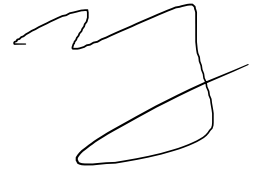


На правах рукописи



Зверев Андрей Владимирович

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

Специальность 25.00.34 — Аэрокосмические исследования Земли,  
фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном университете геодезии и картографии» на кафедре космического мониторинга и экологии.

**Научный руководитель**

**Малинников Василий Александрович**, доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра «Космического мониторинга и экологии»

**Официальные оппоненты:**

**Мелкий Вячеслав Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, лаборатория вулканологии и вулканопасности, ведущий научный сотрудник

**Стыценко Федор Викторович**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт космических исследований РАН, Лаборатория 563 Спутниковый мониторинг наземных экосистем

**Ведущая организация:**

федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИИЦ РАН)

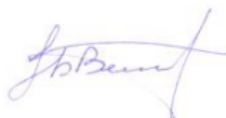
Защита диссертации состоится «9» апреля 2019 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК и на сайте <http://miiгаik.ru/upload/iblock/d25/d25ee3c1cfe3f388760f78688bcdb864.pdf>

Автореферат разослан «\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Беленко Виктор Владимирович

## **Общая характеристика работы**

**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 линеamentному анализу космических изображений.

В диссертационной работе обобщены результаты многолетних исследований различных авторов по применению автоматизированного линеamentного 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 линеamentов для прогноза месторождений полезных ископаемых. Неоднократно отмечалась приуроченность месторождений к морфоструктурным линеamentам и особенно к местам (узлам) их пересечения.

Однако физическая природа линеamentов, 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 линеamentов, нередко пересекающих всю платформу и уходящих за ее пределы. Рядом авторов отмечается, что выделение зон разрывных нарушений и трещин по линеamentам требует объективного обоснования их геологической природы. Однако при этом отмечается, что в горно-складчатых областях выделяемые по космическим снимкам линеamentы 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) линеamentов регионального и глобального уровней. Что же касается штрихов (локальных линеamentов), 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, связанные 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

- 24<sup>th</sup> 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 «Чепаковское» 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».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 статей, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России, 1 из них в журнале, входящем в международную реферативную базу данных Chemical Abstracts.

**Структура и объём и диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, списка принятых сокращений. Общий объём диссертации 121 страниц, включая 58 рисунков. Список литературы включает 123 наименований, в том числе 57 наименований на английском языке.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, задачи и обоснована научная новизна исследований, показаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту научные результаты, отмечена достоверность и апробация результатов диссертационного исследования.

**Первый раздел** посвящён анализу современного состояния проблемы автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений земной поверхности.

В настоящее время линеаментный анализ рассматривается как метод геолого-геофизических и природно-ресурсных исследований, суть которых заключается в пространственной корреляции выделенных линеаментов с имеющимися геологическими и геофизическими материалами, а также



идентификации линеаментов и их систем (зон) с отдельными разрывами, зонами трещиноватости, флексурами и прочими линейными элементами геологического строения, установленными ранее геологическими, геофизическими, полевыми (и дистанционными) методами, а также выделении автономных линеаментов и их систем, требующих дальнейшего изучения с целью установления и генезиса.

Анализ научной литературы по изучаемой проблеме показал отсутствие эффективных методик автоматизированного линеаментного анализа многозональных космических изображений земной поверхности для решения природно-ресурсных и природоохранных задач. Необходим новый методический подход к проведению и интерпретации результатов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений земной поверхности с целью решения вышеуказанных задач.

**Второй раздел** посвящён разработке научных основ методики методики автоматизированного линеаментного анализа по материалам многозональных космических съемок для решения природно-ресурсных и природоохранных задач.

В первой части второго раздела диссертации приведены результаты анализа 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. Показано, что при изучении линеаментов целесообразно использовать космические снимки, а не ЦМР, т.к. последние не отражают целый комплекс дешифровочных признаков разрывных нарушений и трещин, обусловленных растительностью составом и влажностью горных пород, мест разгрузки подземная вод и других ландшафтных индикационных признаков.

