На правах рукописи

ДОНОВ ВЛАДИСЛАВ ВАЛЕРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МНОГОУРОВНЕВОГО ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Малинников Василий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, Захаров Валерий Николаевич

доктор технически наук, профессор Стеценко Анатолий Филиппович

Ведущая организация: " Государственный научно-исследовательский и производственный центр "Природа" (ФГУП "Госцентр "Природа")

Защита диссертации состоится «…..» на заседании диссертационного совета в Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4 ауд. Зал заседаний Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан «___» 2009 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Изучение линеаментной тектоники дает возможность оценить общую геоэкологическую обстановку, связанную с инженерно-геологическими и гидрогеологическими особенностями территории. Изучению линеаментов, обусловленных трещиноватостью горных пород, до последнего времени уделялось недостаточно внимания. Это объясняется трудоемкостью и субъективностью самого процесса визуального дешифрирования аэрокосмоизображений и невозможностью его осуществления на территориях покрытых растительностью и чехлом рыхлых отложений. Автоматизированное дешифрирование линеаментов позволяет избежать подобных трудностей, так как оно обладает высокой оперативностью, высокой экономической эффективностью и объективностью. А такие свойства космических изображений как обзорность, естественная генерализация и рентгеноскопичность обеспечивают выявление линеаментов и на территориях с растительным покровом и рыхлыми отложениями. При этом автоматизированная технология дешифрирования позволяет выявлять не только линеаменты, выраженные в виде непрерывных линий (линейных зон), но и линеаменты, проявленные в ландшафтах спорадически в виде прерывистых линейных элементов.

Линеаменты, обусловленные трещиноватостью горных пород, оказывают определяющее влияние на устойчивость склонов и на пути миграции подземных вод. По этому их изучение имеет большое практическое значение для выявления месторождений трещинных подземных вод и для оценки потенциальной опасности развития склоновых процессов - таких как оползни. Для развития оползневых процессов наиболее благоприятными условиями является наличие трещиноватости и обводненности горных пород. Дешифрирование линеаментов как раз и позволяет выявить трещиноватость и обусловленные ей пути миграции подземных вод, т.е. выявить обводненность горных пород, которые достигают максимального развития в местах (узлах) пересечения отдельных линеаментов и особенно их зон. Это позволяет строить прогнозные карты оползневой опасности. Разработанная мною методика многоуровенного автоматизированного линеаментного анализа позволяет выявлять линеаменты разных иерархических уровней. Это значительно повышает объективность и полноту выявления специфики геоэкологической обстановки на исследуемой территории, связанную с трещиноватостью горных пород и инициируемыми ею гидродинамическими и склоновыми процессами. Методика позволяет оперативно оценить трещиноватость больших территорий и выявить пути миграции подземных вод и наиболее благоприятные места для развития оползневых и других склоновых процессов. В настоящее время

подобные исследования приобретают особую актуальность в связи со строительством обводных автомагистральных дорог около городов Сочи и Туапсе и протяженной олимпийской автотрассы от Адлера до Красной поляны, на которых предусмотрено строительство большого количества эстакад и многокилометровых тоннелей под горными хребтами Кавказа, при проектировании которых изучение трещиноватости горных массивов приобретает первостепенное значение.

Цель работы. Разработка методики выделения линеаментов разных иерархических уровней на основе автоматизированного линеаментного анализа и оценка оползневой опасности по результатам линеаментного и мультифрактального анализов аэрокосмических изображений различных типов и масштабов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**

1. Подобрать аэрокосмическую и картографическую информацию на тестовые участки.
2. Выполнить автоматизированный линеаментный анализ аэрокосмических изображений, с целью выделения линеаментов разных иерархических уровней.
3. Разработать методику оценки оползневой опасности на основе результатов многоуровневого линеаментного анализа аэрокосмических изображений.
4. Разработать методику мультифрактального анализа аэрокосмических изображений для оценки оползневой опасности территории
5. Построить карты линеаментной тектоники тестовых участков.
6. Выполнить прогноз оползневой опасности на тестовых участках.

