работе топографической карте Генштаба L-38-XXV (1:200 000, составлено по карте масштаба 1:100 000 по материалам съемки 1936,39, 50 гг. Исправлено по картографическим материалам на 1988,89 гг. Издано ВТУГШ с оригиналов ГУГК СССР в 1994г.)

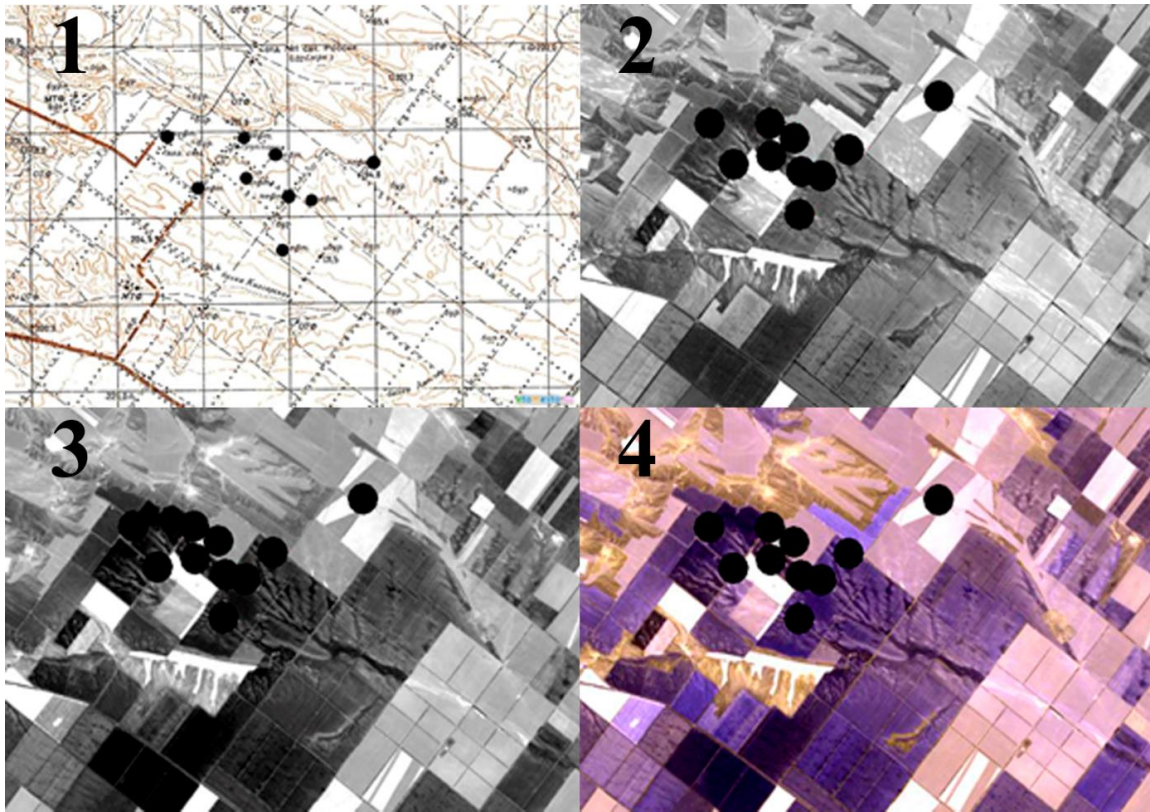


Рисунок - 3.10 Прасковейское месторождение на (слева направо) 1) топокарте 2) фрагменте красного канала космического снимка 3) фрагменте ближнего ИК-канала космического снимка 4) синтезе из красного, ближнего ИК-каналов

На данной схеме плотности и других схемах возрастание плотности показано постепенной сменой красного, зеленого, синего и малинового цветов.

Уменьшению плотности соответствует последовательная смена цветов с красного на желтый, бордовый, темно-синий.

Анализ схем общей плотности линеаментов разных простираний (рис.3.12) показывает отсутствие корреляции поля расположения нефтяных скважин, т.е. с Прасковейским нефтяным месторождением, с плотностью штрихов.

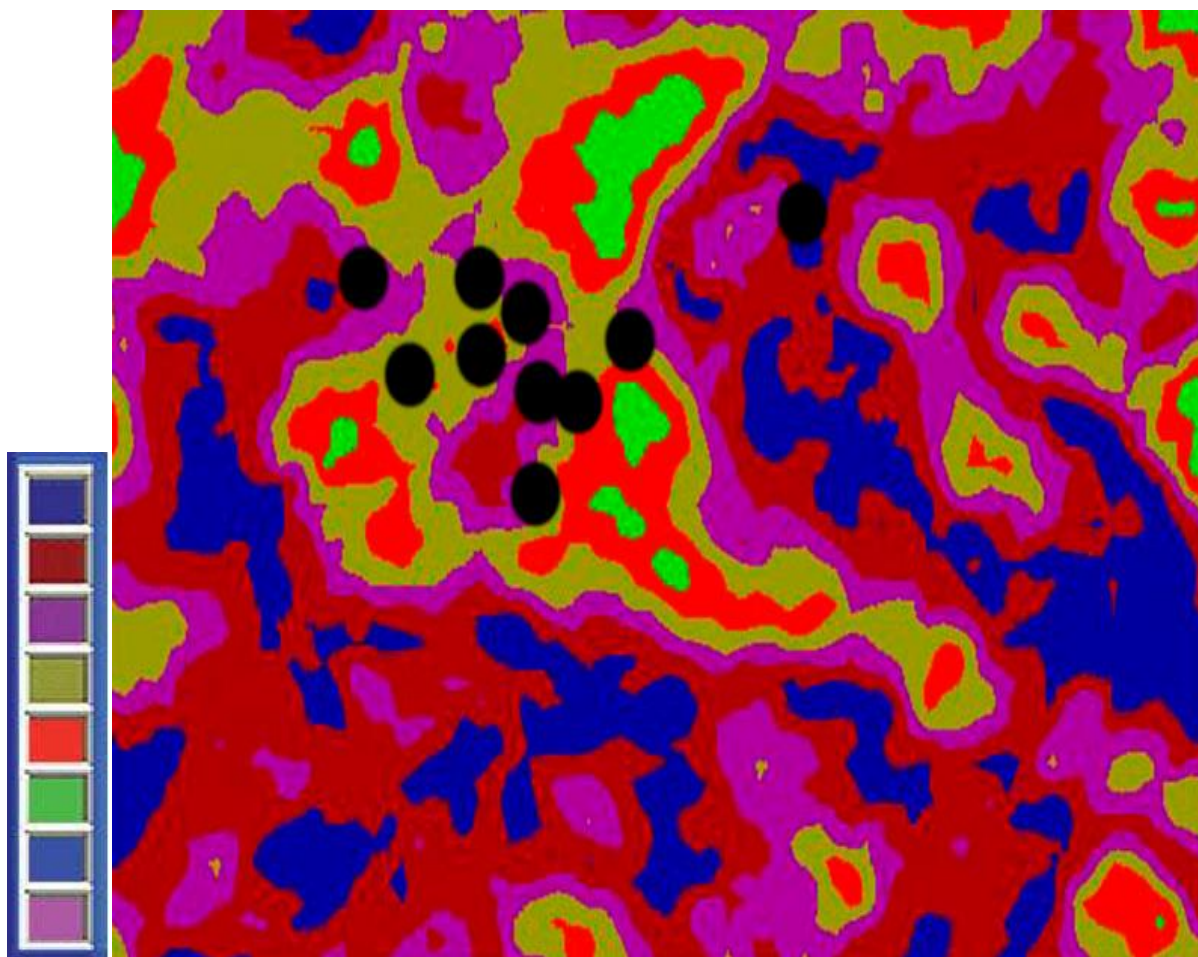


Рисунок - 3.11 Схема суммарной плотности штрихов разных простираний со шкалой плотности штрихов. Точками показаны буровые скважины.

На рисунке 3.12 приведены схемы плотности штрихов, полученных при автоматизированном линейментном анализе космоснимков красной зоны спектра для разных простираний:  $00^{\circ}$  (1);  $22,5^{\circ}$  (2);  $45^{\circ}$  (3);  $57,5^{\circ}$  (4);  $90^{\circ}$  (5);  $112,5^{\circ}$  (6);  $135^{\circ}$  (7) и  $157,5^{\circ}$  (8). Анализ схем плотности штрихов разных простираний показывает, что Прасковейское нефтяное месторождение приурочено к зоне повышенной плотности линейментов общекавказского простирания СЗ-ЮВ, отвечающее

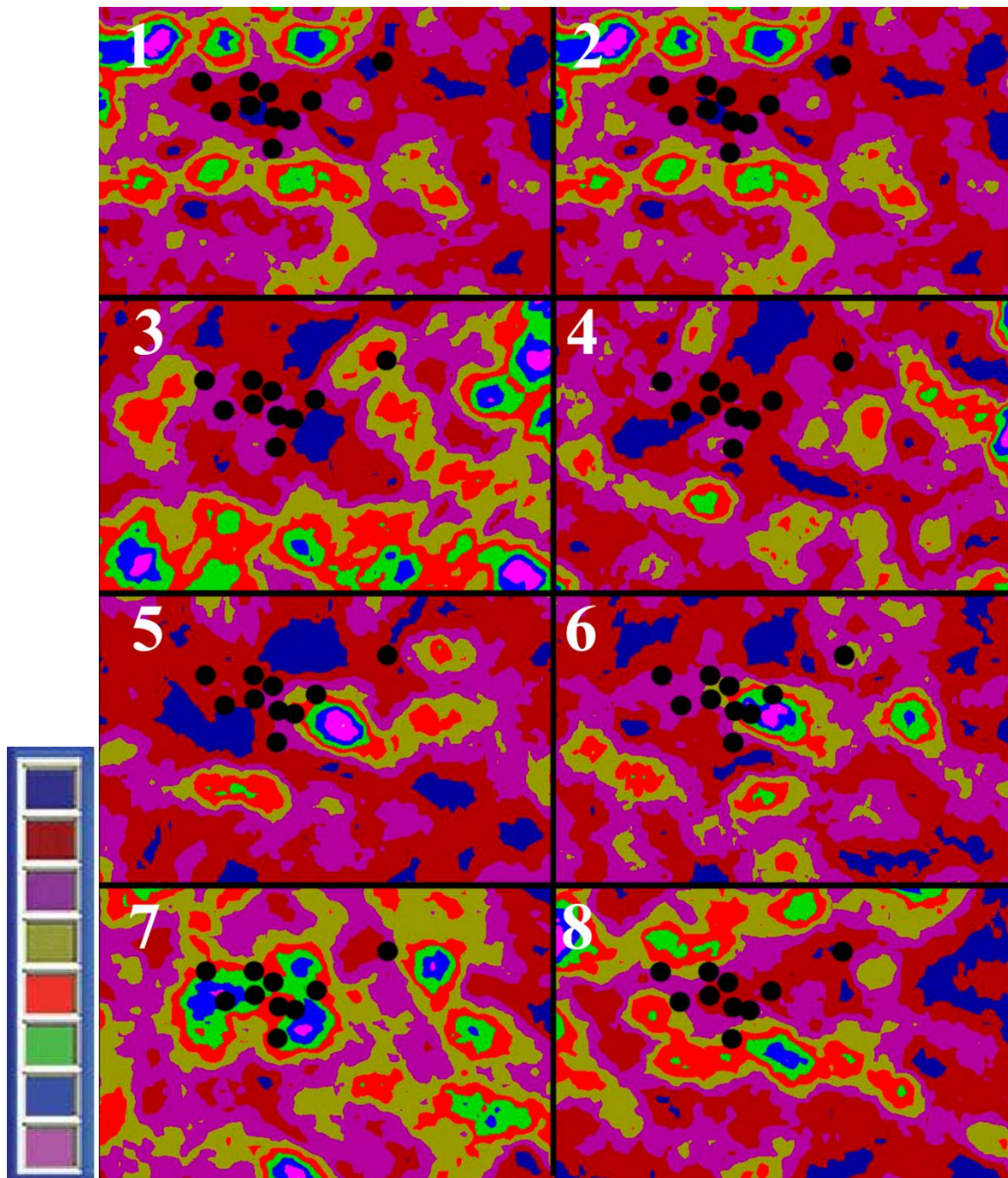


Рисунок - 3.12 Схемы плотности линеаментов с простираниями  $0^{\circ}$  (1);  $22,5^{\circ}$  (2);  $45^{\circ}$  (3);  $57,5^{\circ}$  (4);  $90^{\circ}$  (5);  $112,5^{\circ}$  (6);  $135^{\circ}$  (7) и  $157,50^{\circ}$  (8) со шкалой плотности штрихов. Точками показаны буровые скважины схемам поля плотности ЮВ  $135^{\circ}$ . С штрихами других простираний корреляция отсутствует.

На рисунке 3.13 приведены розы-диаграммы, полученные при автоматизированном линеаментном анализе космоснимка красной зоны

спектрального диапазона. Анализ роз-диаграмм четко выявляет связь Прасковейского месторождения с зонами ярко выраженного преобладания штрихов общекавказского простирания (ЮВ 135<sup>0</sup>). На прилегающей к месторождению территории розы-диаграммы менее выразительны, т.е. здесь земная кора однородна, без какого-либо преобладания общекавказских простираний.

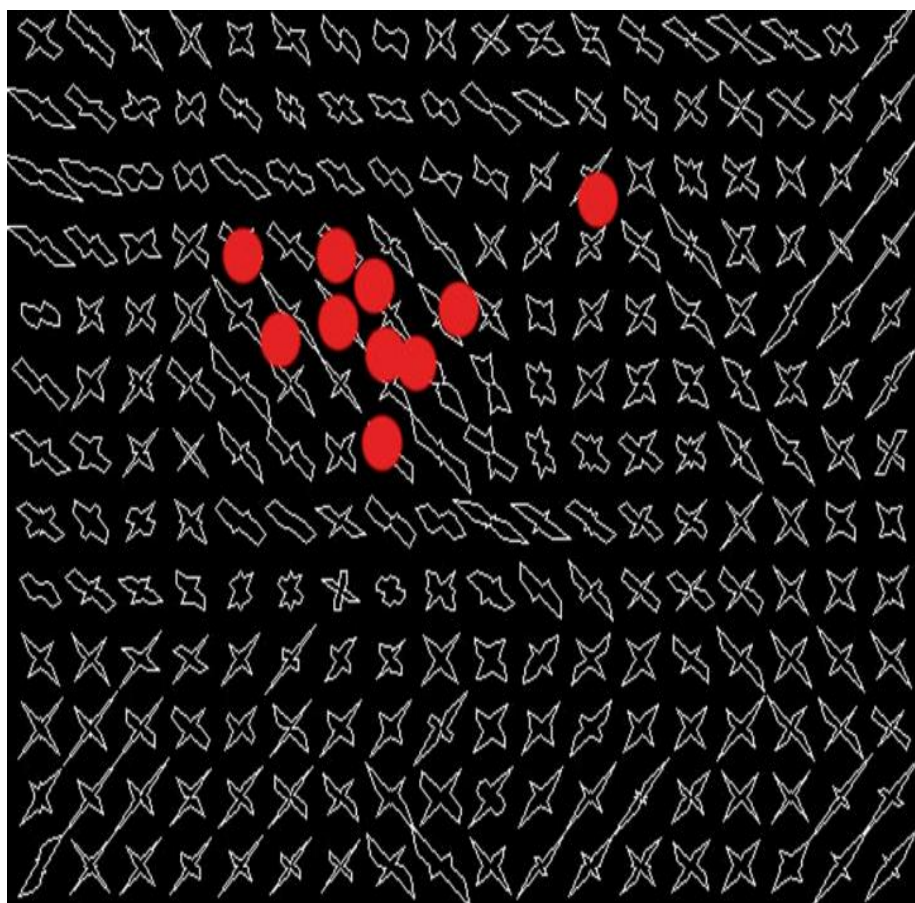


Рисунок - 3.13 Розы-диаграммы штрихов, полученные при обработке космоснимка красной зоны спектра

Таким образом, анализ полей плотности штрихов разных простираний и роз-диаграмм показывает наличие приуроченности Прасковейского нефтяного месторождения к аномальной зоне высокой плотности штрихов общекавказского простирания (ЮВ 135<sup>0</sup>).

Автоматизированный линеаментный анализ космического изображения, полученного в ближнем ИК-диапазоне, и синтезированного изображения,

полученного при синтезе красного, ближнего ИК-диапазонов и ЦМР, дал подобные же результаты: для Прасковейского нефтяного месторождения характерны повышенная плотность штрихов общекавказского простирания (СЗ 135°).

Приведенные схемы плотности штрихов, полученные для ближнего ИК-диапазона (рис. 3.14 а) и синтезированного изображения (рис. 3.14 б) во многом сходны, отличаясь лишь мелкими деталями. Это подтверждает устойчивость выявленной закономерной связи Прасковейского нефтяного месторождения с зонами повышенной плотности общекавказского простирания.

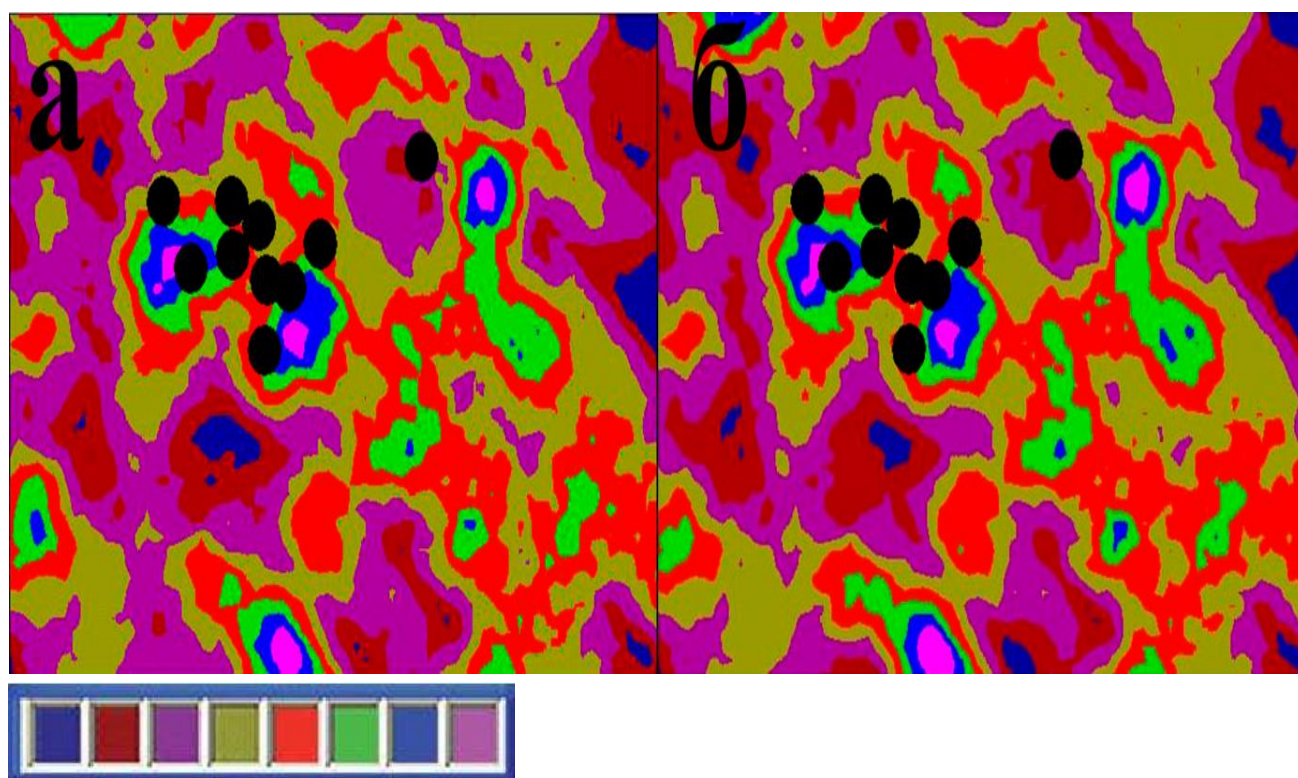


Рисунок - 3.14 а – схема плотности штрихов для ближнего ИК-диапазона, б- схема плотности штрихов для синтезированного изображения со шкалой плотности штрихов

Анализ линеamentной тектоники Прасковейского нефтяного месторождения при помощи автоматизированного линеamentного анализа зональных космических изображений показал приуроченность месторождения к зоне повышенной плотности штрихов общекавказского простирания (ЮВ 135°). В связи с этим представляет вполне определенный научно-практический интерес

сравнение полученных результатов линеаментного анализа Прасковейского месторождения с ранее полученными результатами по линеаментной тектонике Журавского месторождения, расположенного западнее в северо-восточной части Ставропольского свода.