В завершении второго раздела дано описание разработанной методики автоматизированного анализа космических изображений для решения природно-ресурсных и природоохранных задач связанных с зонами разрывных нарушений, трещиноватости и дробления горных пород. Прежде всего это касается

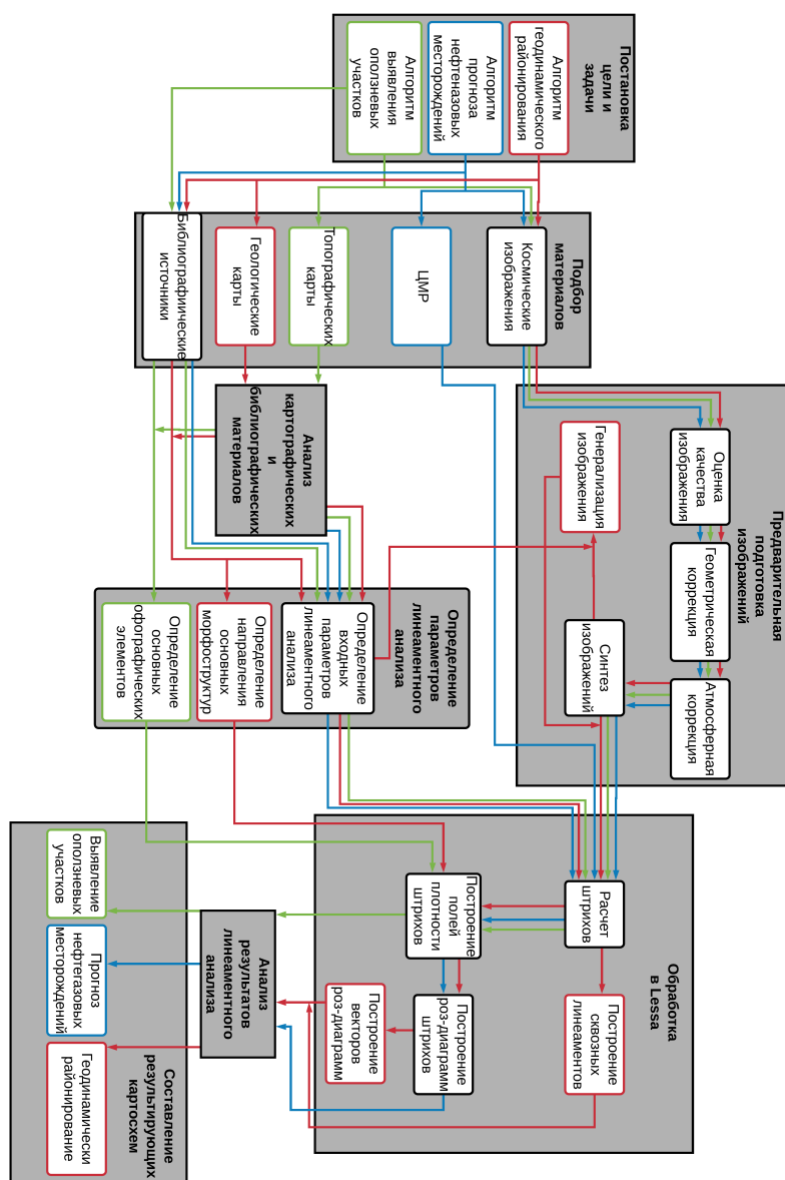


Рисунок 1 - Схема методики автоматизированного линементного анализа адаптированной при помощи алгоритмов. Красный цвет – алгоритм геодинамического районирования. Синий – алгоритм прогноза нефтегазовых месторождений. Зеленый – алгоритм выявления оползневых участков. Черный – блоки общие для нескольких алгоритмов.

линеаментами определенных простираний и на этом основании осуществить прогноз на наличие месторождений или мест развития геодинамических процессов, влияющих на сохранность земельных водных и других ресурсов.

Разработанная методика автоматизированного линементного анализа космически изображений земной поверхности для решения природно-ресурсных

месторождений полезных ископаемых (рудных, нерудных, углеводородных, подземных вод и др.), а также земельных ресурсов, сохранность которых зависит от наличия и интенсивности развития современных геодинамических процессов (оползневых, карстовых, эрозионных, сейсмических и др.). Как правило, образование месторождений и развитие современных геодинамических процессов связано не со всеми имеющимся в районе семейством линементов, а с

линеаментами определенных простираний. Поэтому главная задача, стоящая перед исследователем — обнаружить связь природно-ресурсных объектов с

и природоохранных задач представляет собой системный набор этап (процедур) обработки многозональных космических изображений земной поверхности. Схема методики с адаптирующими алгоритмами дана на рисунке 1.