Объект исследования. Линеаменты и оползни на тестовых участках: Кузбасском, Мамайском, Туапсинском, Дагомысском.

Предмет исследования. Применение автоматизированного линеаментного анализа для оценки трещиноватости горных массивов и прогноза оползневой опасности.

Теоретические и методологические основы исследования и исходные материалы

Использован автоматизированный линеаментный и мультифрактальный анализ аэрокосмических изображений, которые позволяют изучить линеаментную тектонику и оценить оползневую опасность территории. Для проведения линеаментного анализа использовался программный продукт WinLESSA 2.1, а для мультифрактального анализа программный пакет «Фрактал-ПК». В качестве исходных материалов использовались:

многоспектральные космические изображения (съемка: август 1989, август 2000 и сентябрь 2001 года), полученные со спутника Landsat, многоспектральным сканером TM (каналы 1-0.45-0.52, 2-0.52-0.6, 3-0.63-0.69, 4-0.76-0.9, 5-1.55-1.75, 6-2.08-2.35, 7-0.52-0.9-панхроматический, 8-10.42-12.5 мкм)., аэрофотоснимки в масштабе 1:25000 (залет ОП-537, конец июня 1984 г.), цветные изображения полученные с помощью цифровой камеры с международной космической станции «Альфа» (съемка – октябрь 2004 года), аэрофотоснимки в масштабе 1:30000 (съемка 2002 г.) и 1:6000 (съемка 2001 г.), космическое панхроматическое изображение высокого разрешения со спутника Quickbird (разрешение 0,6м).

Научная новизна. Разработана методика выделения линеаментов разных иерархических уровней, на основе автоматизированного многоуровневого линеаментного анализа космических изображений и аэрофтоснимков, оказывающих определяющее влияние на инженерно-геологические условия вдоль обводной автомагистрали Туапсе-Сочи. Впервые разработана методика оценки оползневой опасности на основе результатов многоуровневого линеаментного анализа космических изображений и аэрофотоснимков. Впервые разработана методика оценки оползневой опасности на основе результатов мультифрактального анализа космических изображений и аэрофотоснимков.

Практическая значимость. Методика выделения линеаментов разных иерархических уровней на основе автоматизированного многоуровневого линеаментного анализа космических изображений и аэрофотоснимков использована при инженерно-геологических изысканиях, при проведении промышленно-городских, подземных, авто- и железнодорожных работ на Черноморском побережье Кавказа. Теоретические основы изложенные в данной работе читаются в учебных курсах МИИГАиК на кафедре природопользования и географии для студентов специальности «Исследование природных ресурсов авиакосмическими средствами».

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы опубликованы в журналах «Известия ВУЗоВ. Геодезия и аэрофотосъемка». Научные и практические результаты, полученные автором в процессе работы над диссертацией, обсуждались на научных конференциях студентов и аспирантов МИИГАиК (2007, 2008), а так же на 4-й международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (Москва 2008).

Методика, разработанная в данной диссертации, была апробирована в ходе выполнения одного из этапов работы «Определение тектонического строения на основе космических снимков высокого оптического разрешения, аэрофотоснимков и цифрового линеаментного анализа», которая выполняется по объекту «Федеральная автомобильная дорога М-27 Джугба - Сочи до границы с Республикой Абхазия на обходе г. Туапсе. Раздел «Тоннели». Проект (договор № 2550 от 24.08.2006 г.), где в качестве Генерального Подрядчика выступает ОАО НИПИИ "Ленметрогипротранс".

Структура работы.

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы, включающей 82 наименования, в том числе 30 иностранных источников, 65 рисунков, 5 таблиц.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Методика выделения линеаментов разных иерархических уровней на основе автоматизированного многоуровневого линеаментного анализа космических изображений и аэрофотоснимков.
2. Методика оценки оползневой опасности на основе результатов многоуровневого линеаментного анализа космических изображений и аэрофотоснимков.
3. Методика оценки оползневой опасности на основе результатов мультифрактального анализа космических изображений и аэрофотоснимков.
4. Результаты апробации разработанных методик многоуровневого линеаментного и мультифрактального анализа и оценки оползневой опасности.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна, практическая значимость работы и основные результаты исследований выносимых на защиту.