Выполненный автоматизированный линеаментный анализ космических изображений выявил приуроченность Прасковейского и Журавского нефтяных месторождений к зоне повышенной плотности продольных линеаментов общекавказского простираний ЮВ 135<sup>0</sup>.

На Журавском месторождении наиболее богатые залежи углеводородов приурочены к зоне повышенной плотности поперечных линеаментов с простиранием СВ 45<sup>0</sup>. Это отличает его от Прасковейского нефтяного месторождения, где такая зависимость отсутствует.

Результаты линеаментного анализа показали, что ЦМР может использоваться при описании линеаментной тектоники лишь для выявления продольных (по отношению к основным орографическим элементам рельефа) линеаментов. Поперечные же линеаменты, которые часто не выражены в рельефе, при анализе ЦМР выявляются не полностью и поэтому не могут полностью характеризовать линеаментную тектонику месторождений и служить индикаторами мест возможной локализации углеводородов.

Данный вывод подтверждается на примере и других нефтегазоносных месторождений. Так линеаментный анализ космических снимков крупнейшего на Северном Кавказе Северо-Ставропольского газового месторождения, имеющего площадь газоносности 44,4 км<sup>2</sup>, показал приуроченность месторождения к участкам с аномально повышенной плотностью линеаментов с азимутом простирания ЮВ 135<sup>0</sup>, т.е. к продольным линеаментам по отношению к общекавказскому протиранию. В отличие от Прасковейского месторождения корреляция с продольными линеаментами как по

космоснимкам, так и по результатам обработки ЦМР здесь полностью отсутствует.

Таким образом, автоматизированный линеаментный анализ показал, что для выявления аномальных зон плотности линеаментов, связанных с месторождениями наиболее информативны космические снимки. Выявленные при этом аномальные зоны могут использоваться для прогноза и оценки потенциальной нефтегазоносности территории с учетом особенностей её геологического строения.

### Северо-Ставропольское месторождение

Газовые пласты залегают на глубинах 750-1000 метров. Для месторождения характерна повышенная плотность продольных линеаментов. Данные по Северо-Ставропольскому месторождению приведены для иллюстрации

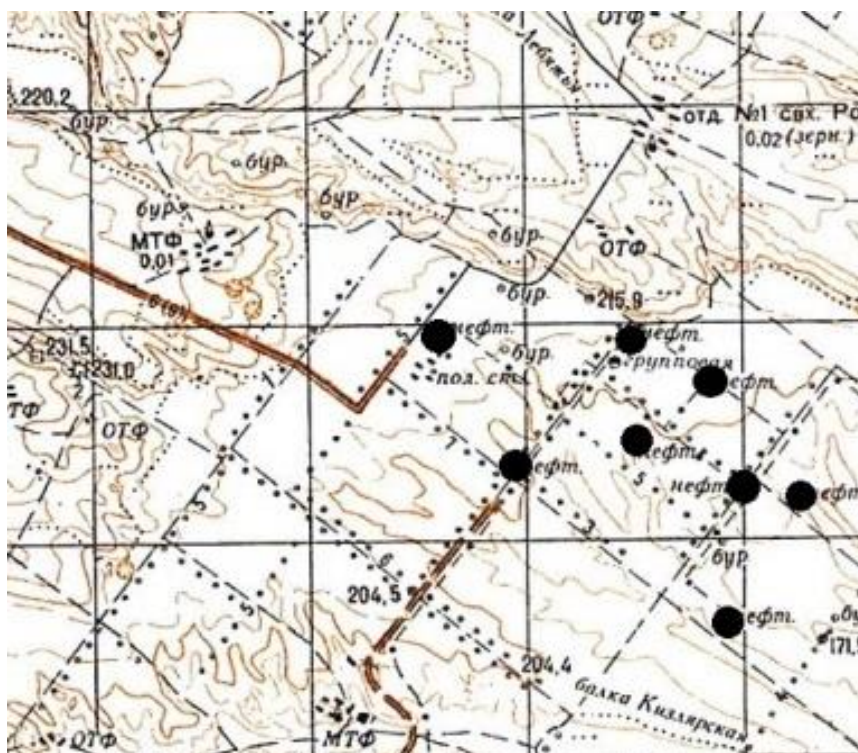


Рисунок – 3.15 Фрагмент топокарты с нанесенными скважинами. территория Северо-Ставропольского месторождения. Точками показаны буровые скважины

высказанных выше предположений и апробации методики (рисунок 3.15-3.19). На всех рисунках нанесены скважины.

Как мы можем видеть наибольшая плотность линеаментов отвечает простиранию штрихов ЮВ 135°, т.е. общекавказскому простиранию. Это хорошо видно по схемам плотности штрихов 7-го простирания (рисунок 3.19) и роз-диаграмм (рисунок 3.17).

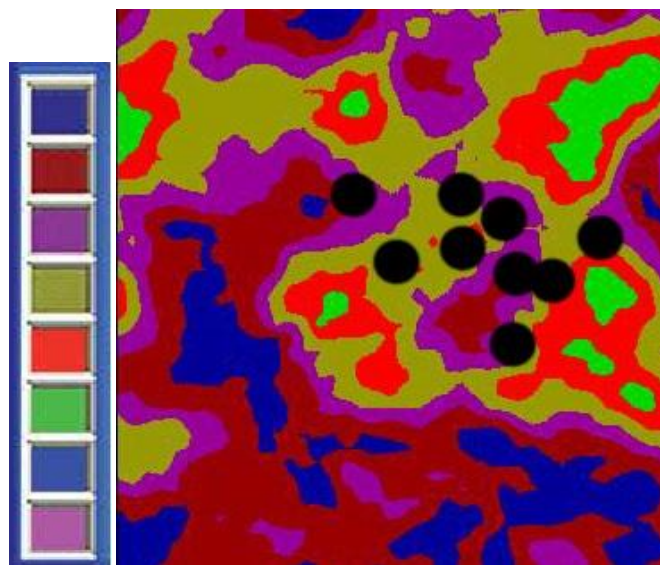


Рисунок - 3.16 Общая плотность штрихов с нанесенными скважинами со шкалой плотности штрихов. Точками показаны буровые скважины.

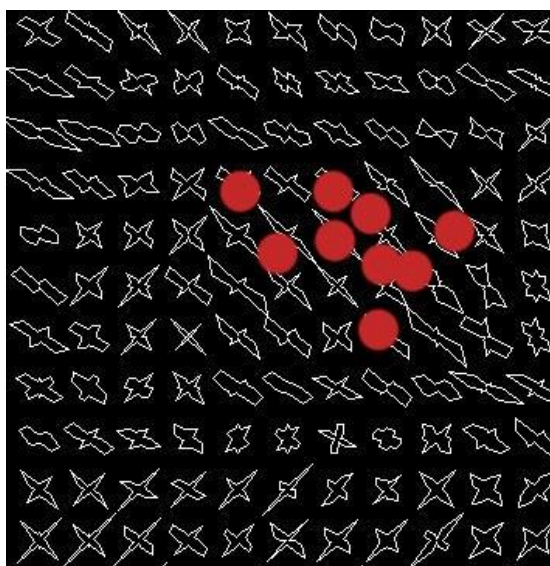


Рисунок – 3.17 Розы-диаграммы штрихов. Точками показаны буровые скважины.

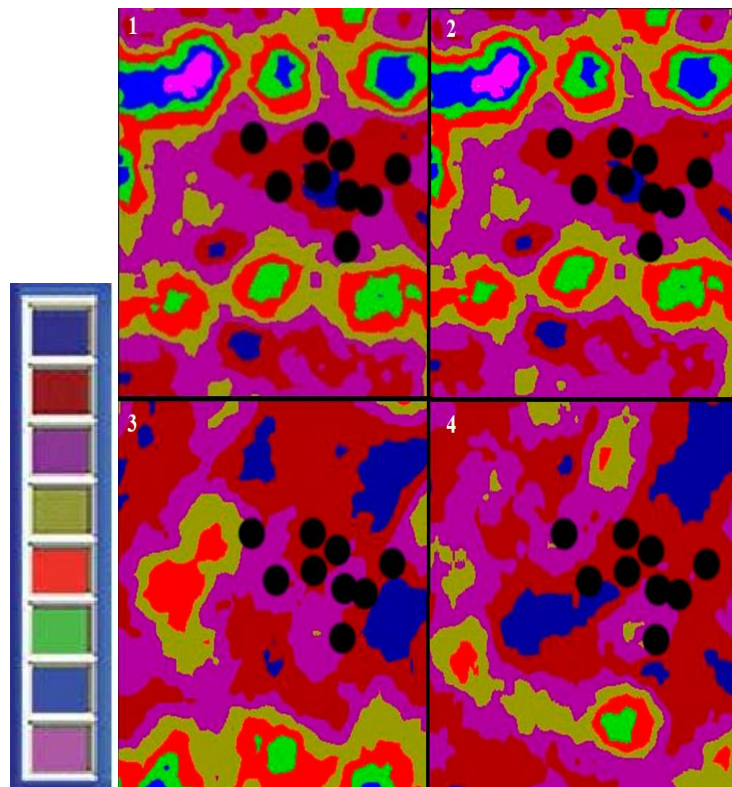


Рисунок - 3.18 Плотность штрихов 1, 2, 3 и 4 простираний со шкалой плотности штрихов. Точками показаны буровые скважины

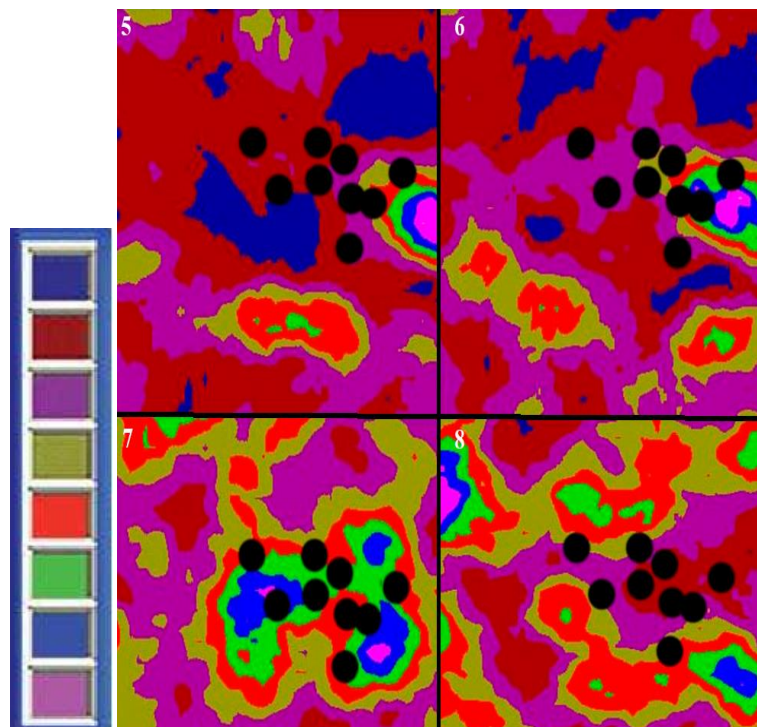


Рисунок – 3.19 Плотность штрихов 5, 6, 7 и 8 направлений со шкалой плотности штрихов. Точками показаны буровые скважины



Рисунок – 3.20 Шкала цветов

LESSA позволяет получать только качественные результаты. Все данные представляются цветами вне зависимости от количественных характеристик линеаментов (рис. 3.20). Однако, в ходе данной работы была выявлена связь месторождений углеводородов с определенными значениями цветовой шкалы. Если задать каждому цвету численное значение плотности штрихов от 0 до 100 условных единиц (т.е. один цвет находится в промежутке в 12,5 у.е.), то мы можем заметить следующее. Большая часть залежей углеводородов связана со значениями цветов 62,5-75, 0-12,5, 87,5-100, идущих именно в таком порядке. Т.е. значение 75-87,5 заменяется на 0-12,5. Реже встречается комбинация 37,5-75.

**Выводы:**

- Представленный алгоритм позволяет проводить прогноз наличия нефтегазовых месторождений;
- Для выявления залежей углеводородов достаточно использовать два статистических показателя, получаемых при автоматизированном линеаментном анализе – плотность штрихов и розы-диаграммы штрихов;
- Залежи углеводородов приурочены к поперечным (более богатые залежи) и продольным, по отношению к основным элементам рельефа, штрихам;
- Изменения направлений роз-диграмм штрихов так же может указывать на наличие залежей углеводородов;
- Линеаментный анализ ЦМР так же показал приуроченность залежей углеводородов к штрихам продольным к морфоструктурам;

- Залежи углеводородов приурочены к двум диапазонам плотностей штрихов 62,5-75, 0-12,5, 87,5-100 и 7,5-75, выраженных в условных единицах;

### **3. 2 Методика прогноза оползневой опасности**

Автоматизированный линеаментный анализ позволяет выявить места развития оползневых участков. Оползни характеризуются повышенной плотностью штрихов, определенных азимутов простираний.

Схема алгоритма выделения оползневых участков, основанного на приведенной ранее методике, приведена на рисунке 3.21.

В качестве примера приведем результаты автоматизированного линеаментного анализа для изучения широко развитых оползневых процессов в бассейне р. Мзымта в районе Красной Поляны (рисунок 3.22). Красным показаны участки развития оползней, полученные по инженерно-геологическим картам.

Оползни – это скользящее смещение масс горных пород вниз по склону под влиянием силы тяжести. Возникают вследствие различных причин, главными из которых являются трещиноватость и дробление горных пород, переслаивание водоупорных и водоносных горных пород и действие гидродинамического давления подземных вод. При крутизне  $5^{\circ}$ - $25^{\circ}$  преобладают оползни пластического течения, при крутизне  $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$  - комбинированные оползни, а более  $35^{\circ}$  - оползни блокового смещения.

Дешифрирование оползневых тел на открытых (незалесенных) склонах осуществляется по прямым дешифровочным признакам – по бугристой форме и наличию оползневых уступов на склонах. В случае залесенных склонов выявление оползней происходит по косвенным признакам.

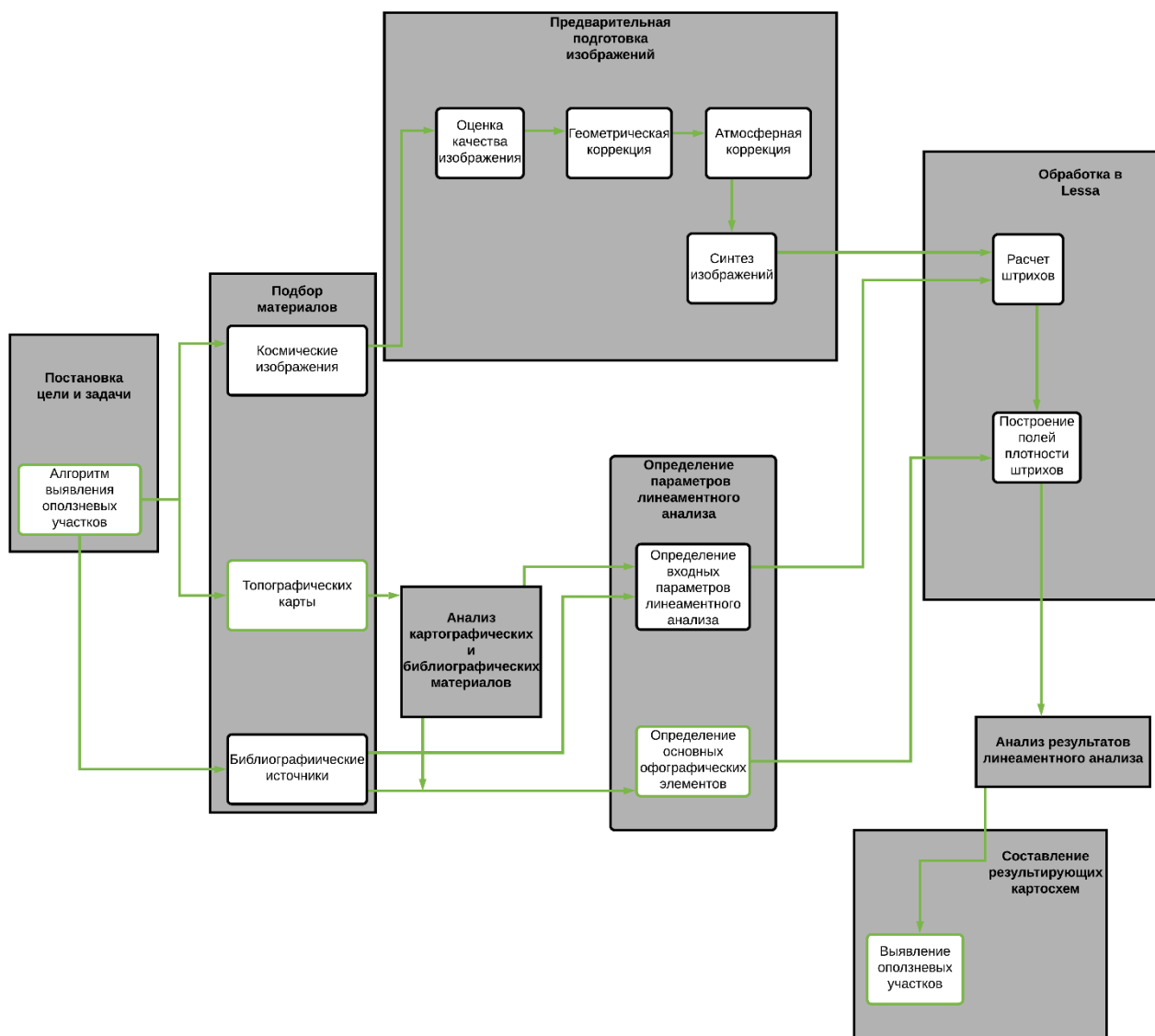


Рисунок - 3.21 Алгоритм поиска оползневых участков

Одним из таких признаков является выявление областей разгрузки подземных вод, которые являются наиболее благоприятными местами для развития оползневых процессов и смещения вниз по склону масс горных пород, потерявших устойчивость из-за уменьшения силы сцепления (трения) между отдельными их частями при смачивании их водой. Особенно интенсивно миграция подземных вод происходит по линеаментам – зонам разрывных нарушений, трещин и дробления горных пород.

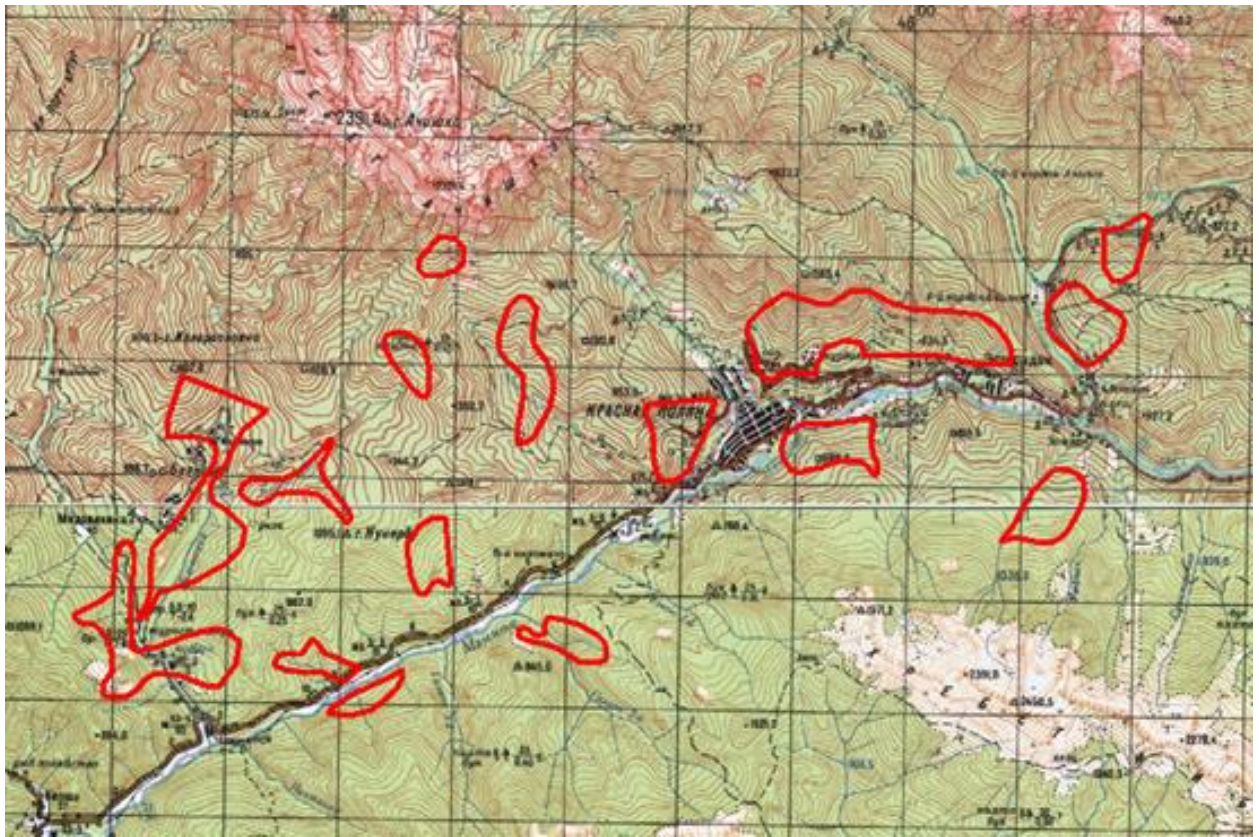


Рисунок - 3.22 Фрагмент топокарты района работ, с оползневыми участками, перенесенными с инженерно-геологической карты масштаба 1:10 000

По линеаментам подземные воды стекают из областей питания в области разгрузки, которыми являются подножия склонов, речные долины, овраги и другие отрицательные формы рельефа. В горах подземные воды относятся к трещинно-грунтовым и трещинно-жильным типам. Их пути миграции происходят в основном по линеаментам. Поэтому в горах задача прогноза оползневой опасности во многом сводится к выявлению линеаментов, ориентированных поперек склонов, соединяющих области питания и разгрузки подземных вод. Для выявления линеаментов использована компьютерная программа автоматизированного линеаментного анализа космических снимков LESSA. В данной работе для выявления оползневых участков использована плотность штрихов разных простираний с осреднением  $22,5^\circ$  и общая плотность штрихов, выделенные по космическому снимку и ЦМР

**Район исследования** расположен в бассейне р. Мзымта (Сочи) и охватывает территорию между р. Кепша и р. Сулимовская (Роза Хутор). Высота рельефа составляет от 400 м (в бассейне р. Мзымта) до 2550 м на горных хребтах водоразделов.