**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.

**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.

**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;
- Роз-диаграмм штрихов и их производных (средние направления роз, линии вытянутости, сходство розы с крестом и прочее) при разных уровнях генерализации;
- Получением схем и роз-диаграмм сквозных линеаментов.

**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.

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

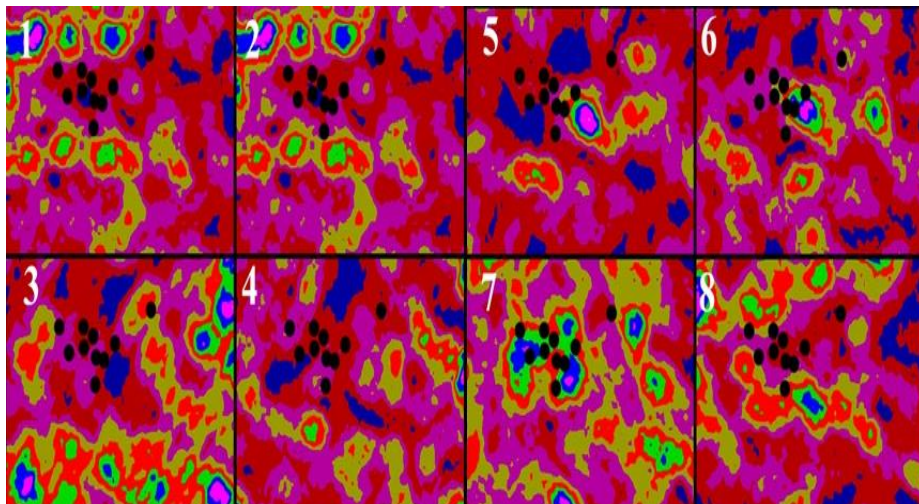
**Третий раздел** посвящён описанию результатов использования методики автоматизированного линеаментного анализа космических изображений для оценки перспективности территории на нефтегазоносность, прогноза оползневой опасности и геодинамического районирования территории.

#### **Алгоритм прогноза нефтегазовых месторождений**

Экспериментальная проверка работоспособности выше описанной методики была осуществлена на трех месторождениях Северного Кавказа.

Рассмотрим Прасковейское нефтяное месторождение, расположенное на Северном Кавказе.

На рисунке 2 приведены плотности штрихов и других схемах возрастание плотности штрихов показано постепенной сменой красного, зеленого, синего и



малинового цветов.

Уменьшению плотности штрихов

соответствует

последовательная

смена цветов с

красного на желтый,

бордовый, темно-

синий

Анализ схем

общей плотности

линеаментов разных

Рисунок 2 - Схемы плотности линеаментов с простираниями  $0^\circ$  (1);  $22,5^\circ$  (2);  $45^\circ$  (3);  $67,5^\circ$  (4);  $90^\circ$  (5);  $112,5^\circ$  (6);  $135^\circ$  (7) и  $157,5^\circ$  (8). Точками показаны буровые скважины. Шкала плотности штрихов приведена на рисунке 5.

простираций показывает отсутствие корреляции поля расположения нефтяных скважин Прасковейского нефтяного месторождения, с плотностью штрихов, в то же время анализ схем плотности штрихов разных простираний показывает, что Прасковейское нефтяное месторождение приурочено к зоне повышенной плотности линеаментов общекавказского простирания СЗ-ЮВ, отвечающее схемам поля плотности ЮВ  $135^\circ$ . С штрихами других простираний корреляция отсутствует.

На рисунке 3 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  $135^\circ$ ). На прилегающей к месторождению территории розы-диаграммы

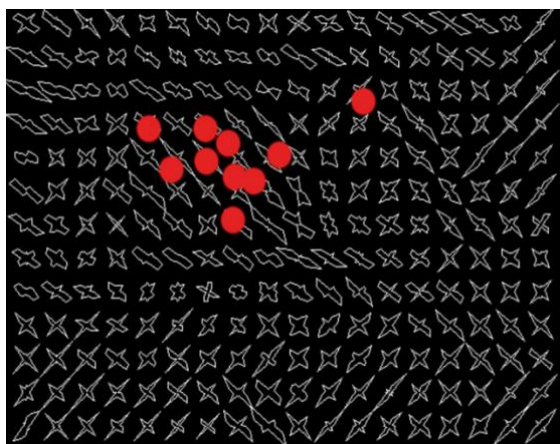


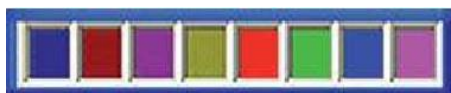
Рисунок 3 - Розы-диаграммы штрихов, полученные при обработке космоснимка (красная зона спектра). Точками показаны буровые скважины

менее выразительны, т.е. здесь земная кора однородна, без какого-либо преобладания общекавказских простираний.