В первой главе анализируется опыт использования аэрокосмических изображений для изучения экзогенных процессов. К настоящему времени накоплен обширный опыт по использованию аэрокосмической информации для изучения различных геологических, географических, экологических и других задач. Аэрокосмические методы обеспечивают получение объективной информации с высокой степенью детализации и генерализации – от локальной до региональной и даже глобальной, что невозможно сделать другими средствами.

На глобальном уровне генерализации космических изображений осуществляется выделение крупных областей, соответствующих определенным элементам геотектуры с преобладающим развитием основных групп экзогенных процессов – аккумулятивных, денудационных и гравитационных, и парагенетических их сочетаний. На региональном уровне выявляются морфоструктуры I порядка (плато, равнины, горные хребты, кряжи, межгорные впадины) и II порядка (увалы, гряды, котловины, бессточные впадины и др.), а также их элементы (сводные части положительных структур их крылья, флексурообразные перегибы, днища и борта отрицательных структур и т.д.). Отчетливо устанавливается связь морфоструктур с генетическими типами экзогенных процессов, формирующих определенные типы морфоструктуры. В большинстве случаев экзогенные процессы рассматриваются как индикаторы морфоструктур и их элементов, это особенно важно при выявлении инверсии рельефа.

На локальном уровне генерализации возможно получение необходимой информации для выявления особенностей распространения генетических типов экзогенных процессов, их морфологического выражения, экспозиции склонов, густоты и глубины эрозионного расчленения территории и связи с общей геоморфологической обстановкой, определение возрастных генераций различных форм. Дешифрируются геологические комплексы пород и их литологический состав. Результаты дешифрирования используются для составления специализированных обзорных карт современного состояния и условий развития экзогенных процессов, районирования территорий по интенсивности их проявления на основе количественных показателей.

Во втором разделе главы описана постановка задачи исследования. В основе охарактеризованных выше общепринятых визуальных и автоматизированных технологий изучения экзогенных процессов и мониторинга лежит принцип извлечения информации непосредственно об уже имеющихся оползневых телах и других интересующих исследователя объектах и их динамики. В своем исследовании я использовал принципиально другой методический подход к прогнозированию оползневой опасности на основе автоматизированного анализа линеаментной тектоники с привлечением геологических (литологических и тектонических) и морфометрических (крутизна склонов) данных. Подобный подход позволил выявить несколько основополагающих факторов динамики оползневых процессов - раздробленность (трещиноватость) горных пород, пространственную ориентированность зон трещин и разрывных нарушений, пути миграции и места разгрузок подземных вод; места сочетания литологического состава горных пород, их раздробленности и крутизны склонов, благоприятные для развития оползневых процессов.

Во второй главы описан метод автоматизированного линеаментного анализа космических изображений и аэрофотоснимков. Основная цель автоматизации процесса дешифрирования линеаментов и их статистической обработки – уменьшить трудоемкость подобных работ и снизить субъективность полученных результатов.

При исследовании особенностей линеаментной тектоники использован программный модуль WinLESSA 2.1 2005 (LESSA - Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis - методика автоматического поиска линейных элементов и анализа их ориентации и расположения.), предназначенный для проведения линеаментного анализа по цифровым изображениям (Zlatopolsky, 1997).

Программа WinLESSA позволяет анализировать данные различного типа: полутоновые изображения, бинарные изображения, цифровые модели рельефа (ЦМР). У оператора появляется возможность сравнить и объединить информацию, полученную из различных источников: разных зон спектра, разных дат съемки.

Во втором разделе **второй главы** разрабатываются научные основы многоуровневого линеаментного анализа космических изображений и аэрофотоснимков. В результате экспериментальных исследований было отмечено влияние линеаментов на рисунок гидрографической сети, на положение и интенсивность развития оползневых, карстовых и других экзогенных процессов. И это вполне понятно, т.к. линеаменты, прямо связанные с общей трещиноватостью земной коры, отражают интенсивность раздроблённости верхних частей земной коры, т.е. показывают положение зон максимальной циркуляции глубинных флюидов и подземных (в том числе грунтовых) вод и минимальной прочности горных пород, наиболее благоприятные для развития склоновых и других экзогенных процессов (карста, суффозии, эрозии, выветривания и др.).