Река Мзымта течет вначале в направлении ЗСЗ, а в районе Красной Поляны меняет направление течения на ЮЗ. Ее притоки впадают почти под прямым углом, разветвляясь в верхней части притока. Поэтому ориентировка разделяющих их склоновых водоразделов и связанных с ними путей миграции трещинных подземных вод часто меняется, что обуславливает мозаичное распределение оползневых участков.

Развитию оползневых процессов способствует интенсивная трещиноватость горных пород, представленная в основном нижнеюрскими глинистыми сланцами, филлитами, песчаниками, аргилитами, алевролитами, которые перекрыты среднеюрскими авгитовыми порфиритами, туфопесчаниками, туфами и прорывающими их диабазами. Верхней частью стратиграфического разреза служат верхнеюрские известняки и мергели. Нижнеюрские отложения, раздробленные и обводненные, составляют большую часть оползневых тел на исследованной территории.

В качестве эталонных участков использованы оползневые участки, выявленные при составлении инженерно-геологических карт в масштабах 1:10000 [77] и 1:50000 [78].

На схемах (рисунок 3.23-3.25) оползневые участки, выявленные при наземной инженерно-геологической съемке в масштабе 1:10000, выделены черным цветом.

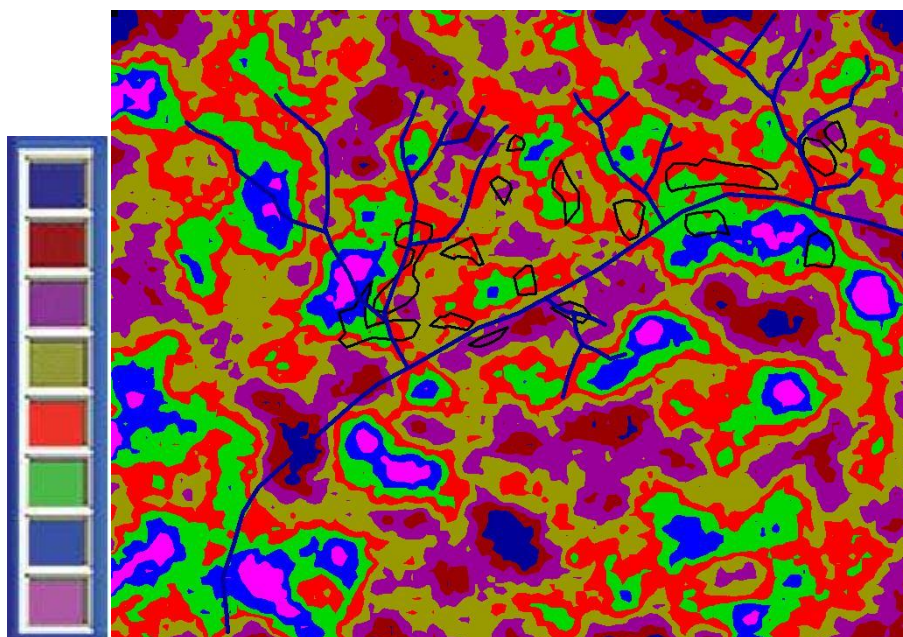


Рисунок - 3.23 Общая плотность штрихов в районе Красной поляны со шкалой плотности штрихов

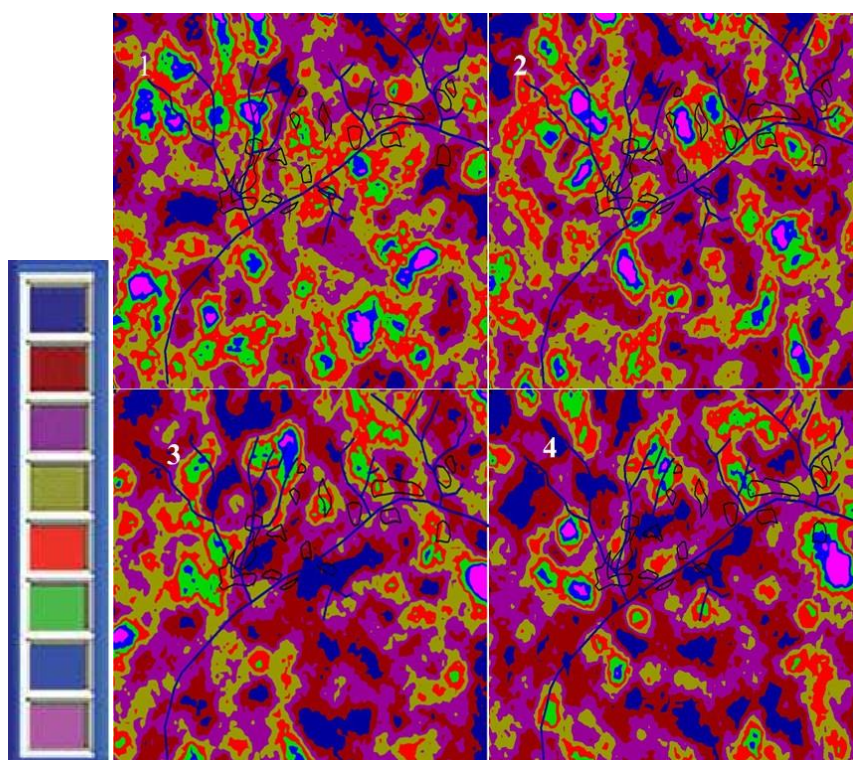


Рисунок - 3.24 Плотность штрихов 1, 2, 3 и 4 направлений со шкалой плотности штрихов

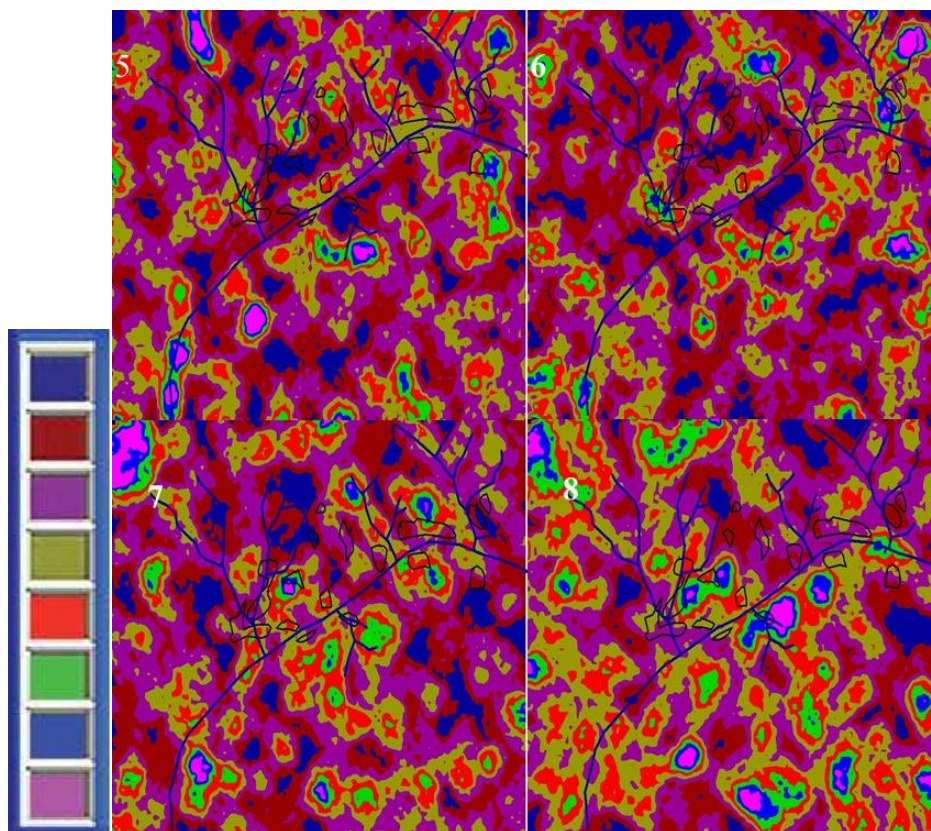


Рисунок - 3.25 Плотность штрихов 5, 6, 7 и 8 направлений со шкалой плотности штрихов

Полевые исследования, проведенные в районе Красной Поляны, показали значительно более широкое распространение оползневых процессов, чем это показано на инженерно-геологических картах. Были обследованы левый и правый берега долины р. Мзымта, долины рек Кепша, Чвижепсе, Монашенка, Бешенка, Ачипсе, Лаура, Галион 1-ый, 2-ой и 3-ий, Кеша, Ржаная, Сулимовская, а также их притоки и грунтовая дорога Красная Поляна – Хмелевские озера. Повсюду наблюдается широкое развитие многоярусных оползневых склонов с развитием оползней блокового смещения. Крутизна склонов до  $30^{\circ}$ - $40^{\circ}$  и более. Швы отрыва оползней часто имеют фестончатый рисунок, обусловленный слиянием краевых частей соседних оползневых цирков.

Подобное неполное отражение оползней на инженерно-геологических картах обусловлено труднодоступностью заросших лесом оползневых

склонов, крутизна которых достигает  $40^\circ$  и более, а также ограниченностью работ в основном непосредственно долиной р. Мзымта, а не всего ее бассейна.

В качестве исходного материала использовано синтезированное космическое изображение, полученное при синтезе зеленой, красной и среднего ИК спектральных зон (каналы 2,3,5) зональных космических снимков Landsat-7. Выбор данных зон для синтеза обоснован на результатах специально проведенного эксперимента. Суть его заключалась в том, что выполнялся автоматизированный линеаментный анализ различных зональных сегментов и их синтезированных вариантов с выделением участков повышенной плотности линеаментов. Затем эти участки сравнивались с оползневыми склонами, показанными на инженерно-геологических картах, которые принимались за эталоны. Наибольшую корреляцию аномалий плотности линеаментов с эталонами оползневых склонов показали аномалии плотности, выявленные при анализе синтезированных изображения, полученного при синтезе 2,3 и 5 спектральных каналов съемки Landsat-7. Другие зональные и синтезированные космические изображения показали меньшую корреляцию. Самую низкую корреляцию дали панхроматические снимки.

На рис. 3.26 приведена схема общей плотности линеаментов. Суммарная плотность линеаментов разных простираний характеризует общую раздробленность и трещиноватость горных пород. Водонасыщенность данных раздробленных пород связана в основном с трещинно-грунтовыми подземными водами, которые вызывают развитие оползней пластического течения. Как правило, подобные оползни захватывают лишь приповерхностные (делювиально-элювиальные) отложения, на склонах с крутизной до  $15-20^\circ$ , реже  $20-35^\circ$ .

На рис. 3.27 приведена схема плотности субмеридиональных линеаментов, имеющих простирание  $0^\circ$ . Связанные с ними пути миграции

трещинно-жильных подземных вод ориентированы поперек речных долин, имеющих субширотную ориентировку.

Для субмеридиональных простираний имеется несколько участков повышенной плотности штрихов. Первый участок к западу от Монастыря. Здесь развиты карбонатные (известняки и мергели) отложения верхнего мела, перекрытые глинистым делювием. Скальные известняки и мергели не образуют оползни, но перекрывающий их обводненный глинистый делювий легко соскальзывает по ним, образуя оползни пластического течения, что и показано на инженерно-геологических картах и нашло отражение в результатах автоматизированного линеаментного анализа космических синтезированных изображений.

Наибольшее количество участков повышенной плотности субмеридиональных линеаментов наблюдается в верховьях разветвляющейся долины р. Чвижепсе и ее левого притока Медовеевки. Притоки верховьев р. Чвижепсе и Медовеевки имеют субширотное простирание. Они рассечены субмеридиональными линеаментами, являющимися путями миграции грунтово-жильных подземных вод. На инженерно-геологических картах наличие оползней не показано. Однако выполненные полевые работы показали широкое развитие здесь крупных оползневых тел блокового смещения, имеющих размеры по основанию до 60 м и высоту оползневого уступа до 30 м. Оползневые склоны имеют двухступенчатое строение.

Несколько оползневых участков с повышенной плотностью субмеридиональных линеаментов отмечаются на левобережье р. Мзымта. Они приурочены к субширотно ориентированным крутым коренным склонам долин рек Пыхтинка и Галион 1-й, сложенных юрскими терригенными отложениями.

Несколько аномальных участков повышенной плотности субмеридиональных линеаментов расположены в юго-восточной части

исследованного района. Но они относятся не к бассейну р. Мзымта, а к бассейну р. Псоу, для которого также, как и для бассейнов р. Мзымта, характерно широкое развитие оползневых процессов.

Связанные с линеаменами с простиранием  $22,5^{\circ}$  пути миграции подземных вод имеют юго-восточное простирание  $112,5^{\circ}$ . На схеме имеются несколько участков с повышенной плотностью штрихов. На левобережье р. Мзымта они хорошо коррелируют с оползневыми участками, выделенными на инженерно-геологических картах. На правобережье р. Мзымта в долинах ее правых притоков р. Чвижепсе и р. Монашенка на инженерно-геологических картах показаны не все оползни, но они выявлены и описаны при полевых работах. Размер оползневых тел достигает иногда по длине 100-200 м, по высоте оползневых уступов 20-50 м. Здесь и далее оползневые участки, выявленные при наземной инженерно-геологической съемке в масштабе 1:50000, для оползней, в том числе активных, показаны кружками с заливкой, а оползневые участки пластичного течения – кружками без внутренней заливки.

На рисунке 3.28 приведена схема плотности линеаментов, имеющих простирание СВ  $45^{\circ}$ , и служащих путями миграции трещинно-жильных подземных вод для речных долин, протягивающихся в направлении ЮВ  $135^{\circ}$ .