Результаты линеamentного анализа показали, что ЦМР может использоваться при описании линеamentной тектоники лишь для выявления продольных (по отношению к основным орографическим элементам рельефа) линеamentов. Поперечные же линеamentы, которые часто не выражены в рельефе, при анализе ЦМР выявляются не полностью и поэтому не могут полностью

характеризовать линеamentную тектонику месторождений и служить индикаторами мест возможной локализации углеводородов. Данный вывод подтверждается на примере и других нефтегазоносных месторождений. Так линеamentный 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 линеamentов с азимутом простирания ЮВ 135<sup>0</sup>, т.е. к продольным линеamentам. Это подтверждается как при линеamentном анализе снимков, так и ЦМР.

LESSA позволяет получать только качественные результаты. Все данные представляются цветами вне зависимости от количественных характеристик линеamentов (рисунок 4). 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

Рисунок 4 - Шкала цветов

залежей углеводородов связана со значениями цветов 62,5-75, 0-12,5, 87,5-100,

идуших именно в таком порядке. Т.е. значение 75-87,5 заменяется на 0-12,5. Реже встречается комбинация 37,5-75.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- Наиболее информативными являются продольные и перпендикулярные по отношению к основным элементам штрихи;
- Автоматизированный линеаментный анализ позволяет выделять перспективные для дальнейшей разведки углеводородов места;
- Изменения направления роз-диаграмм штрихов позволяют выделять участки для разведки углеводородов;
- Получена связь между наличием залежей углеводородов и повышенной плотностью поперечных и продольных штрихов, по отношению к геологическим структурам.

#### **Алгоритм прогноза оползневых участков**

Анализ научной литературы, а также выполненные нами исследования показали, что автоматизированный линеаментный анализ может быть использован для **выявления мест развития оползневых процессов**. А именно, участки земной поверхности, пораженные оползнями, характеризуются повышенной плотностью штрихов, определенных азимутов простираний.

Алгоритм автоматизированной обработки космических изображений с использованием линеаментного анализа представлен на рисунке 1.

В качестве эталонных участков использованы оползневые участки, перенесенные с инженерно-геологических карт в масштабах 1:10000 и 1:50000. На ниже приведенных схемах (рисунки 5) оползневые участки, выявленные при наземной инженерно-геологической съемке в масштабе 1:10000, выделены черным цветом.

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.

Суммарная плотность линеаментов разных простираний характеризует общую раздробленность и трещиноватость горных пород.

На рисунке 6 приведены схемы полей плотности субмеридиональных линеаментов различных простираний. Простирание ССВ  $22,5^{\circ}$  ( $11,25^{\circ}$ - $33,75^{\circ}$ ), связанные с этими линеаменами пути миграции подземных вод имеют юго-восточное простирание  $112,5^{\circ}$  ( $101,25^{\circ}$ - $123,75^{\circ}$ ). На схеме имеются несколько