Автоматизированный линеаментный анализ космоизображений позволяет получать достоверные данные о количестве и местоположении линеаментов, т.к. роль оператора (дешифровщика) сводится лишь к выбору порога степени выраженности линеаментов и наиболее информативного спектрального канала (зоны) оптического спектра. Но при интерпретации получаемых космолинеаментов (или фотолинеаментов в случае использования аэрофотоснимков) следует помнить, что ранг получаемых линеаментов прямо зависит от разрешающей способности изображения, т.е. от физического размера пикселя. Меняя размер пикселя, можно исследовать линеаменты разных иерархических уровней, начиная с регионального и заканчивая локальным. Это позволяет анализировать связь систем трещин разных иерархических уровней (и разной глубины заложения

соответственно) с различными эндогенными и экзогенными процессами, а в нашем случае, связь с оползневыми процессами.

С целью обоснования предложенной методики (рис. 1) был выполнен автоматизированный линеаментный анализ космических изображений и аэрофотоснимков территории Кузбасса (район г. Ленинск-Кузнецкий) характеризующийся равнинным рельефом и спокойной тектонической обстановкой. Выбор района в качестве тестового обусловлен так же его хорошей геолого-геофизической изученностью в связи с проводимыми здесь широкомасштабными угольными разработками шахтным способом.

На данном тестовом участке, выполнены подбор и предварительная обработка многозональных космических изображений Landsat-7, которая включала в себя их контрастирование, фильтрацию, геометрическую и яркостную коррекцию, пространственно-временную привязку. Кроме многозональных космических изображений использовались аэрофотоснимки, полученные в июне 1984 г. в масштабе 1:10000.
Комплексная обработка космической и аэрофотографической информации позволила применить многоуровневый метод исследования: от трансрегионального и регионального до локального и детального.

Рисунок 1. Блок-схема методики многоуровневого автоматизированного линеаментного анализа

Кроме оригиналов космических изображений при цифровой обработке применялись их генерализованные производные изображения (генерализация за счет их загрубления при осреднении соседних пикселей). Это позволило избежать влияния на результаты автоматизированного линеаментного анализа очень широко распространенных на исследованной территории линейных антропогенных объектов типа шоссейных и

железных дорог, т.к. благодаря загрубленному размеру пикселя (до 30 м вместо 15 м на местности) менее широкие по сравнению с ними транспортные магистрали пропускались (отфильтровывались) при автоматизированной обработке космических изображений.

Цифровая обработка изображений производилась в несколько приемов (многоуровенно). Вначале обрабатывалось целиком все космическое изображение или аэрофотоизображение. Затем обработке подвергались отдельные их фрагменты все меньшей площади. Подобный методический прием позволил получить целую серию схем линеаментной тектоники с постоянным укрупнением масштаба от макрорегионального (масштаб 1:2500000) до локального (масштаб 1:10000 и 1:5000). Благодаря этому, выявлена как региональная, так и локальная сеть линеаментов, которые взаимоувязаны между собой и имеют постепенные переходы от разрозненной региональной сети к более густой локальной сети. Завершением экспериментальных работ явилось обобщение полученных результатов, установление общих закономерностей развития линеаментной тектоники и ее связи с геолого-геоморфологическими явлениями.

Третья глава посвящена результатам отработки методики использования многоуровневого анализа для ранжирования линеаментов и прогноза оползневой опасности на тестовых участках Черноморского побережья Кавказа (Рис. 2). Отработка методики была проведена на трех тестовых участках: Мамайский, Туапсинский и Дагомысский, расположенных вдоль трассы обводной автомагистрали г. Туапсе – г. Сочи.