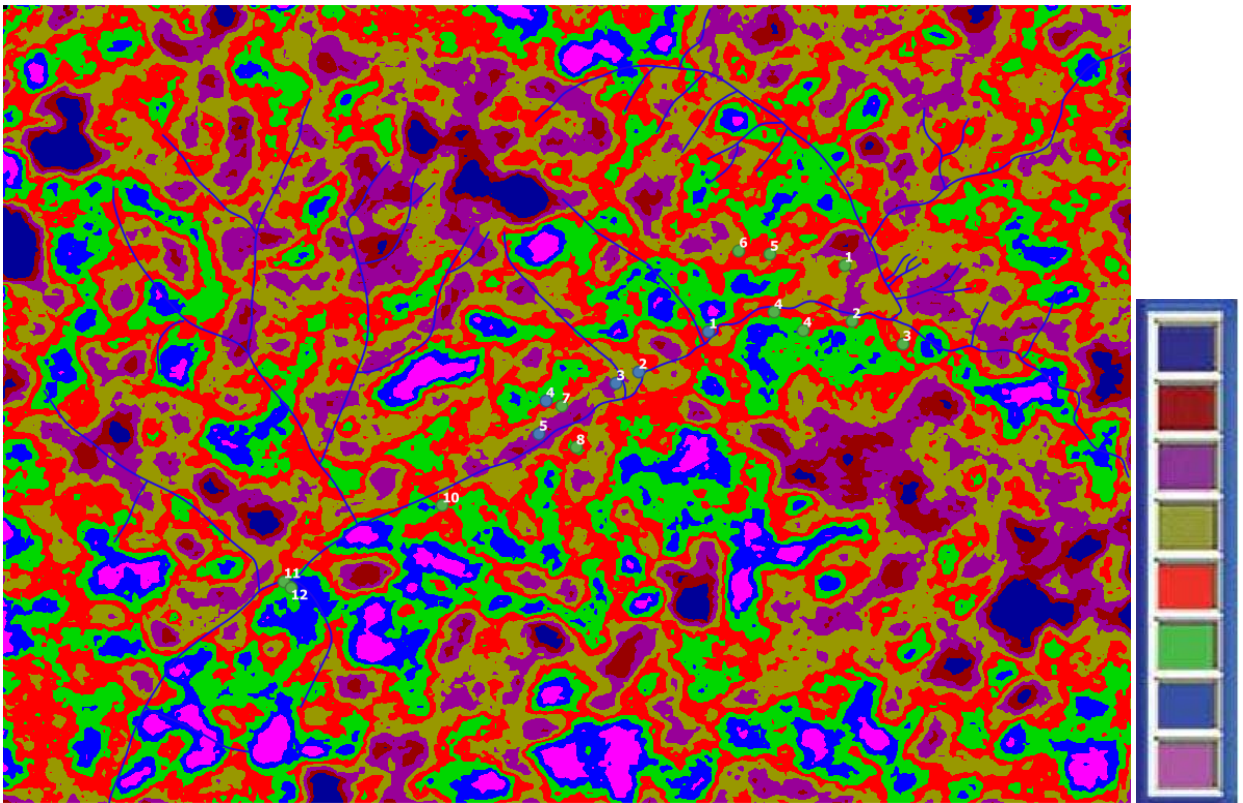


Рисунок - 3.26 Общая плотность штрихов со шкалой плотности штрихов

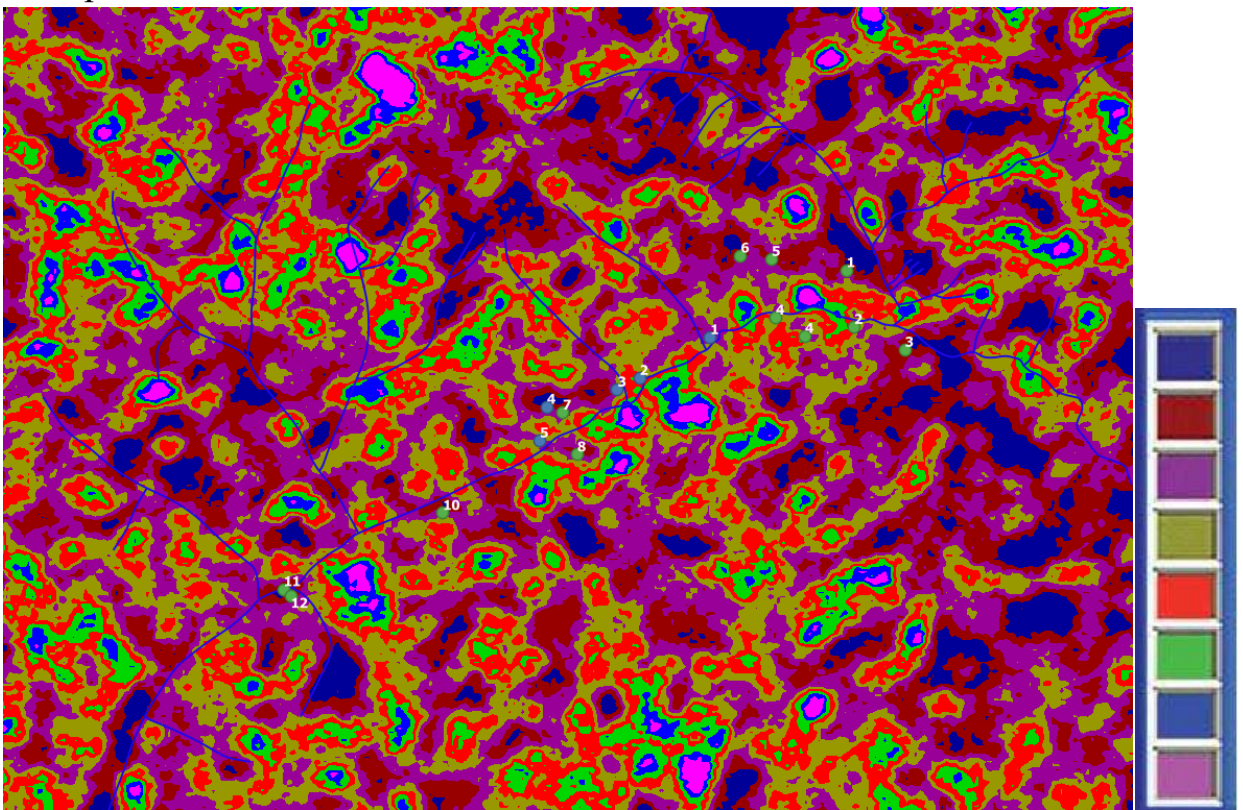


Рисунок - 3.27 Плотность штрихов 1 простираения со шкалой плотности штрихов

К таким долинам относятся долины рек Кепша, Бирючка (левый приток 79

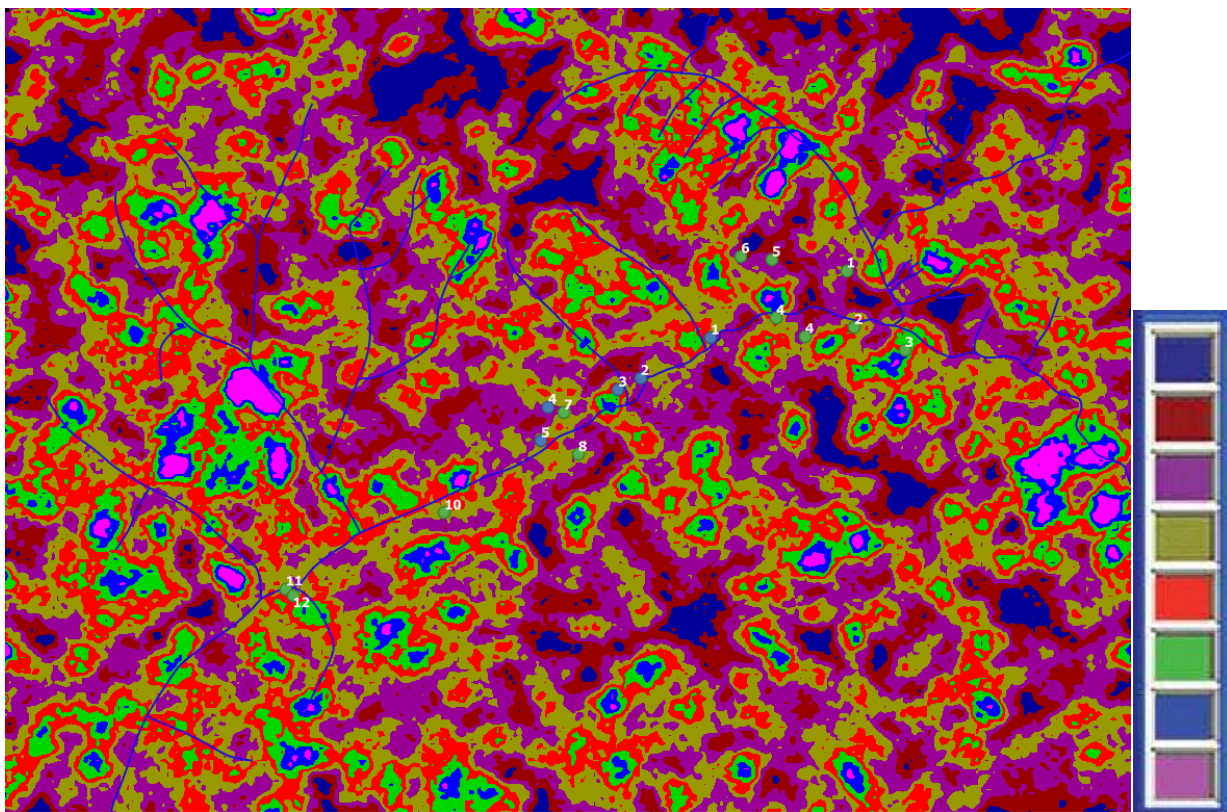


Рисунок - 3.28 Плотность штрихов 3 простираия со шкалой плотности штрихов

Чвижепсе), Бешенка, Кеша. На крутых берегах этих долин, сложенных терригенными юрскими отложениями широко развиты оползневые процессы. На самом крупном оползне в долине р. Бешенка расположен п. Красная Поляна. На Красной Поляне, по словам местных жителей, при бурении скважины на воду на глубину 30 м натолкнулись на ствол дерева, поваленный во время схода оползня. Полевые исследования показали, что наибольшее количество оползневых блоков, сложенных глинистыми сланцами нижней юры, расположено в верховьях р. Бешенка.

Очень крупный участок повышенной плотности линеаментов СВ 45° наблюдается в долине р. Ржаная. Наличие здесь оползневых склонов отмечено на инженерно-геологических картах. Но если исходить из данных автоматизированного линеаментного анализа, оползневые процессы захватывают здесь гораздо большую площадь, чем это показано на картах. Тем более, что раздробленные горные породы, представленные здесь в основном

глинистыми сланцами и филлитами нижней юры, которые в случае водонасыщения легко соскальзывают вниз по склону.

На рисунке 3.30 приведена схема плотности линеаментов с простиранием ВСВ  $67,5^\circ$ . Они служат путями миграции подземных вод с водоразделов в речные долины, протягивающиеся в направлении ЮЮВ  $157,5^\circ$ . К ним относится средняя часть долины р. Кеша, средняя часть долины р. Медивеевка, отдельные участки долины р. Бешенки, долины притоков рек Ржаная и Сулимовская. Все эти места повышенной плотности линеаментов

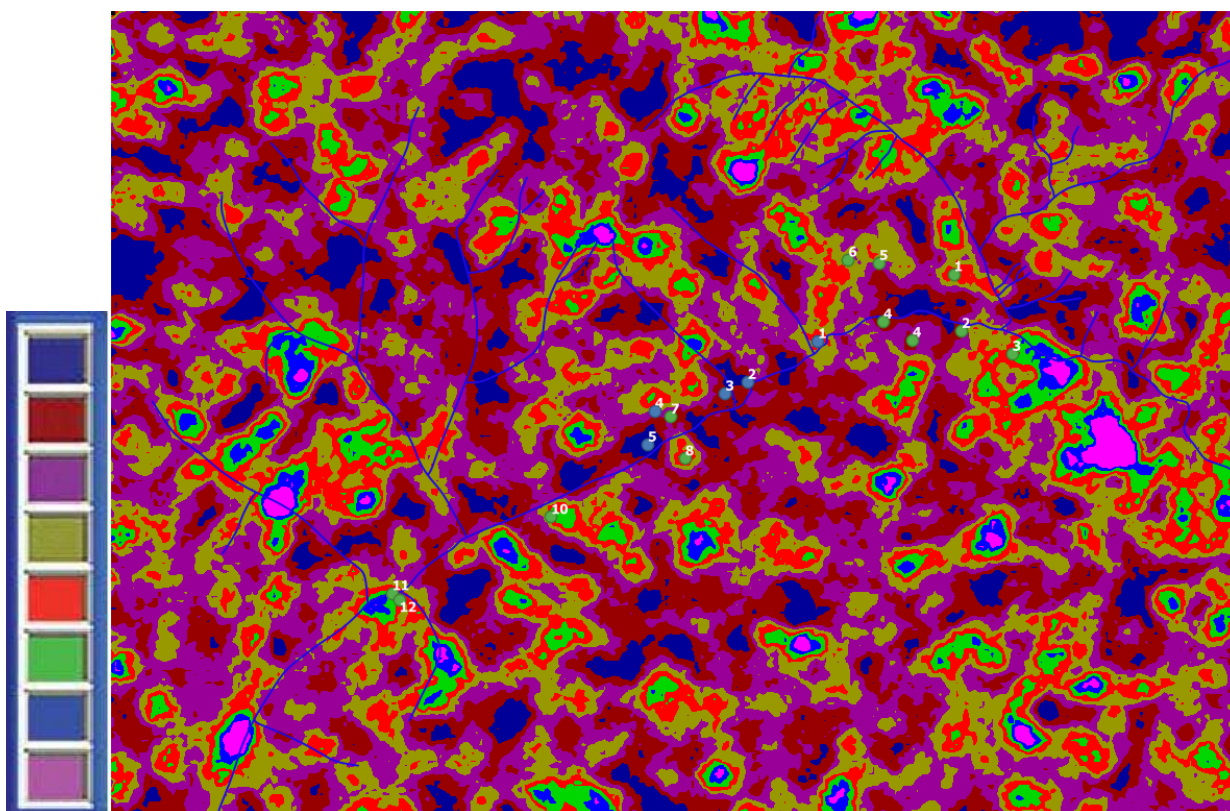


Рисунок - 3.29 Плотность штрихов 4 простирания со шкалой плотности штрихов

коррелируют с оползновыми участками, показанными на инженерно-геологических картах.

Три участка повышенной плотности линеаментов, расположенные в междуречье рек Кепша и Чвижепсе, сложены массивными известняками и мергелями верхнего мела с обильным развитием здесь карстовых воронок, поноров, пещер и других форм карстового рельефа. В этом же районе на левом и правом берегах долины р. Мзымта на инженерно-геологической карте масштаба 1:50000 показано большое количество осыпей, имеющих ЮЮВ-ую ориентировку, т.е. ориентировку линеаментов. По-видимому, карстовые формы рельефа и осыпи образовались в результате выщелачивания и дробления скальных карбонатных пород в зонах линеаментов ВСВ 67,5°.

На рисунке 3.31 приведена схема плотности линеаментов с простиранием В 90°, эти линеаменты служат путями миграции трещинно-жильных подземных вод с водоразделов в различные долины,

протягивающихся в субмеридиональном направлении. Два крупных участка повышенной плотности приурочены непосредственно к субмеридиональному участку долины р. Мзымта, расположенному ниже Красной Скалы. На инженерно-геологической карте масштаба 1:50000 в этом районе показано наличие большого количества мелких сплывин и оплывин, развитых в глинистом делювии мощностью 3-4,6 м.

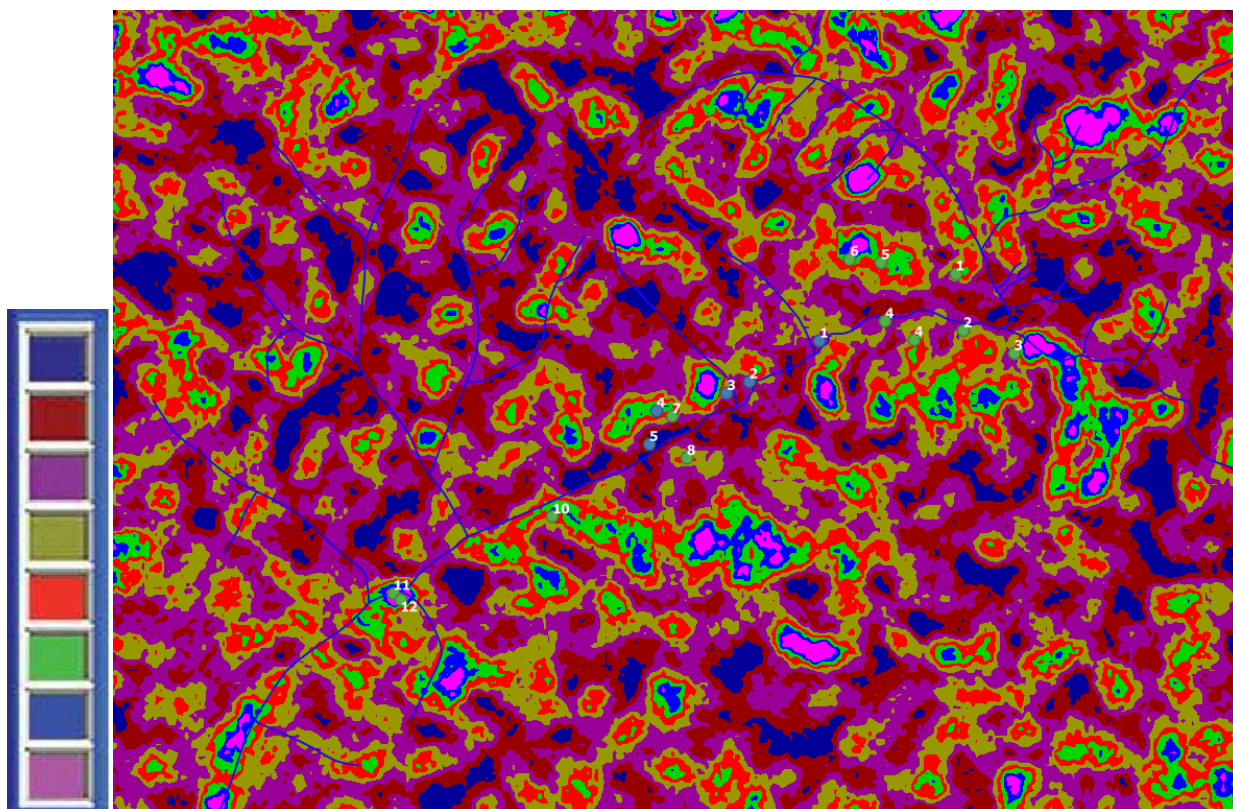


Рисунок - 3.30 Плотность штрихов 5 простирания со шкалой плотности штрихов

Несколько участков повышенной плотности субширотных линеаментов наблюдаются на субмеридионально вытянутых отрезках речных долин верхних притоков р. Чвижепсе и р. Лаура, а также рек Ржаная и Сулимовская. Это указывает на развитие здесь оползневых склонов, сложенных филлитами и графитистыми грифельными сланцами.

На рисунке 3.31 приведена схема плотности линеаментов с простиранием ВЮВ  $112,5^\circ$ , служащих путями миграции трещинно-жильных подземных вод с водоразделов в речные долины, протягивающиеся в

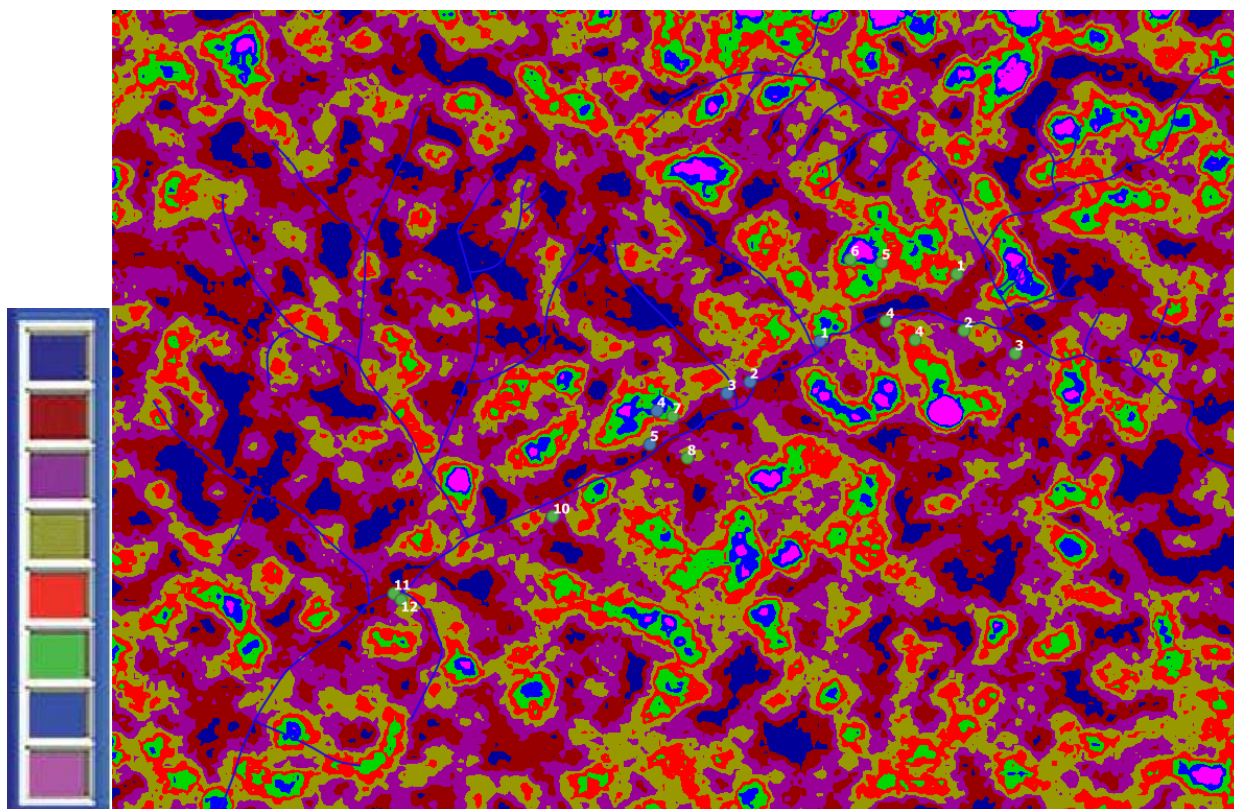


Рисунок - 3.31 Плотность штрихов в простирании со шкалой плотности штрихов

направлении ЮВЮ  $202,5^\circ$ . Такие направления долин характерны для правых притоков в нижнем течении р. Чвижепсе, нижней части долины р. Медовеевка, верховьев рек Бешенка и Лауры, для правых притоков р. Псоу. Инженерно-геологические карты и полевые исследования показывают наличие здесь отложений, развивающихся на крутых склонах, сложенных в основном трещиноватыми глинистыми сланцами и филлитами с прослоями алевролитов и песчаников нижней юры.

На рисунке 3.32 приведена схема плотности линеаментов с протиранием ЮВ  $135^\circ$ . Они служат путями миграции трещинно-жилильных подземных вод с водоразделов в речные долины, протягивающихся в направлении ЮЗ  $225^\circ$ .

Самые крупные участки повышенной плотности линеаментов данного простирания расположены в северо-западной и северной частях исследованного района и относятся к северному водоразделу бассейна р. Мзымта - и отрогам Главного Кавказского хребта. В нижней части

стратиграфического разреза наблюдаются глинистые сланцы и филлиты нижней юры, а в верхней грубослоистые (плитчатые) песчаники средней юры. Глинистые толщи характеризуются развитием оползневых процессов.

Вдоль грунтовой дороги от Красной Поляны до Хмелевских озер, наблюдаются оползневые тела, имеющие размеры: длина по основанию оползневого бугра 20-45м, высота оползневых уступов 9-15м, крутизна поверхности скольжения 30-45°. В плане бровки уступов имеют фестончатый рисунок за счет соединения оползневых цирков своими краями. Грунтовая дорога практически на всем протяжении проложена на тыловой части оползневых бугров. Это не единичный случай использования непрерывной цепочки оползневых тел для прокладки горных дорог (троп) в бассейне р.Мзымта с обильным развитием здесь оползневых процессов в глинистых породах нижней юры.