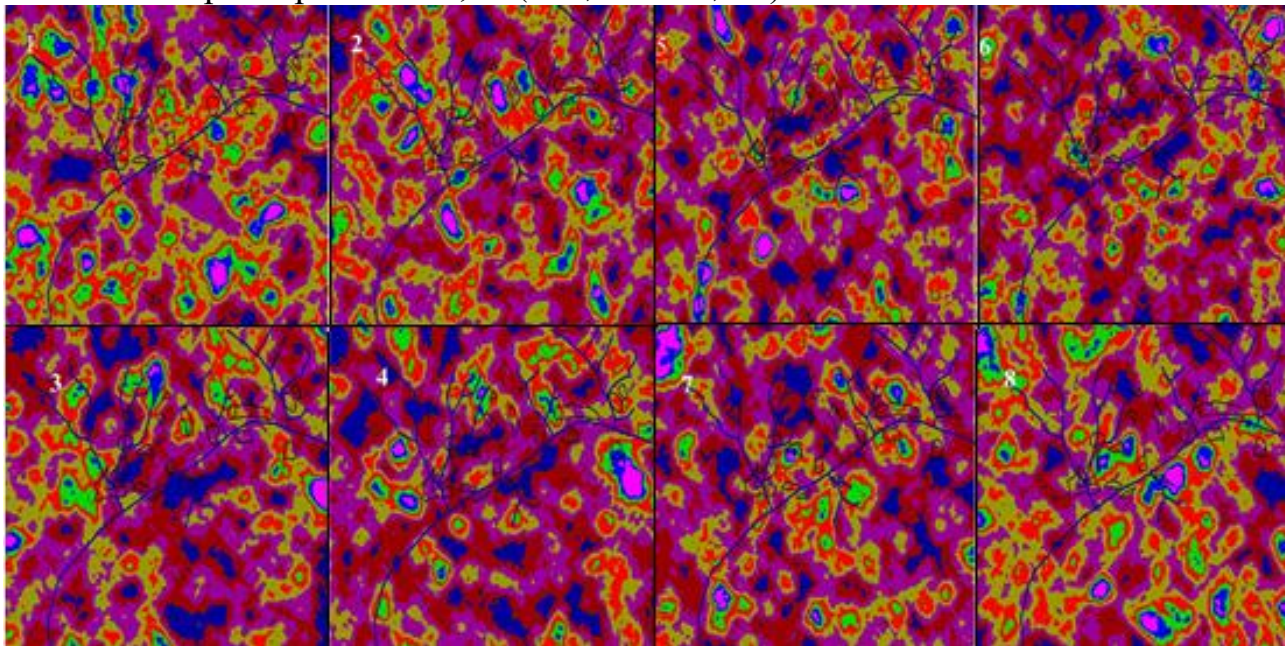


Рисунок 5 - Плотность штрихов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 простираний. Шкала плотности штрихов приведена на рисунке 5

участков с повышенной плотностью штрихов. На левобережье р. Мзымта они хорошо коррелируют с оползневыми участками, выделенными на инженерно-геологических картах.

Изучение схем плотности линеаментов с простиранием ВСВ  $67,5^{\circ}$  ( $56,25^{\circ}$ - $78,75^{\circ}$ ) показало, что 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 коррелируют с оползневыми участками, показанными на инженерно-геологических картах.



Изучение схемы плотности линеаментов с простиранием В  $90^{\circ}$  ( $78,75^{\circ}$ - $101,25^{\circ}$ ) показало, что 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.

Исследование схемы плотности линеаментов с простиранием ЮЮВ  $157,5^{\circ}$  ( $146,25^{\circ}$ - $168,75^{\circ}$ ) показало, что 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.

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.

### **Алгоритм геодинамического районирования территорий.**

В данной диссертации разработан и используется значительно менее трудоемкий алгоритм (рисунке 1) геодинамического районирования, основанный на использовании статистических показателей развития штрихов,

получаемых при автоматизированном линеаментном анализе космических снимков.

Возможности разработанной нами методики геодинамического районирования проиллюстрированы на примере исследований, выполненных в районе проектируемого второго туннеля БАМ.

В качестве исходных данных использован синтезированный космический снимок (синтез 2,3 и 5 спектральных каналов зональных изображений Landsat). В результате автоматизированного линеаментного анализа синтезированного изображения 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. Использование космических снимков с разным пространственным разрешением позволяет выделить блоки разных иерархических уровней.

Среди линеаментов выделенных автоматизированно четко прослеживается преобладание северо-восточного простирания. Эти морфоструктурные линеаменты делят земную кору на ряд узких блоков, вытянутых в северо-восточном направлении. Преобладание этого направления в регионе также показано на государственной геологической карте СССР в масштабе 1:1000000 N-49 (50). По сравнению с геологической картой поле линеаментов, выявленное при автоматизированном линеаментном анализе синтезированного космического изображения Landsat, показывает более детальную картину блокового строения земной коры и ее большую раздробленность. Среди других наблюдается один линеамент субширотного направления, расположенный к югу от туннеля, 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. 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. На рисунке 9б 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.