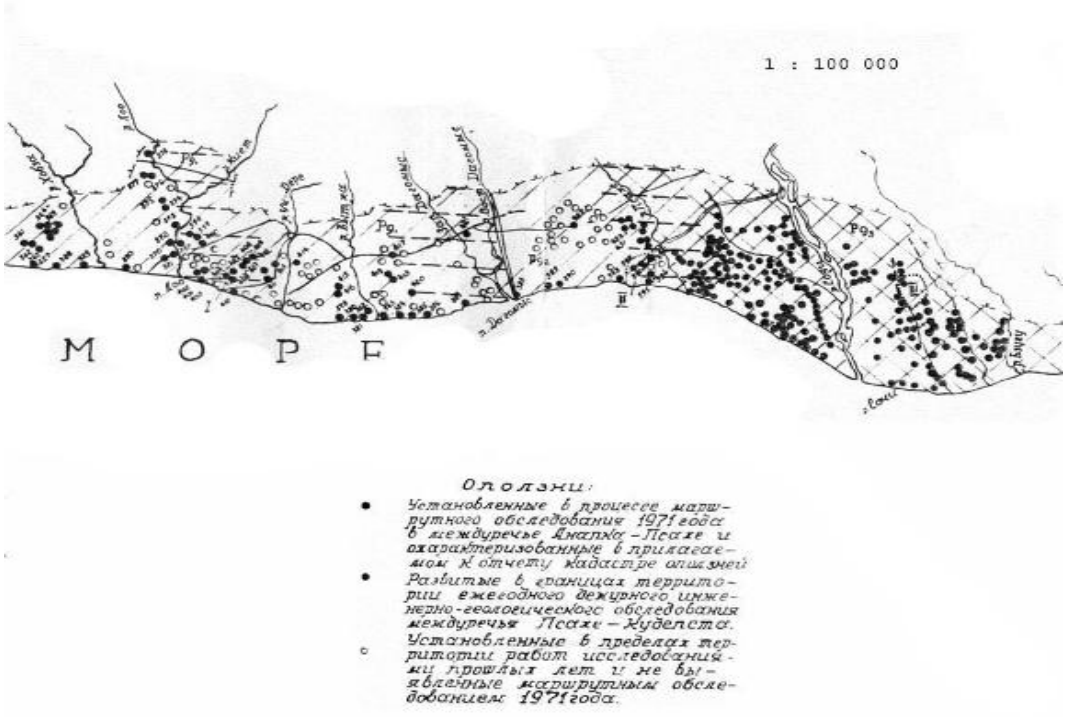


Рисунок 2 . Фрагмент обзорной карты распространения оползней с элементами геологии и тектоники

Дагомысский тестовый участок. Дагомысский тестовый участок протягивается от р.Вардане до среднего течения р.Мамайка на расстоянии около 2,5 км от берега Черного моря. Общая протяженность участка более 10 км. В геоморфологическом отношении для тестового участка характерны хребты и возвышенности на пластово-складчетом основании, сложенном отложениями верхнего мела-палеогена. Вертикальное расчленение 50-300 м. Оползни, хотя и в меньшей степени, по сравнению с береговыми районами, развиты на всей территории Дагомысского тестового участка. В тектоническом отношении участок расположен в районе фронтальной части Воронковского покрова, сложенном флишевыми толщами Новороссийского, который перекрывает северные отложение Адлеровской депрессии. Основание покрова выходит на земляную поверхность между Мамайкой и Дагомысом. Для тестового участка характерно, как и для всей этой части Кавказа, наличие скрытых поперечных разрывных структур, не выходящих на земную поверхность.

Проанализировано космическое панхроматическое изображение высокого разрешения Quickbird (разрешение 0,6м). Анализ выполнен на трех уровнях генерализации исходного изображения. На первом уровне использовано первичное космическое изображение, имеющее разрешение 0,6м. В этом случае размер изображения составлял 8000x6000 пикселей. Но так как наиболее устойчивые результаты Lessa дает при размерах изображения от 500 до 2000 пикселей, то в данном случае исходное изображение было поделено на 21 фрагмент (рис. 3), каждый из которых, имел размер примерно 500x500 пикселей и анализировался отдельно.