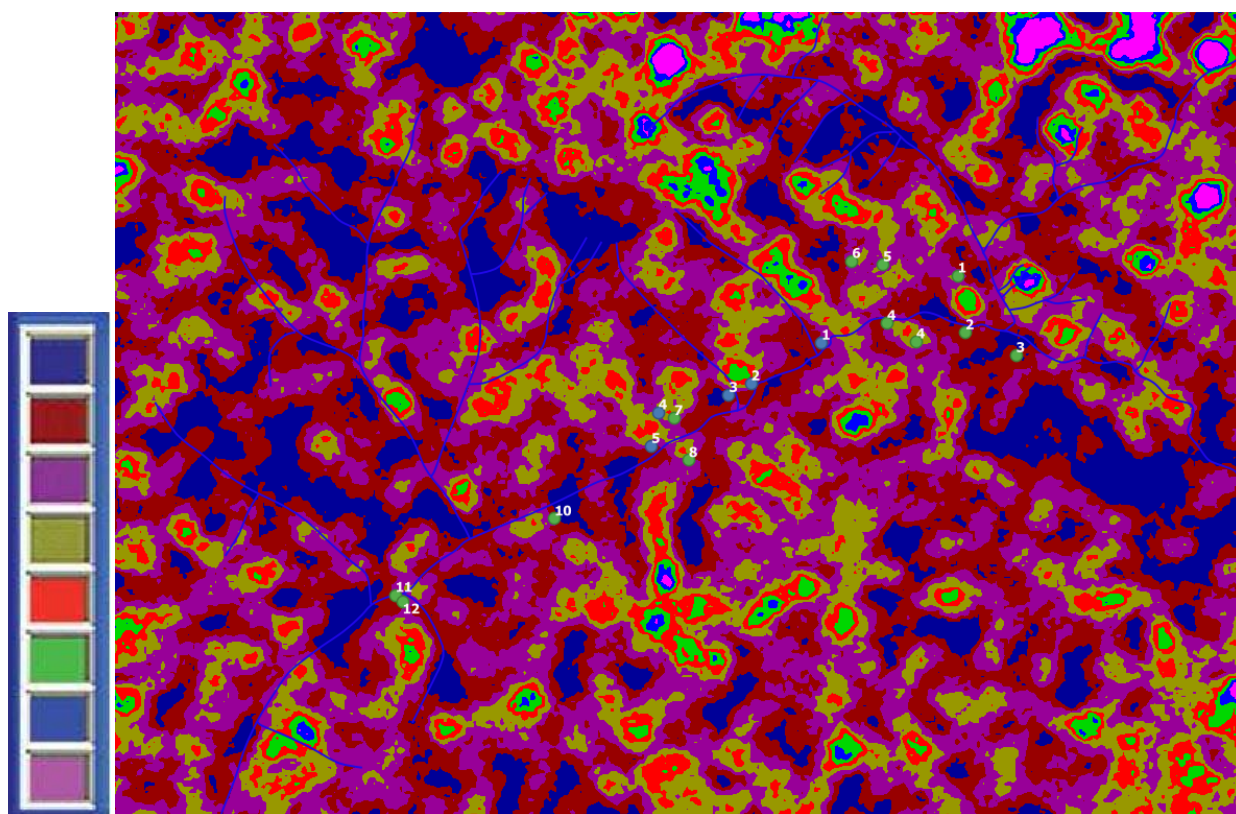


Рисунок - 3.32 Плотность штрихов 7 простирания со шкалой плотности штрихов

На левобережье р.Мзымта, напротив п.Эстасодок, в районе горнолыжных трамплинов, оползневые процессы развиты не менее интенсивно, чем на правом. Все олимпийские автомагистрали, ведущие к трамплинам, отделены от склонов мощными бетонными противооползневыми ограждениями. Толщина бетонных стенок ограждений достигает 0,5-0,7 м, высота 7 м. Оползневые тела здесь имеют размеры: длина по основанию оползневых бугров 45-80 м, высота оползневых уступов 8-40 м, врез оползневого цирка в склон 30-60 м. Коренные породы, представленные филлитами и графитистыми грифельными сланцами, которые интенсивно развальцованы, раздроблены и превращены в крошку (дресву и мелкообломочный щебень), обильно смоченную водой и образующую оползневые отложения.

Интенсивное дробление пород вызвала имеющаяся здесь зона разлома, характеризующаяся не только дроблением пород, но и наличием небольших (до 5 м) штокообразных окварцованных интрузивных тел диабазов. Эта зона разломов протягивается и дальше к ВЮВ, к долине р. Сулимовская, где так же наблюдаются окварцованные тела диабазов.

На рисунке 3.33 приведена схема плотности линеаментов с простиранием ЮЮВ  $157,5^{\circ}$ . Они служат путями миграции трещинно-жильных подземных вод с водоразделов в речные долины, протягивающихся в направлении ЗЮЗ  $247,5^{\circ}$ . Такое направление имеет долина р. Мзымта на протяжении почти всего района исследований от Роза Хутор до Монастыря. Поэтому не случайно аномальные участки плотности расположены вдоль ее коренного берега. Отдельные оползневые участки вдоль р. Мзымта отмечены на инженерно-геологических картах. Но как показали полевые исследования, их гораздо больше, благодаря широкому развитию здесь интенсивно раздробленных и обводненных филлитов.

Два участка повышенной плотности линеаментов ЮЮВ 157,5° находятся в бассейнах левых притоков р. Бешенка, имеющих ориентировку ЗЮЗ. На инженерно-геологических картах показано широкое развитие в этих местах оползневых процессов.

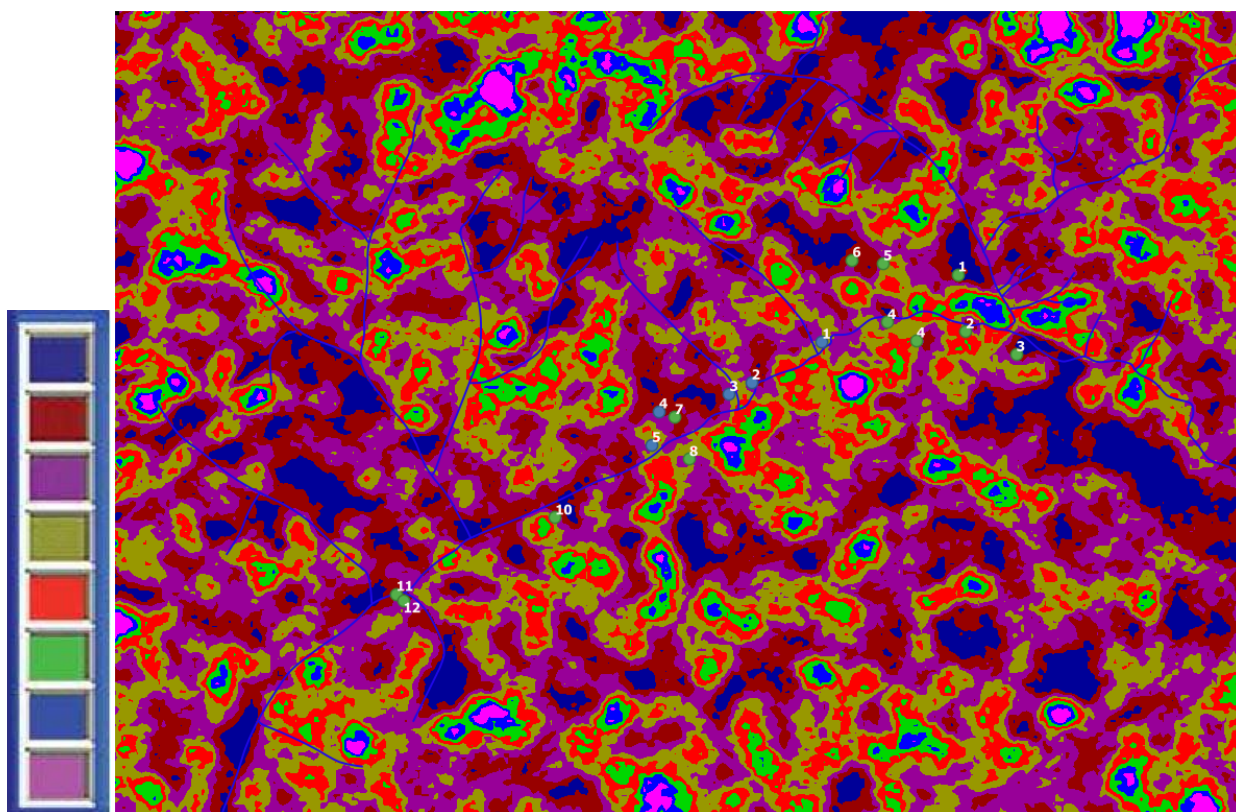


Рисунок - 3.33 Плотность штрихов 8 простираения со шкалой плотности штрихов

Целая серия аномальных участков повышенной плотности линеаментов ЮЮВ 157,5° наблюдается в бассейне р. Псоу. Долина р. Псоу имеет в целом ориентировку ЗЮЗ. Она пересекает зоны линеаментов ЮЮВ 157,5°, по которым мигрируют трещинно-жильные подземные воды. Подземные воды смачивают развитые здесь раздробленные глинистые породы и тем самым способствуют развитию оползневых процессов.

Широко развитые в бассейне р. Мзымта оползневые процессы несут не только прямую угрозу населению, но и косвенную. Рыхлый материал оползневых склонов легко размывается водой и вовлекается в селевой процесс с образованием катастрофических грязевых и грязекаменных потоков.

Интенсивность проявления селевых процессов в Краснополянском районе чрезвычайно высока. Селеопасны все постоянные и временные водостоки в бассейн р. Мзымта, прорезающие оползневые отложения: рек Ржаная, Сулимовская, Лаура, Ачипсе, Бешенка, Монашка, Чвижепсе, Медовеевка, Кепша, Краснополянка.

Автоматизированный линеаментный анализ космических изображений выявил аномальные участки повышенной плотности штрихов разных простираний. Совместный анализ полученных схем плотности штрихов, инженерно-геологическими картами масштабов 1:10000, 1:50000 и результатов полевых исследований показал приуроченность оползневых процессов (оползневых склонов) к участкам повышенной плотности штрихов, служащих путями миграции подземных трещинно-грунтовых и трещинно-жильных вод от водоразделов к речным долинам.

Дробление и трещиноватость слоистых терригенных и терригенно-карбонатных горных пород, их смачивание на крутых склонах способствует смещению масс горных пород вниз по склону и образованию оползневых форм рельефа. В связи с этим главной задачей при прогнозе развития оползневых процессов является выявление участков с повышенной плотностью штрихов, ориентированных поперек речных долин крутых склонов (с уклоном более  $5^{\circ}$ ) и чередования сложных осадочных горных пород или интенсивно раздробленных пород одного вещественного состава (глинистых сланцев, филлитов и др.).

Выполненные исследования показали, что выявление оползневых склонов на основе данных автоматизированного линеаментного анализа космических изображений нередко является более полными, чем это показано на имеющихся крупномасштабных инженерно-геологических картах (масштабы 1:10000, 1:50000).

#### **Выводы:**

- Пакет LESSA, при помощи выделения повышенных плотностей штрихов, позволяет уверенно выделять оползневые участки пластичного течения и

блокового смещения на склонах с уклоном более  $5^\circ$ , поперечных к речным долинам;

- По аналогичной методике можно выделять пути миграции и области разгрузки трещинно-жильных вод, что представляет особый интерес для водоснабжения населения;

### **3.4. Разработка алгоритма геодинамического районирования с использованием автоматизированного линеаментного анализа аэрокосмических снимков**

Геодинамическое районирование недр позволяет оперативно осуществлять оценку, прогноз и контроль состояния массива горных пород на любой стадии освоения недр и земной поверхности. В его основе лежит выделение блочной структуры массива, активных разломов, тектонически напряженных зон, а также результаты исследований различных инженерно-геологических показателей горных пород и геологической среды. Оно используется при разработке месторождений полезных ископаемых и горнопроходческих работ при строительстве тоннелей, шахт и других подземных горных выработок [79].

Земная кора находится в предельно напряженном состоянии за счет суммарного воздействия гравитационных, конвективных, контрационных, изостатических, приливных и других внутривоздушных и космических сил. Изменение напряженного состояния, обуславливающее деформирование массива горных пород, в подавляющем большинстве случаев приходит толчкообразно (скачкообразно). Эти толчкообразные изменения происходят как на, макро- так и на микроуровнях, как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии.

Толчкообразные изменения внешне проявляются в виде многочисленных мелких геодинамических явлений типа стреляния, толчков, вплоть до катастрофических геодинамических явлений в форме горных

ударов, тектонических и техногенных землетрясений. Горный удар и землетрясение представляется, как хрупкое разрушение горных пород, находящихся в «предельно напряженном состоянии, когда скорость изменения напряженного состояния пород превышает максимально возможную скорость выхода их из-под нагрузки за счет релаксации» [79].

В 1990 г. при дешифрировании поля шахты «Юнком» в Донбасе все внезапные выбросы газовых углеводородов совпали с зонами разрывных нарушений и трещин, в основном с узлами их пересечения. По пластовым дегазационным скважинам, пересекающим узлы трещинных коллекторов, отмечалась повышенная концентрация метана.

Обобщение данных по местам возникновения землетрясений подтвердило их приуроченность к активным тектоническим разломам и узлам их пересечений [60, 62]. Расположение гипоцентров событий именно в разломных зонах и тектонических узлах проявляется тем очевиднее, чем выше точность определения их положения.

«Элементы линеаментно-блоковой структуры (линеаменты, узлы их пересечения, блоки) являются основой аэрокосмических методов оценки эколого-геодинамической опасности на различных этапах освоения земных недр и, в частности, нефтегазовых месторождений» [80].

Процесс тектонодинамического анализа линеаментно-блоковой структуры обычно осуществляется в несколько этапов. «Вначале осуществляется анализ геофизических карт и составленных на их основе карт тектонического каркаса, отражающих наиболее крупные и устойчивые в истории геологического развития структурные неоднородности: блоки и разделяющие их межблоковые зоны.

Полученные схемы на следующем масштабном уровне сопоставляются с более подробными картами складчатой и разломной тектоники и осуществляется процедура детализации и ранжировки элементов каркаса с

использованием результатов дешифрирования среднемасштабных космических снимков и топографических карт» [81]

На локальном уровне исследований по результатам дешифрирования космических снимков высокого разрешения и их соответствия с крупномасштабными геолого-геофизическими материалами выделяется линеаментно-блоковые структуры более высоких рангов. Таким образом на нефтегазовых месторождениях Западной Сибири, например, на региональном уровне были выделены блоки земной коры с преимущественными размерностями 300-350, 100-110 и 30-35 км для значений сторон блоков, а на локальном с преимущественным размером 10-12, 3-3,5, 1-1,1 км для значений сторон блоков. На региональном уровне ширина межблоковых зон линеаментов от 2 до 25 км, а на локальном – от 70 до 100 метров [82, 80].

Данная процедура выделения и ранжирования линеаментно-блоковой структуры представляет собой достаточно длительный и трудоемкий процесс.

В данной диссертации разработана и используется значительно менее трудоемкий алгоритм геодинамического районирования, основанный на использовании статистических показателей развития штрихов, получаемых при автоматизированном линеаментном анализе космических снимков. Этот алгоритм, представленный на рисунке 3.34, позволяет выделить блоки земной коры разных рангов, оценить оползневую опасность, выявить пути миграции подземных вод.

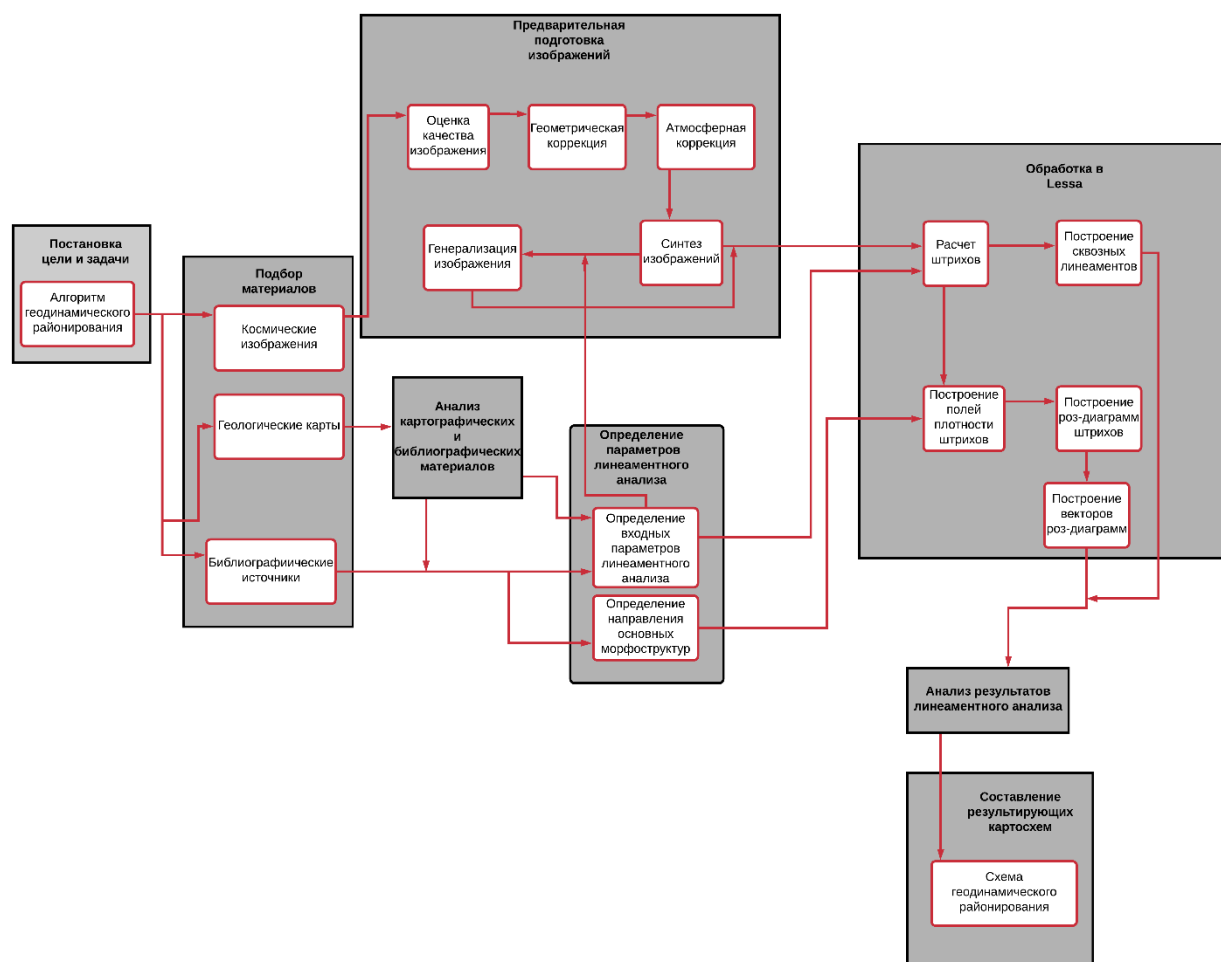


Рисунок - 3.34 Алгоритм геодинамического районирования при помощи линеamentного анализа

Следует отметить, что статистические показатели, получаемые при автоматизированном линеamentном анализе для целей геодинамического районирования, использовались и ранее некоторыми исследователями. Но их выводы носили общий характер и не отражали иерархию уровней (ярусов) строения геодинамических систем. Так например, А.А. Златопольский [35], используя различные статистические показатели (плотность штрихов, розы-диаграммы, линии вытянутости роз-диаграмм), космические снимки и ЦМР с разным пространственным разрешением ограничился лишь выделением крупных блоков земной коры, которые сопоставлялись с тектоническими блоками, выделяемыми на «Международной тектонической карте Европы и смежных областей» масштаба 1: 2 500 000. более детальное строение (более мелкие блоки) не были выделены (рис. 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4).

Возможности разработанного в рамках диссертации метода проиллюстрированы на примере исследований, выполненных в районе проектируемого туннеля БАМ [83].

Второй Байкальский туннель длиной 6682м проводится параллельно существующему тоннелю под Даванским перевалом Байкальского хребта (рисунок 3.35). Максимальная глубина заложения туннеля 300м под седловиной перевала Дабан, средняя глубина по трассе -180м.