Разломы 3-го порядка, разграничивают 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. Крупный южный блок имеет гетерогенное строение и состоит из нескольких блоков, отличающихся формой и ориентировкой роз-диаграмм штрихов, разреженных разломами 4-го порядка. Анализ распределения по площади поля суммарной плотности штрихов показывает приуроченность аномалий повышенной плотности к речным долинам, что указывает на наличие в них условий растяжения. Горные склоны характеризуются средними значениями 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 (рисунок 6): 1-районы повышенной трещиноватости массивов горных пород, характеризующий наличие условия растяжения; 2-районы средней плотности трещин, характеризующийся стабильными условия развития; 3-районы минимальной трещиноватости горных пород, характеризующие условия 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 по направлению 1 и 6. 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

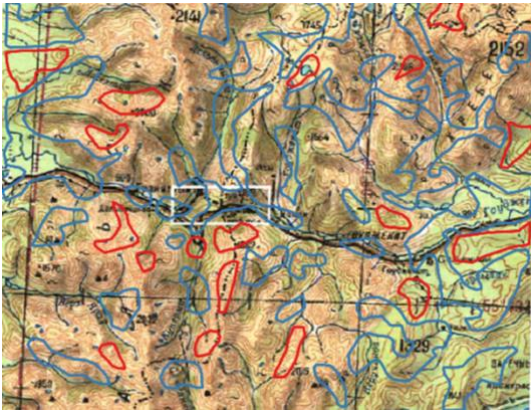


Рисунок - 6 Схема поля напряжений в районе Байкальского тоннеля. Синяя – зона растяжения, красная – зона сжатия

(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, участок массива, в котором проводится строительство второго Байкальского тоннеля следует отнести к склонному к горным ударам.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие 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 линеamentной тетконики 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 линеamentного анализа внедрены в производственный процесс.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Зверев А.В. Сравнение результатов линеamentного анализа космического снимка и цифровой модели рельефа. Известия высших учебных заведений. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка, №2. М., 2014, с. 96-99.

2. Зверев А.В., Зверев А.Т. Применение автоматизированного линеamentного анализа космических снимков при поисках нефтегазовых месторождений, прогнозе землетрясений, склоновых процессов и путей миграции подземной воды. Известия высших учебных заведений. Сер. Геология и разведка, №4, М., 2015, с. 14-20.

3. Zakharov V. N., A. Zverev V., Zverev A. T., Malinnikov V. A., and Malinnikova O. N. Application of automated lineament analysis of satellite images in modern geodynamics research: A case study. RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES, VOL. 17, ES3001, doi:10.2205/2017ES000599, 2017, p.1-14.

4. Зверев А.Т., Зверев А.В., Салимон Э.А. Прогноз нефтегазовых месторождений на основе линеamentного анализа космоснимков. Известия высших учебных заведений. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка, Т. 63, №3, М., 2018, с. 337-345.

*Прочие научные статьи и тезисы на международно-практических конференциях*

1. Зверев А.В. Разработка методики поиска подземных вод по материалам многозональной космической съемки. Приложение к журналу «Геодезия и аэрофотосъемка». Сборник статей по материалам научно-технических конференций. Вып. 4, М., 2011, с. 43-44.

2. Zakharov V. N., Zverev A. V., Zverev A. T., Malinnikov V. A., Malinnikova O. N. Experience of use of the automed lineamentary analysis of space images for studying of modern geodynamics. Geoinformatics research papers, VOL.4, BS4002, doi:10.2205/2016BS06Sochi, 2016, p. 48.

3. Зверев А.В., Зверев А.Т. Методика поиска нефтегазовых месторождений с использованием линеаментного анализа космических снимков. Приложение к журналу «Геодезия и аэрофотосъемка». Сборник статей по материалам научно-технических конференций. Вып. 7, часть 1, М., 2014, с. 160-163.

4. 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. В сборнике: 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. С. 57-64.

5. Zakharov V. N., Zverev A. V., Zverev A. T., Malinnikov V. A., Malinnikova O. N. Geodynamic zoning of mining areas using automated lineament analysis satellite images. 24<sup>th</sup> World Mining Congress. MINING IN A WORLD OF INNOVATION. October 18-21, 2016 Rio de Janeiro/RJ Brazil. P. 211-219.

6. Викторов А.С., Орлов Т.В., Дорожко А. Л., Зверев А.В. Развитие модели инициированных термокарстовых процессов для дистанционной оценки природной опасности. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 2. С. 68-76.