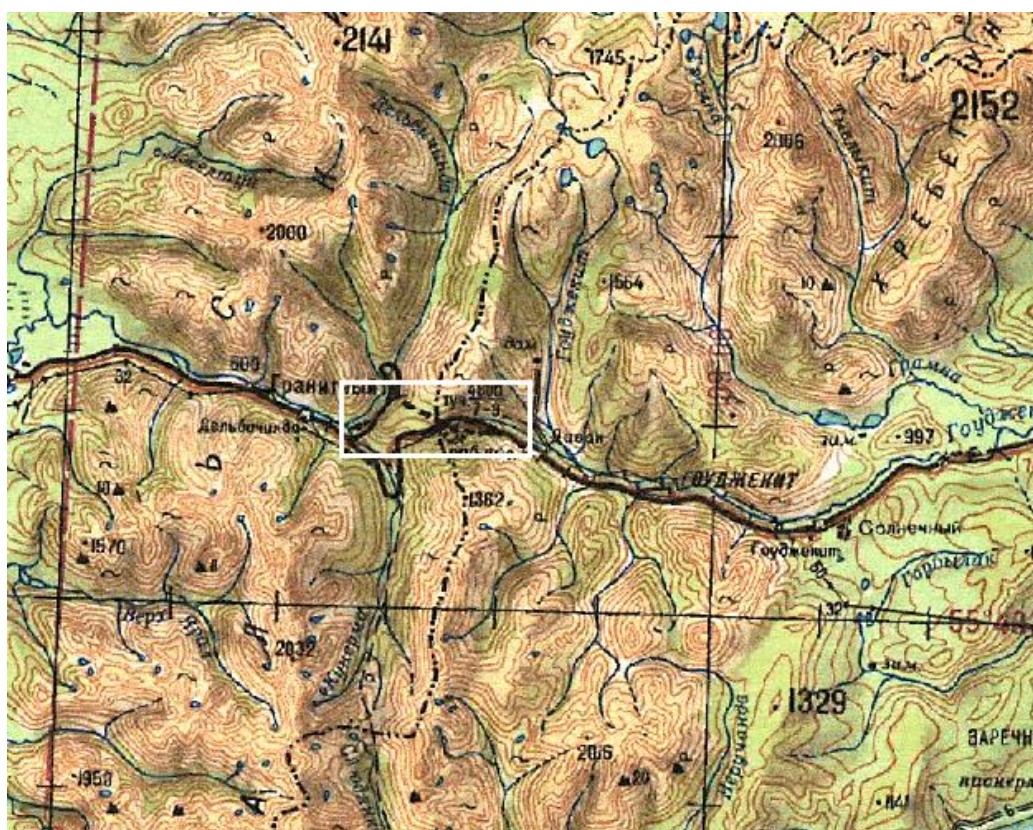


Рисунок - 3.35 Обзорная географическая карта района строительства Байкальского туннеля

Горный массив, пересекаемый Байкальским туннелем, сложен комплексом магматических пород. В тектоническом отношении участок расположен в региональной зоне глубинного разлома или в Даванской зоне смятия, в которой наблюдается широкое проявление тектонических дислокаций. Наиболее характерными являются: надвиговые зоны, зоны

интенсивного дробления и милонитизации пород, швы неотектонических движений.

Район строительства относится к зоне Байкальского рифта с сейсмичностью до 9 баллов. Непосредственно на участке тоннеля выделен ряд зон тектонических нарушений. Породы в зонах разломов сильно трещиноватые, часто раздробленные.

Гидрогеологические условия строительства тоннеля определены как сложные. Грунтовые воды приурочены к рыхлым четвертичным отложениям, трещинно-жильные к тектоническим нарушениям и зонам.

Монолитные и слаботрещиноватые породы характеризуются как устойчивые. Трещиноватые, сильнотрещиноватые и раздробленные породы характеризуются соответственно, как средней устойчивости и неустойчивые при большом водопитоке. 94 % протяженности тоннеля сложены слабо трещиноватыми, прочными и очень прочными породами, где условия строительства определяются как благоприятные. На остальных 6% протяженности тоннеля наблюдаются тектонизированные, трещиноватые породы от средней прочности до прочных.

При проходке первого Байкальского тоннеля в зонах концентрации горизонтальных напряжений, отмечались отдельные случаи шелушения и стреляния в забое и своде тоннеля, которые прекращались при возведении крепи.

В качестве исходных данных использован синтез 2,3 и 5 спектральных каналов снимка Landsat – 5. В результате автоматизированного линеаментного анализа получены сквозные линеаменты, суммарная плотность штрихов, ориентированных поперек и вдоль основных морфоструктур и линии вытянутости роз-диаграмм штрихов при пространственном разрешении 30 м/пиксель и 60 м/пиксель.

Границы блоков массива горных пород определялись по изменению формы и ориентировки осей роз-диаграмм штрихов. В пределах одного блока они однотипны. Использование космических снимков с разным пространственным разрешением позволяет выделить блоки разных иерархических уровней.

На рисунке 3.36 показаны результаты выделения сквозных линеаментов при пороге 50. Четко прослеживается преобладание линеаментов, имеющих северо-восточное простирание. Эти морфоструктурные линеаменты делят земную кору на ряд узких блоков, вытянутых в северо-восточном направлении.

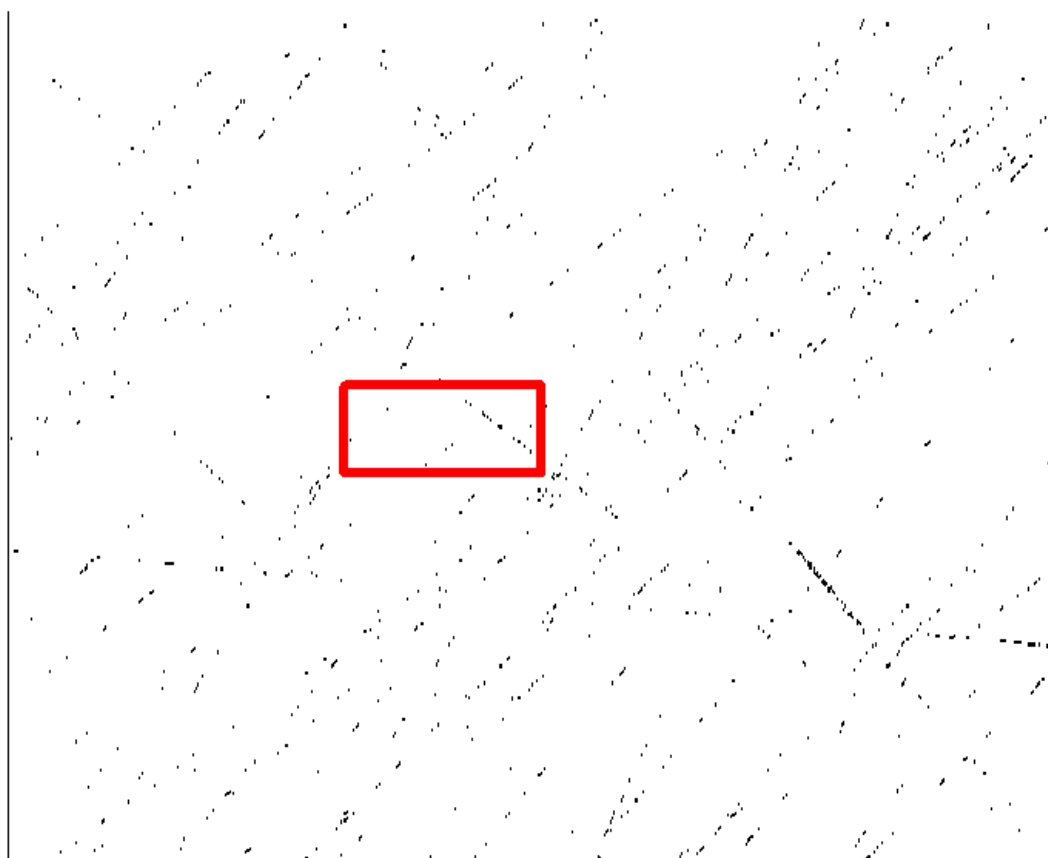


Рисунок - 3.36 Сквозные линеаменты, выявленные в районе расположения Байкальского туннеля

Преобладание этого направления в регионе также показано на государственной геологической карте СССР в масштабе 1:1000000 N-49 (50) [84].

По сравнению с геологической картой поле линеаментов, выявленное при автоматизированном линеаментном анализе космического снимка Landsat, показывает более детальную картину блокового строения земной коры и ее большую раздробленность.

Среди других наблюдается один линеамент субширотного направления, расположенный к югу от тоннеля, и три диагональных морфоструктурных линеамента с северо-западным простиранием.

Байкальский тоннель находится в узле пересечения двух диагональных линеаментов с северо-восточной и северо-западной ориентировками. Подобное положение туннеля в узле пересечения активных разломов показывает, что он находится в зоне возможных локальных концентраций напряжений и, вызванных этими напряжениями, подвижек.

Исследуемый район сложен в основном докембрийскими гранитами и гранитоидми, которые к западу от тоннеля прорывают докембрийские метаморфические породы. Главенствующая роль интрузивных пород и связанная с ними прототектоника (зоны трещин, возникшие при становлении интрузива) определили сложнейший ветвистый рисунок гидросети. Это подтверждает ветвистый характер линий вытянутости роз-диаграмм штрихов (рисунок 3.37).

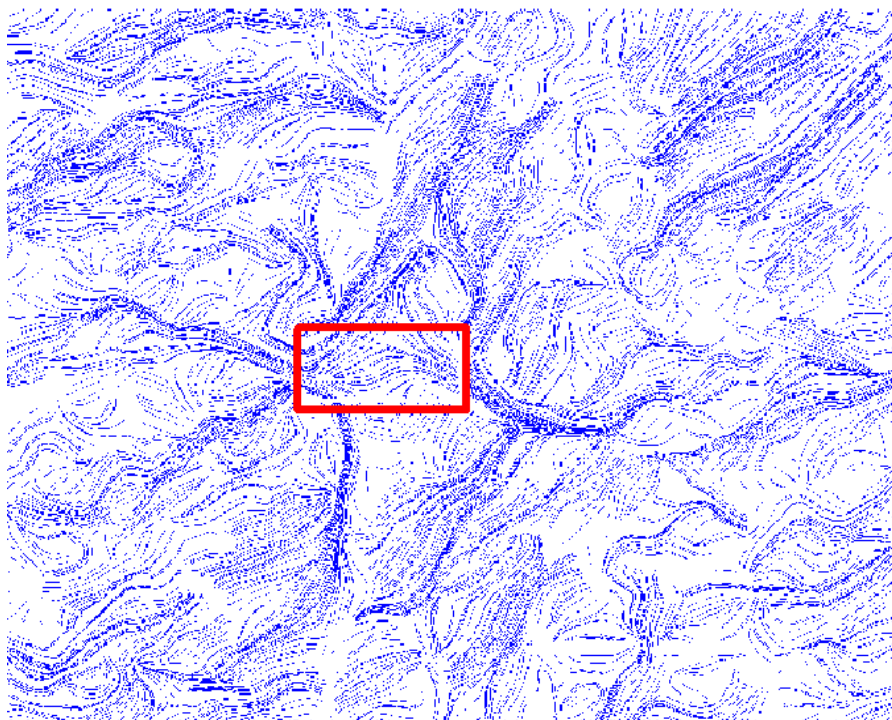


Рисунок - 3.37 Линии вытянутости роз-диаграмм штрихов

Сквозные линеаменты и линии вытянутости роз-диаграмм соответствуют морфоструктурным линеаментам 1-го и 2-го рангов соответственно. Для выявления разломов и блоков более высоких рангов целесообразно использовать поля роз-диаграмм штрихов и плотности штрихов различных простираний.

Для однородных тектонических блоков данные статистические показатели будут близки, а для гетерогенных различны. Изменение формы роз-диаграмм и направления их вытянутости указывает на то, что мы перешли на другой блок, а граница (зона) изменения, соответствует разломам, разграничивающим данные блоки.

Для того, чтобы выявить разломы более высокого порядка (3-го порядка) использованы генерализованные космические снимки Landsat с разрешением 60 м/пиксель.

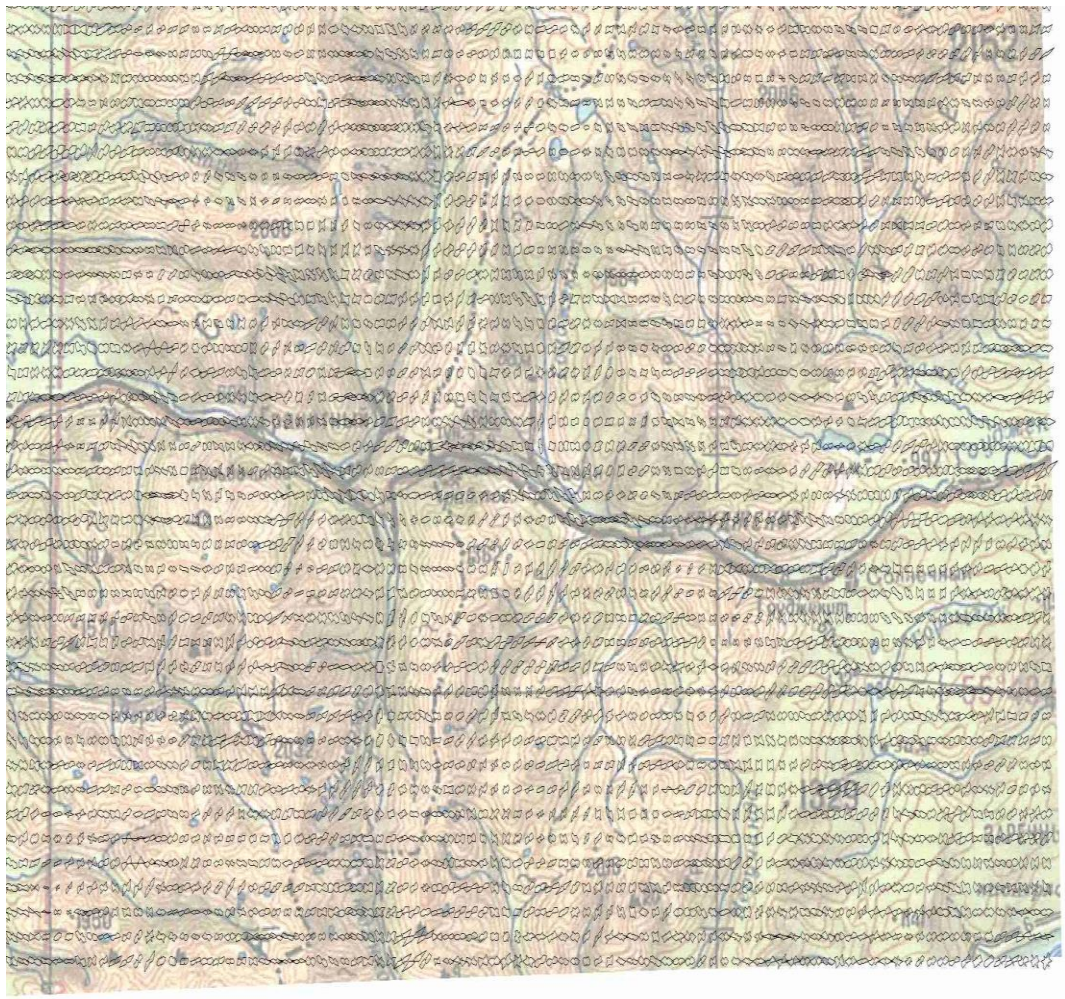


Рисунок - 3.38 Схема роз-диаграмм штрихов, полученная при автоматизированном линеаментном анализе генерализованного Landsat (пространственное разрешение 60 м/пиксель)

На рисунке 3.38 приведены схемы роз-диаграмм штрихов, построенных при автоматизированном линеаментном анализе генерализованного космического снимка Landsat (пространственное разрешение 60 м/пиксель). По однотипному рисунку роз-диаграмм выделяется ряд блоков 3-го порядка. Наиболее легко эти блоки выделяются по диаграммам векторов штрихов (рисунок 3.40).

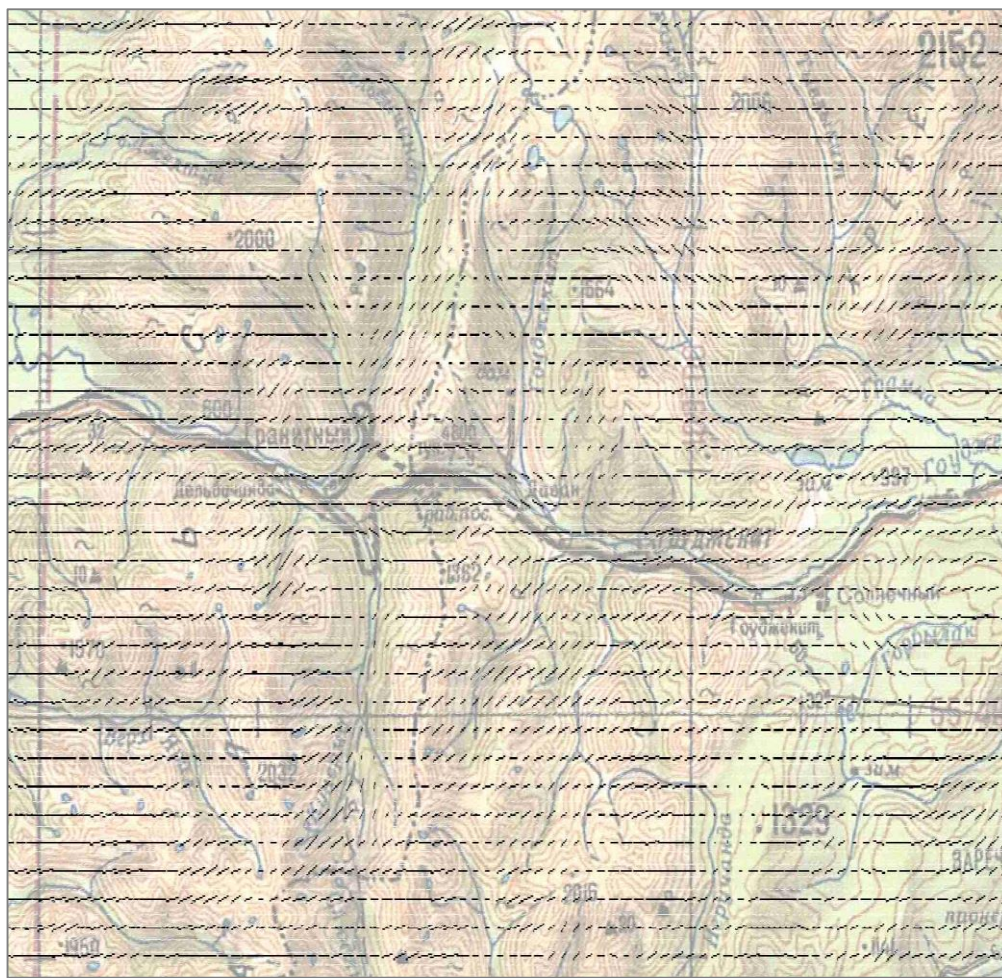


Рисунок - 3.39 Диаграмма векторов штрихов

На рисунке 3.40 Показаны разломы 3-го порядка, разграничивающего поля (блоки) с разной ориентировкой вытянутости роз-диаграмм штрихов. Форма блоков достаточно сложная в виде многоугольников разных размеров.

Южнее расположен крупный блок с ориентировкой векторов штрихов ССВ и СВ.



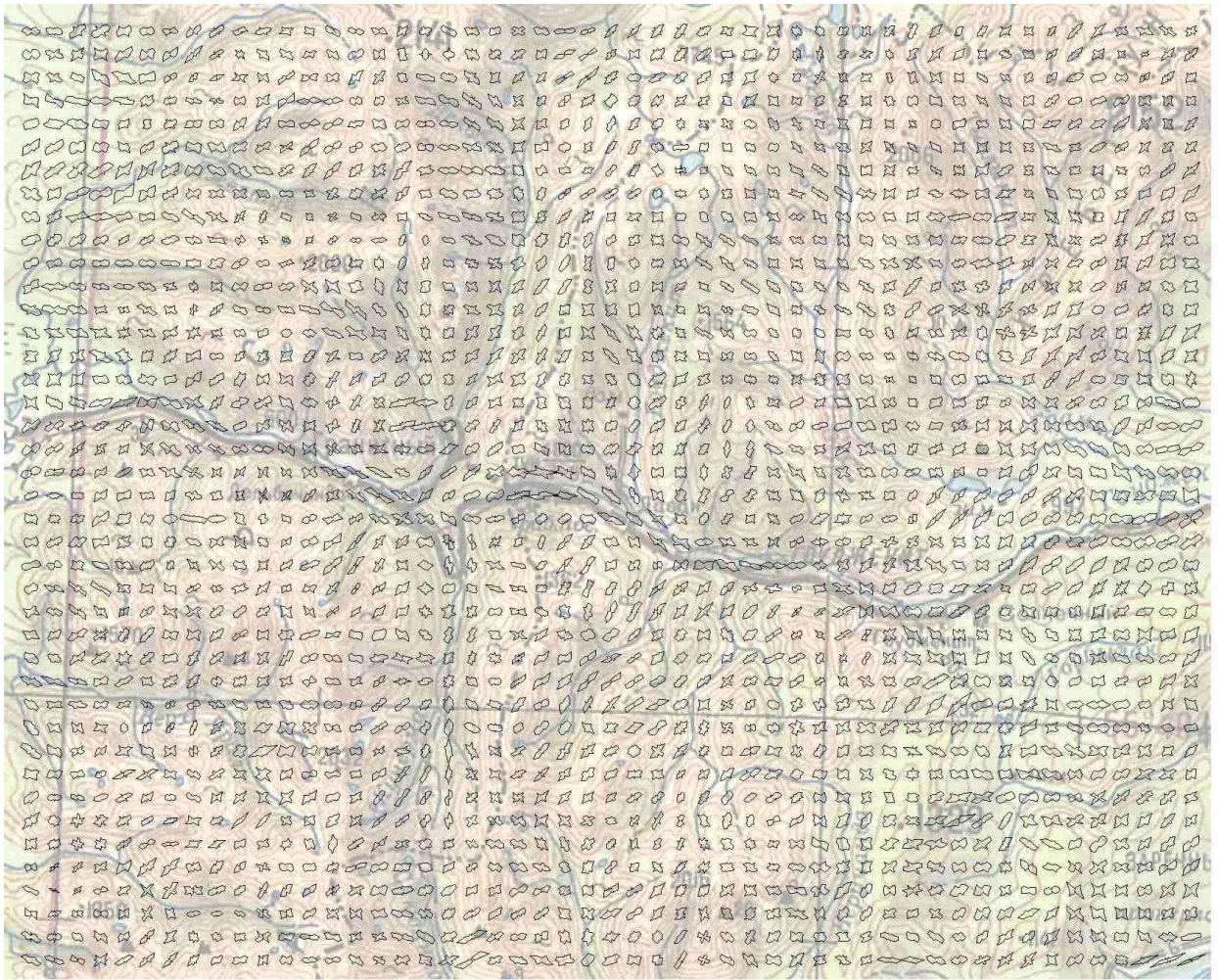


Рисунок - 3.41 Схема роз-диаграмм штрихов, полученная при автоматизированном линеamentном анализе исходного Landsat (пространственное разрешение 30 м/пиксель)

Таким образом, автоматизированный линеamentный анализ позволил выявить блоки разных рангов (порядков), отличающихся напряженно-деформированным состоянием, индикатором которого является форма и вытянутость роз-диаграмм линеamentов. Для более детального геодинамического районирования исследуемой территории необходимо проводить наземные наблюдения и использовать космические снимки более высокого пространственного разрешения.



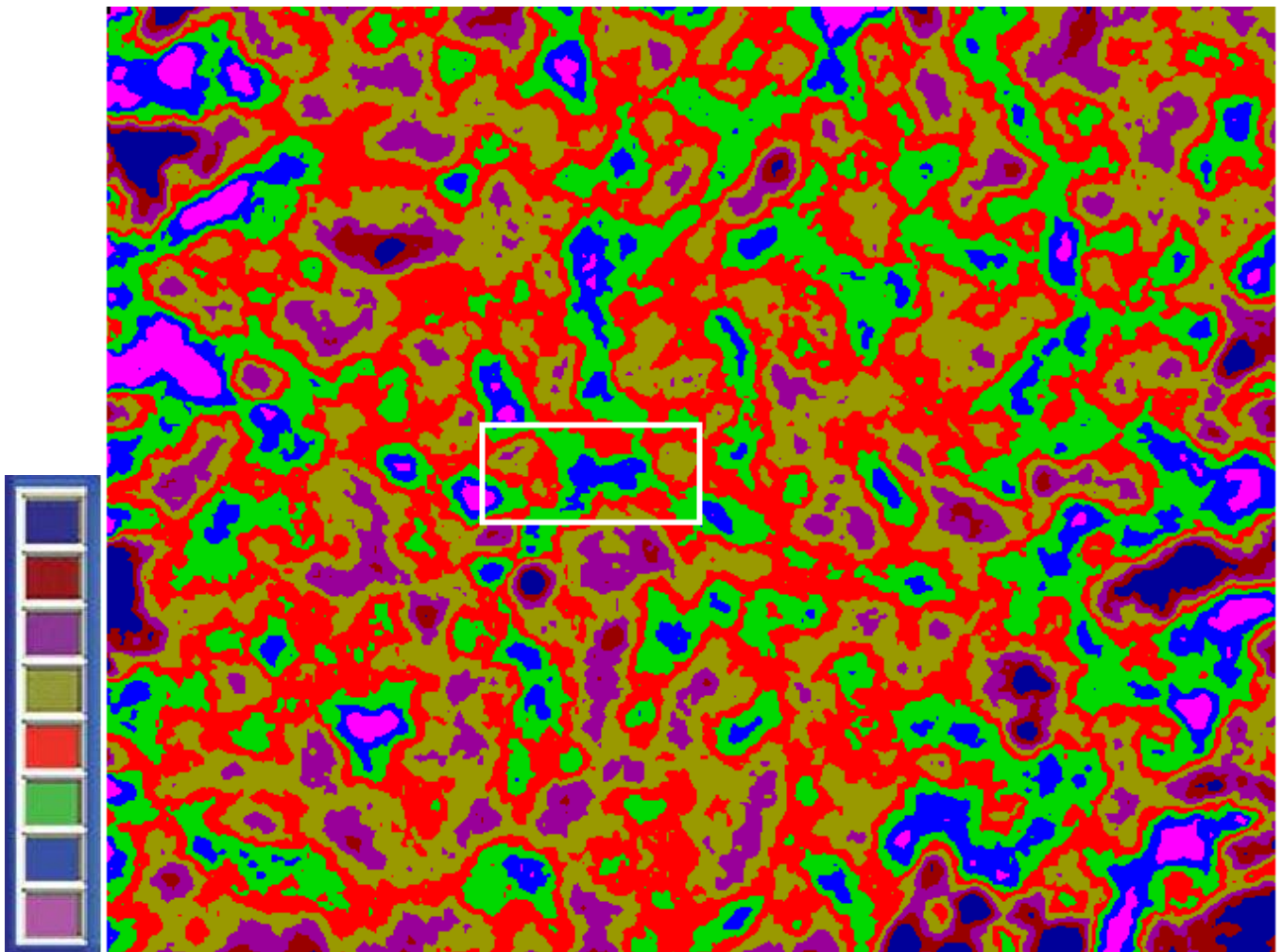


Рисунок - 3.43 Схема суммарной плотности штрихов всех направлений со шкалой плотности штрихов

Минимальная плотность штрихов наблюдается в виде локальных участков на горных массивах, расположенных в основном к югу от реки Гоуджекит.

На основании выявленных статистических закономерностей развития систем линеаментов на исследуемой территории можно выделить три геодинамических района:

1-районы повышенной трещиноватости массивов горных пород, характеризующиеся наличием условий растяжения;

2-районы средней плотности трещин, характеризующееся стабильными условия развития;

3-районы минимальной трещиноватости горных пород, характеризующиеся условиями сжатия.

Байкальский туннель расположен в пределах второго района, т.е. района, промежуточного по геодинамическому состоянию. Близость к нему зон растяжения (долин рек Гоуджекит и Дельбигинда) осложняет геодинамическую обстановку и понижает устойчивость горных склонов.

Река Гоуджекит имеет субширотное направление, а ее основные притоки в районе туннеля имеют субмеридиональное направление течения. Для геодинамического анализа наибольший интерес имеют именно эти направления простирания локальных и региональных линеаментов, т.к. для коренных склонов долины р.Гоуджекит главные пути миграции подземных вод и развития склоновых процессов имеют секущие ее субмеридиональные направления. Для ее притоков секущими являются субширотные направления.

Учитывая это, проанализируем схемы плотности штрихов, имеющих данные ориентировки. С этой целью исследуем поля плотности штрихов, полученные при автоматизированном линеаментном анализе Landsat-5 по направлению 1 и 6 (рис 3.44 и 3.45).

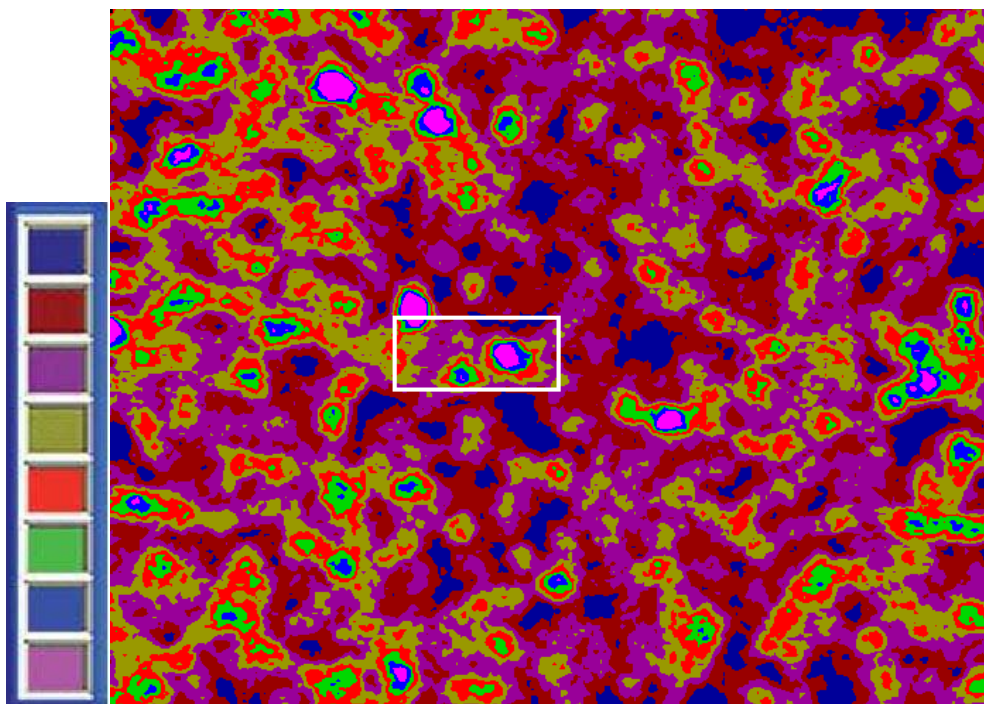


Рисунок - 3.44 Схема плотности штрихов 1  
простираия со шкалой плотности штрихов

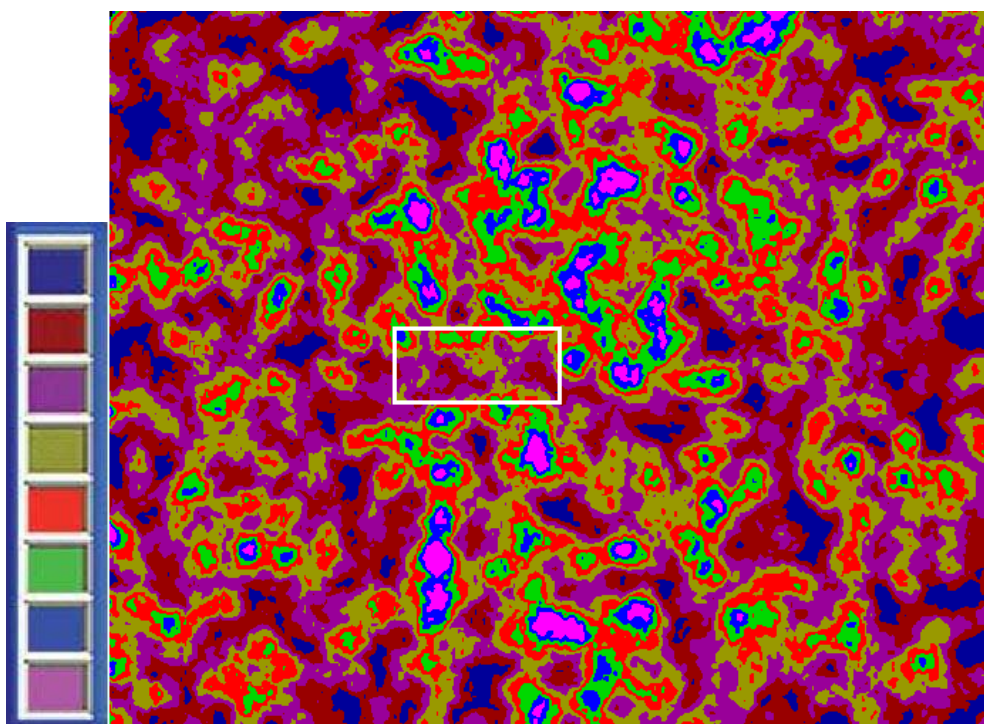


Рисунок - 3.45 Схема плотности штрихов 6  
простираия со шкалой плотности штрихов

По направлению 1 вблизи тоннеля имеется два аномальных участка повышенной плотности штрихов. Один аномальный участок расположен в зоне тоннеля, а другой немного севернее Вахтового поселка. К этим участкам с повышенной трещиноватостью массивов горных пород, ориентированной поперек коренных склонов реки Гоуджекит и правого притока реки Дельбичинда, приурочены пути миграции подземных вод, что способствует интенсивному развитию склоновых процессов (оползни, солифлюкций, селей и др.).

По направлению 6 наблюдается аномально повышенная плотность штрихов вдоль левых и правых притоков реки Гоуджекит, а именно рек Дельбичинда, Гоуджескит, Грамна, Кунерма и др., являющихся областями разгрузки подземных вод с главных морфоструктур (горных хребтов) данного региона. Обильное смачивание коренных склонов долин притоков реки Гоуджекит способствует активному развитию здесь склоновых процессов, сопровождающихся смещением масс сверху вниз по склону.

Учитывая все перечисленные факторы была составлена схема полей напряжений в районе Байкальского тоннеля (рисунок 3.46). Участок массива, в котором проводится строительство Второго Байкальского тоннеля следует

относит к склонному к горным ударам. Соответственно при проходке тоннеля должно контролироваться состояние горного массива.

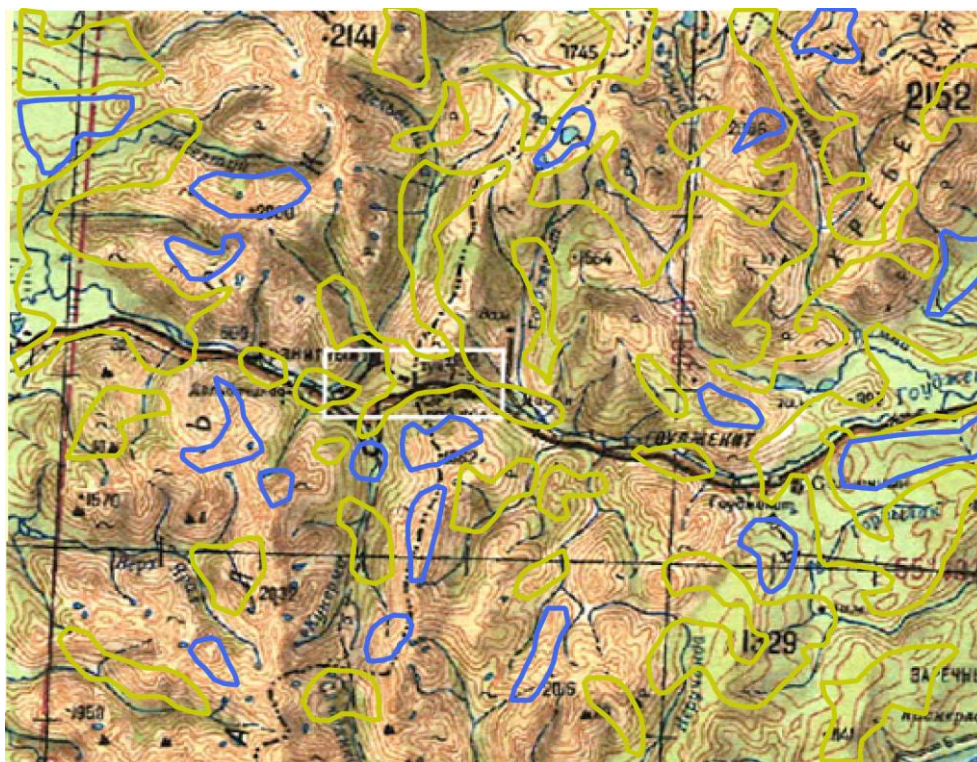


Рисунок - 3.46 Схема поля напряжений в районе Байкальского тоннеля. Желтая – зона растяжения, синяя – зона сжатия

### Выводы:

- Проведенный, с помощью специального алгоритма, автоматизированный линеаментный анализ позволяет показать, что тоннель находится в зоне растяжения;
- Многоуровневый линеаментный анализ космических снимков позволяет выделить до 4 иерархических уровней блоков земной коры;
- Сквозные линеаменты и линии вытянутости роз-диаграмм штрихов соответствуют морфоструктурным линеаментам 1-го и 2-го рангов соответственно;

- Розы-диаграммы штрихов полученные при разных уровнях генерализации соответствуют блокам 3-го и 4-го порядка;
- Повышенные или пониженные значения плотности штрихов, позволяют судить о наличии зон сжатия или растяжения соответственно;
- Плотность штрихов позволяет выделять пути миграции и разгрузки подземных вод, и как следствие спрогнозировать места развития оползней, селей, солифлюкции.

## Заключение

В ходе выполнения данной работы получены следующие результаты:

1. Разработана технологическая схема методики использования, автоматизированного линеаментного анализа космических снимков для решения природно-ресурсных и природоохранных задач, представляющая собой системный набор этапов (процедур) обработки космических изображений земной поверхности.
2. Разработан алгоритм прогноза нефтегазовых месторождений на основе выявления участков повышенной плотности продольных и поперечных линеаментов (штрихов) по отношению к морфоструктурам, являющихся местами, благоприятными для локализации углеводородов.
3. Разработан алгоритм прогноза, оползневых склонов на основе выявления участков, характеризующихся повышенной плотностью линеаментов (штрихов), ориентированных поперек склонов, которые являются зонами миграции подземных вод, способствующих смещению массивов горных пород вниз по склону.
4. Разработан алгоритм геодинамического районирования территории с использованием многоуровневого автоматизированного линеаментного анализа космических изображений с выделением блоков земной коры разных иерархических уровней, относительно стабильных зон и зон растяжения и сжатия.
5. На примере нефтегазовых месторождений показано, что при исследовании линеаментов целесообразнее использовать

космические снимки, а не цифровые модели рельефа (ЦМР). Так как в ЦМР не выражен целый комплекс ландшафтных прямых и косвенных дешифровочных признаков, что не позволяет выявить часть линеаментов.

6. Проанализирован и обобщен опыт по применению анализа линеаментной тектоники для решения различных научно-практических задач, связанных с выявлением разломов (в том числе трансформных разломов), прогнозом рудных месторождений и прогнозом землетрясений.
7. Предложенное в диссертационной работе развитие методов и алгоритмов применения автоматизированного линеаментного анализа может способствовать повышению роли знания линеаментной тектоники для решения научных и практических задач по выявлению, изучению и прогнозу природных (в том числе негативных) процессов, связанных с тепломассопереносом и деформацией земной поверхности (эрозионных, карстовых, склоновых, вулканических, сейсмических и других процессов).
8. Разработанные методики использования, автоматизированного линеаментного анализа внедрены в производственный процесс.

## Список литературы

1. Хоан Фам Суан. Разработка технологии автоматизированного обнаружения и анализа линеаментов и кольцевых структур на космических изображениях: дис. канд. техн. наук: 25.00.34 / Хоан Фам Суан./ – М., 2012. – 173 с.
2. Mogaji K.A., Aboyeji O.S. и Omosuyi G.O. // Mapping of lineaments for groundwater targeting in the basement complex region of Ondo State, Nigeria, using remote sensing and geographic information system (GIS) techniques // Int. J. Water Res. Environ. – 2011.
3. Kelly V.C. Regional tectonics of the Colorado Plateau and relationship to the origin and distribution of uranium. - New Mexico. - 1955. – 120 p.
4. Кац Я.Г., Полетаев А.И. и Румянцева Э.Ф. // Основы линеаментной тектоники. – М.: Недра. -1986. – 144 с.
5. Краснобаев А.А. // Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации. – М. : Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. -2005. - №114.
6. С.В. Викторов // Индикация природных процессов [Раздел книги] // Теоретические вопросы фотоиндикации. – Л., -1971.
7. Gonzalez R.C. Woods R.E. // Digital Image Processing. 3rd -Prentice Hall. - 2007. – 976 с.
8. Ziou D. Tabbone S. // Edge Detection Techniques. - Québec: Département de Math et Informatique, Université de Sherbrooke. -1997. – С. 1-141 .
9. Papari G. и Petkov N. // Edge and line oriented contour detection: State of the art // Image Vis. Comput. - 2-3, Vol. 29 - 2011. - pp. 79-103.
10. Rosenfeld A. Thurston M. // Edge and Curve Detection for Visual Scene Analysis // IEEE Trans. Comput. – 5, Vol. C-20. – 1971. - pp. 562 – 569.
11. K.S.Shanmugam, Dickey F.M. и Green J.A. //An Optimal Frequency Domain Filter for Edge Detection in Digital Pictures // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 1, Vol. PAMI-1. - 1979. - pp. 37 –49.
12. Marr D. Hildreth E. // Theory of Edge Detection // Proc. Roy. Soc. Lond. B Biol. Sci. -1167, Vol. 207. . - 1980. - pp. 187–217.
13. Canny J. A. // Computational Approach to Edge Detection // Pattern Anal. Mach. Intell. – 6, Vol. 8. - IEEE Trans. -1986. - pp. 679–698.
14. Canny J.F. // Finding Edges and Lines in Images.: AITR-720 – 1983.
15. Santis A. De и Sinisgalli C.A. // Bayesian approach to edge detection in noisy images // Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions. - 6 , Vol. 46. - 1999. - pp. 686-699.
16. Smith S.M. Brady J.M. // SUSAN — A New Approach to Low Level Image Processing // Int. J. Comput. Vis. - Vol. 23/ - 1995 г. - pp. 45-78.

17. Б.Б. Мандельброт // Фрактальная геометрия природы.- М.: - 2002. - стр. 656.
18. S. Wang; W. Yao-nan // Image edge detection based on multi-fractal spectrum analysis // Front. Electr. Electron. Eng. China. – 2, Vol. 1. - 2006. - pp. 146-152.
19. T.M. Lutz // An Analysis of the Orientations of Large-scale Crustal Structures:A Statistical Approach Based on Areal Distributions of Pointlike Features // J. Geophys. Res. – 1, Vol. 91. – 1986. - pp. 421–434.
20. Hammer Ø. // New statistical methods for detecting point alignments // Comput. Geosci. - 3 : T. 35. – 2009. - pp. 659–666.
21. T.M. Lutz, J.T. Gutmann // An improved method for determining and characterizing alignments of pointlike features and its implications for the Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico // J. Geophys. Res. - B9, Vol. 100. - 1995 - pp. 17659–17670.
22. G. Wadge; A. Cross // Quantitative methods for detecting aligned points: An application to the volcanic vents of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Mexico // Geology. – 9, Vol. 16. – 1988. - pp. 815–818.
23. C.B.Connor // Cinder Cone Clustering in the TransMexican Volcanic Belt: Implications for Structural and Petrologic Models // J. Geophys. Res. - B12, Vol. 95. - 1990. - pp. 19395–19405.
24. C.B. Connor // Evidence of Regional Structural Controls on Vent Distribution: Springerville Volcanic Field, Arizona // J. Geophys. Res. - B9, Vol. 97. - 1992 - pp. 12349–12359.
25. Wadge G. Cross A.M. // Identification and analysis of the alignments of point-like features in remotely-sensed imagery: Volcanic cones in the Pinacate Volcanic Field, Mexico // Int. J. Rem. – 3, Vol. 10. – 1989. - pp. 455–474.
26. D. Zhang, T. Lutz // Structural control of igneous complexes and kimberlites: a new statistical method // Tectonophysics. - 1-2, Vol. 159. - 1989. - pp. 137–148.
27. Amorese D., Lagarde J.-L. и Laville E. // A point pattern analysis of the distribution of earthquakes in Normandy (France) // Bull. Seismol. Soc. Am. – 3, Vol. 89. – 1999. - pp. 742–749.
28. Arcasoy A., Toprak V. и KaymakçI N. // Comprehensive Strip Based Lineament Detection Method (COSBALID) from point-like features: a GIS approach // Comput. Geosci. – 1, Vol. 30. – 2004. - pp. 45-57.
29. R. Negrete-Aranda // Regional orientation of tectonic stress and the stress expressed by post-subduction high-magnesium volcanism in northern Baja California, Mexico: Tectonics and volcanism of San Borja volcanic field // J. Volcanol. Geoth. Res. - 1-2, Vol. 192. - 2010. - pp. 97–115.

30. A.M. Casas // LINDENS: A program for lineament length and density analysis // Comput. Geosci. - 9-10, Vol. 26. – 2000. - pp. 1011–1022.
31. Zlatopolsky A.A. // Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comput. Geosci. – 1, Vol. 23. – 1997. - pp. 45–62.
33. A.A. Zlatopolsky // Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis-experimental results // Comput. Geosci. -9, Vol. 18. – 1992. pp. 1121–1126.
34. Златопольский А.А., Малкин Б.В. // Автоматизированный анализ ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (программа “LESSA”) - «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» // - М. -2006. - стр. 188-195.
35. А.А. Златопольский // Методика измерения ориентационных характеристик данных - Пятая Юбилейная Открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007
36. И.Г. Гордиенко // «Опытно-методические работы по использованию комплекса «Прогноз для автоматизированной обработки аэрокосмической информации» за 1983-1986 гг. / ЦКАГЭ "Объединения Аэрогеология". – М.: -1987. - стр. 362.
37. Златопольский А.А. // Особенности определения направления естественных объектов и текстур по растровым дистанционным данным - «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Т. 4. // – М. : -2007. - стр. 52–56.
38. М.В. Щепин // Автоматизированный программный метод анализа изображений аэрокосмических фотопланов. создание векторизованной тематической карты лесных массивов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сборник научных статей. - Т. 2. – 2005. - стр. 321–324.
39. М.В. Щепин // Автоматизированный анализ ландшафтных и тектонических структур по аэрокосмическим снимкам. Программа ALINA. Снимки системы LANDSAT // Сб. тезисов третьей всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли». – 2005.- стр. 196.
40. М.В. Щепин // ALINA Автоматизированный анализ изображений аэрокосмических фотопланов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Сборник научных статей. - Т. 3. - стр. 143–146.
41. М.В. Щепин // Программа ALINA. Метод свернутых роз. Метод геологических исследований и геологического районирования на основе программной обработки аэрокосмических изображений // Современные

- проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Сборник научных статей. - Т. 2. – М.: ООО «Азбука-2000», 2007. - стр. 162–171.
42. Щепин М.В. Евдокимов С.В., Головченко Ю.В. // Выявление кольцевых структур по результатам обработки изображений космических снимков // Исследование Земли из космоса. - Т. 4 - 2007 - стр. 74–87.
  43. Al-maitah K.J. и Jordan A. // Location of the Dams Using Gis Techniques: A Case Study of the Hrh Tasneem Bint Ghazi for Technology Research Station. // Proc. of Third National GIS Symposium in Saudi Arabia // - Le Meridian, Al-Khobar.
  44. V.V. Asmus // Software system for satellite data processing of applied tasks in remote sensing of the Earth // Pattern Recogn. Image Anal. – 3, Vol. 19. - pp. 372–379.
  45. С.Л. Шевырёв // Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде MATLAB // Успехи современного естествознания. - Т. 10. - 2018 - стр. 138-143.
  46. O’Driscoll E.S.T. // Observations of the Lineament--Ore Relation // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Math. Phys. Sci. – 1539, Vol. 317. – 1986. - pp. 195-218.
  47. Я.Г. Кац // Кольцевые структуры лика планеты // Новое в жизни, науке, технике. - Т. 5. / ред. М. Иваненко. -Л.: Знание. -1989.
  48. Kim S.-T. Lee K., Song M.Y. // Application of remotely sensed imagery to water resources analysis with hydrologic well data at the Haenam area, west-southern part in Korean peninsular // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. '02. 2002, IGARSS '02. 2002. – Vol.4 // - IEEE International, -2002. - pp. 2226–2228..
  49. R. Ramesh Kumar T. // Digital analysis of lineaments—A test study on South India // Comput. Geosci. -4, Vol. 17. – 1991. - pp. 549–559.
  50. Argialas D.P. и Mavrantza O.D. // Comparison of Edge Detection and Hough Transform Techniques for the Extraction of Geologic Features // Proceedings of the XXth ISPRS Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
  51. LINE — Lineament Extraction. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.pcigeomatics.com/cgi-bin/pcihlp/LINE.>: [сайт].
  52. Бондур В.Г. и Зверев А.Т. // Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из Космоса. – 2005. - стр. 37-52.
  53. Бондур В.Г. и Зверев А.Т. // Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Доклады Академии наук. – 1, Т. 402. – 2005. - стр. 98-105.
  54. Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В., Зима А.Л. // Исследование из космоса предвестниковой цикличности при подготовке землетрясений,

- проявляющейся в динамике линеаментных систем // Исследование Земли из космоса. - Т. 1. – 2012.- стр. 3-20.
55. Стриженок А.А. Мингазов М.Н., Хворонова Т.Н. // Прогнозирование тектонической трещиноватости карбонатных отложений для оптимизации размещения горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. - 3. – М.: -2007. - стр. 30-31.
56. Бондур В.Г. Зверев А.Т. // Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. - Т. 1. - 2007 - стр. 47-56.
57. Бондур В.Г., Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. // Проблемы мониторинга и предсказания природных катастроф. // Исследование Земли из космоса. - Т. 1. - 2005 - стр. 3-14.
58. Л.А. Макриденко К.А. Боярчук, Л.В. Милосердова, Н.И. Малушина // Информативность космических изображений для нефтегазогеологического дешифрирования // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. - Т. 105. - стр. 63-81.
59. Ю.В. Нечаев // Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. – М.: ИФЗ РАН. -2010. - стр. 215.
60. А.Д. Гвишиани; А.И. Горшков; Е.Я. Рануман // Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. – М.: Наука. - 1988. - стр. 176.
61. Г.Г. Кочарян // Инициирование природных катастроф и техногенных аварий сейсмическими колебаниями малой амплитуды // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - Т. 6. – 2012. - стр. 483-496.
62. А.А. Соловьев; А.Д. Гвинашиани; А.И Горшков // Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. - Т. 2 – 2014. - стр. 3-20.
63. Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Гончаров М.А., Наймарк А.А., Копаев А.В. // Линеаменты, планетарная трещиноватость и регматическая сеть: суть явлений и терминология // Геотектоника. - Т. 2. - 2014. - стр. 75-88.
64. А.Т. Зверев // Инженерная геодинамика // - М.: МИИГАиК, 2013. - стр. 326.
65. Зверев А.Т., Малинников В.А. и Донов В.В. // Методика оценки оползневой опасности на Черноморском побережье Кавказа на основе линеаментного анализа аэрокосмических изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - Т. 6. – 2007 - стр. 86-92.

66. Петрусевич М.Н., Казик Л.И. // Практическое руководство по аэрофотогеологии / ред. МГУ. – М.: -1977. - стр. 190.
67. Михайлов А.Е., Корчуганова Н.И., Баранов Ю.Б. // Дистанционные методы в геологии // - М.: Недра. -1993. - стр. 224.
68. М.Н. Валях // Аэрофотографические и сканерные аэрометоды при инженерно-геологических исследованиях // - М.: Недра. -1982. - стр. 261.
69. А.В. Садов // Аэрокосмические методы в инженерной геодинамике // - М.: Недра. -1988. - стр. 204.
70. С.А. Сладкопепцев // Изучение и картографирование рельефа с использованием аэрокосмической информации // -М.: Недра. -1982. - стр. 216.
71. С.А. Несмеянов // Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа) // -М.: Научный мир. -1999. - стр. 392.
72. Зверев А.В. и Зверев А.Т. // Обобщение опыта применения автоматизированного линеаментного анализа космических снимков при поисках эндогенных и нефтегазовых месторождений, прогнозе землетрясений, склоновых процессов и путей миграции подземной воды // Известия вузов. Геология и разведка. - Т. 6. - 2015. - стр. 14-20.
73. Зверев А.В. и Зверев А.Т. // Методика поиска нефтегазовых месторождений с использованием линеаментного анализа космических снимков // Сборник статей по итогам научно-технической конференции. - 1 : Т. 7. – 2014. - стр. 160-163.
74. Зверев А.Т., Зверев А.В. и Салимон Э.А. // Прогноз нефтегазовых месторождений на основе линеаментного анализа // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 3 : Т. 62. - 2018 - стр. 337-345.
75. Зверев А.Т., Али Кахтан Амин // Результаты использования космических снимков для оценки нефтегазоносности территорий Йемена // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - Т. 1. – 1996. - стр. 62-69.
76. ВСЕГЕИ // Карта полезных ископаемых. Лист L-(37). Масштаб 1 : 1 000 000 // - Мин. природных ресурсов России. -2000. - Санкт-Петербургская картографическая фабрика.
77. ЗАО "СЕВКАВТИСИЗ" // Карта инженерно-геологических условий, совмещенная с картой опасных геологических условий. Масштаб 1 : 10 000// - 2007.
78. ОАО "МОСГИПРОТРАНС" //Инженерно-геологическая карта. Масштаб 1 : 50 000 // -2007.
79. Петухов И. М., Батугина И. М. // Геодинамика недр // - М.: Горная книга. -1999. - стр. 288.

80. В.В. Кравцов // Оценка эколого-геодинамической опасности освоения месторождений нефти и газа Западной Сибири с использованием дистанционных методов // Международная конференция "Фундаментальные проблемы разработки нефтегазовых месторождений, добыча и транспортировка углеводородного сырья // - М.: -2004. - стр. 294-295.
81. В.В. Кравцов // Оценка эколого-геодинамической опасности освоения месторождений нефти и газа Западной Сибири с использованием аэрокосмической информации // – М.: -2005. - стр. 117.
82. Жданович В.В., Кравцов В.В., Кузьмин Ю.О., Никонов А.И. // Оценка геодинамической опасности и геодинамического риска Анадырской трубопроводной системы // Горный информационно-аналитический бюллетень, - Т. 9. // -М.: МГТУ. -2002. - стр. 48-55.
83. Захаров В.Н. Зверев А.В., Зверев А.Т., Малинников В.А., Малинникова О.Н // Опыт геодинамического районирования горных районов с использованием автоматизированного линеаментного анализа космических снимков // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Материалы XXV Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича // - Алушта. -2015. - стр. 57-64
84. ВСЕГЕИ // Государственной геологическая карта СССР. Лист N-49 (50). Масштаб 1 : 1 000 000// -Чита. -1986.
85. L.A. Spacek // Edge detection and motion detection // Image Vis. Comput. - 1, Vol. 4. – 1986. - pp. 43–56.
86. Shen J., Castan S. // An optimal linear operator for step edge detection // CVGIP: Graphical Models and Image Processing. – 2, Т. 54. – 1992. - стр.112–133.
87. R. Deriche // Using Canny’s criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector // Int. J. Comput. – 2, Vol. 1. – 1987. - стр. 167–187.
88. М.Н. Hueckel // An Operator Which Locates Edges in Digitized Pictures // J. ACM. – 1, Т. 18. – 1971. - стр.113–125.
89. М. Хюккель // Оператор нахождения контуров на кодированных изображениях [Конференция] // Интегральные роботы: Сб. статей // -М.: Мир. -1973. - стр.225-240.
90. Nayar S.K., Baker S., Murase H. // Parametric feature detection // Proceedings Computer Vision and Pattern Recognition // IEEE Computer Society Conference. -1996. -pp. 471 –477.
91. Konishi S.M., Yuille A.L., Coughlan J.M. A Statistical Approach to Multi-Scale Edge Detection // Image Vis. Comput. (IVC), Special issue on Generative-Model Based Vision. - 2003 г.. - 1 : Т. 21. - стр. 37-48.

92. Bezdek J.C., Chandrasekhar R., Attikouzel Y. // A geometric approach to edge detection // -IEEE Transactions: Fuzzy Systems, - 1, Т. 6. . – 1998. pp. 52-75.
93. Qi D. // Application of Fractal Dimension in Edge Detection of Log with Rotten Knot Image // IEEE International Conference // -2007. -pp. 2868 – 2873.
94. В.Г. Бондур // Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. - Т. 6. – 2010 -стр. 3-17.
95. А.В. Зверев // Сравнение результатов линеamentного анализа космического снимка и цифровой модели рельефа. // Известия Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - Т. 2. -2014. - стр. 96-99.
96. W.H. Hobbs // Earth features and their meaning // New York: Macmillian Co. -1912. -p. 506.
97. O’Leary D.W., Friedman J.D., Pohn H.A. // Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms // Bull. Geol. Soc. Am. – 10, Vol. 87 . – 1976. -pp. 1463–1469.
98. А.М. Ануфриев // Аэрокосмометоды в геологии \ Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина. Кафедра Региональной геологии // -2007. - стр. 85.
99. Корчуганова Н.И., Межеловский И.Н., Загубный Д.Г. // Использование методов новейшей тектоники при поисках полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. .. – 3, Т. 2. -2007. - стр. 79–84.
100. Д.Г. Загубный // Выявление информативных признаков распространения кимберлитовых тел восточной сибирей и сейсмогенных структур горного алтая на основе обработки дистанционных данных в авторской программе «LINEAMENT»: Автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук: 25.00.35 . – М.: 2010. г.. - МГГРУ. - стр. 27.
101. Ziou D., Tabbone S. // Edge Detection Techniques — An Overview: TR-195 // . - Québec, Canada : Département de Math et Informatique, Université de Sherbrooke. -1997. -pp. 1-41.
102. Papari G., Petkov N. // Edge and line oriented contour detection: State of the art // Image Vis. Comput. - 2-3, Vol. 29. -2011. - pp. 79–103.
103. Mabee S.B., Curry P.J., Hardcastle K.C. // Correlation of Lineaments to Ground Water Inflows in a Bedrock Tunnel // Ground Water. – 1, Vol. 40. – 2002. - pp. 37–43.
104. Hobbs W.H. // Lineaments of the Atlantic border region // Bull. Geol. Soc. Am. - Т. 15. -1904. -pp. 483–506.
105. T. Balin // Feature Extraction Algorithm for Space Targets Based on Fractal Theory // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. – 2, Т. 6795. // -2007. -pp. 679518.1–679518.5.

106. P.H.Karnkowski, Ozimkowski W. //The distribution of oil-and gasfields in relation to satellite image interpretation: an example from the polish east carpathians and the adjacent foredeep // J. Petrol. Geol. – 2, Vol. 21 // -1998. - pp. 213–231.
107. N.C. Fitton, S.J.D. Cox // Optimising the application of the Hough transform for automatic feature extraction from geoscientific images // Comput. Geosci. -10, Vol. 24. -1998. -pp. 933-951.
108. Li L., Qi D. // Detection of Cracks in Computer Tomography Images of Logs Based on Fractal Dimension // IEEE International Conference // -2007. -pp. 2259 –2264.
109. R.O. Duda, P.E. Hart // Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Comm. ACM. – Vol. 15. -1972. -pp. 11-15.
110. Brock B.B. // A global approach to geology // - Cape Town, South Africa. -p. 365.
111. Conci A., Monteiro L.H. // Multifractal characterization of texture-based segmentation Proceedings // International Conference on Image Processing // . - Vancouver, BC, Canada. -2000. -pp. 792-795.
112. Ahmed F. Relationships of mineral deposits and lineament analysis of the Red Sea region, northeastern Sudan // Adv. Space Res., Vol. 3, No. 2, 1983. pp. 71–79.
113. Alexander D., Formichi R. Tectonic causes of landslides // Earth Surface Processes and Landforms., Vol. 18, No. 4, 1993. pp. 311-338.
114. Hueckel M.H. An Operator Which Locates Edges in Digitized Pictures // J. ACM., Vol. 18, No. 1, 1971. pp. 113-125.
115. Бондур В.Г., Кузнецова Л.В. Proc. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Global Monitoring for Sustainability and Security // Космический мониторинг геодинамики сейсмоопасных территорий с использованием метода линеаментного анализа.
116. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Proc. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Global Monitoring for Sustainability and Security // Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий. Санкт-Петербург. 2006. Vol. 3. сс. 177–183.
117. Oskoei M.A., Hu H.A. Survey on Edge Detection Methods: Technical Report CES-506. Colchester CO4 3SQ, United Kingdom: School of Computer Science & Electronic Engineering, 2010.
118. Краснобаев А.А. Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Vol. 114, 2005, 20с.
119. Краснобаев А.А. Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации. Москва:

Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН., 2005.

120. Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В. Закономерность предвестниковой динамики линеаментов, регистрируемых из космоса, при землетрясениях // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка., Vol. 1, 2014. pp. 89-94.
121. Донов В.В. Разработка методики многоуровневого линеаментного анализа аэрокосмических изображений и прогноза оползневой опасности: дис. канд. техн. наук. МИИГАиК, 2009. 120 с.
122. Баранская А.В. Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий Российской Арктики: дис. канд. географ. наук: 25.00.25 / Баранская Алиса Владимировна. –Санкт-Петербург. – 2015, 236 с.
123. Попков В.И.. Отражение глубинной структуры "закрытых" территорий в дневной поверхности // Геология, география и глобальная энергия, No. 3, 2010. pp. 45-53.

## Список сокращений

БАМ – Байкало-Амурская магистраль

ВЮВ – восток-юго-восток

СВ – северо-восток

ЦМР – цифровая модель рельефа

ЮЗ – юго-запад

ЮЮВ- юг-юго-восток