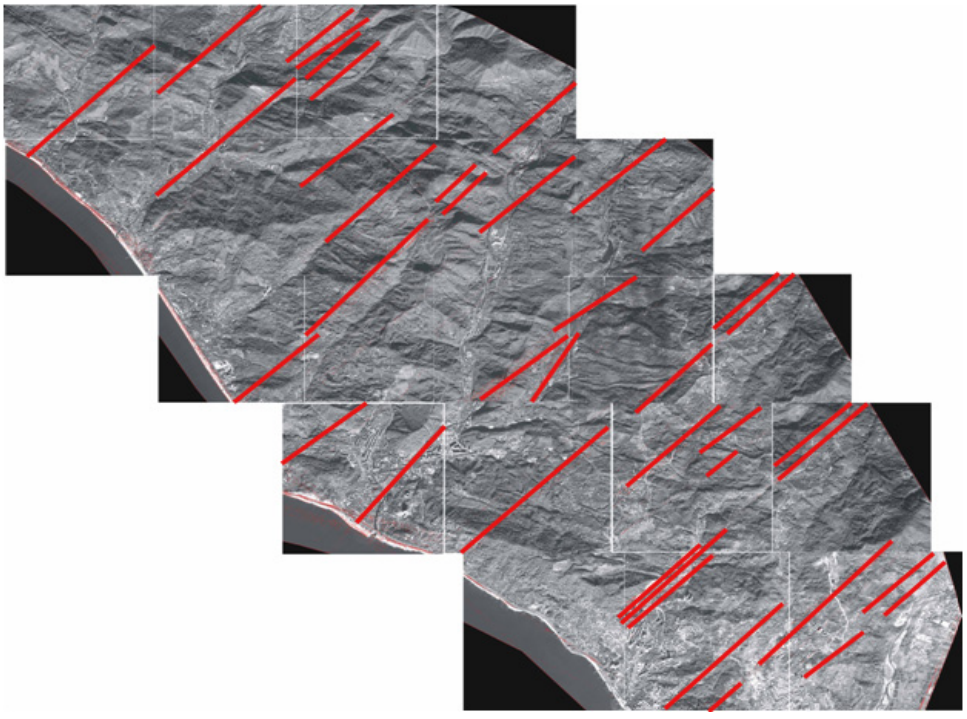


Рисунок 3. Фрагмент космического изображения Quick Bird с нанесенными линеаментами

На втором уровне изображение делилось на 2 равные части (рис 4,5), каждое из которых загрублялось (за счет осреднения соседних пикселей) до размера 1000х1500 пикселей. На третьем уровне анализировалось все изображение, которое за счет еще большей генерализации (осреднения) соседних пикселей имело размер 2000х2000 пикселей. Подобный методический прием позволил изучить раздельно локальные (на 1-м уровне) и региональные (на 2-м и3-м уровнях) системы линеаментов, первым из которых обычно соответствуют зоны локальных трещин, а вторым – зоны региональных разрывных нарушений и зоны трещиноватости разных порядков (от микро- до макрорегиональных).

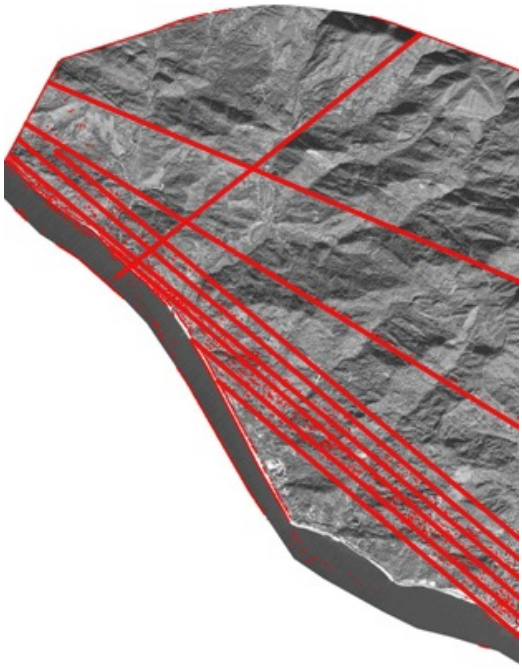


Рисунок 4. Первый фрагмент космического изображения Quick Bird с нанесенными линеаментами (порог 70)

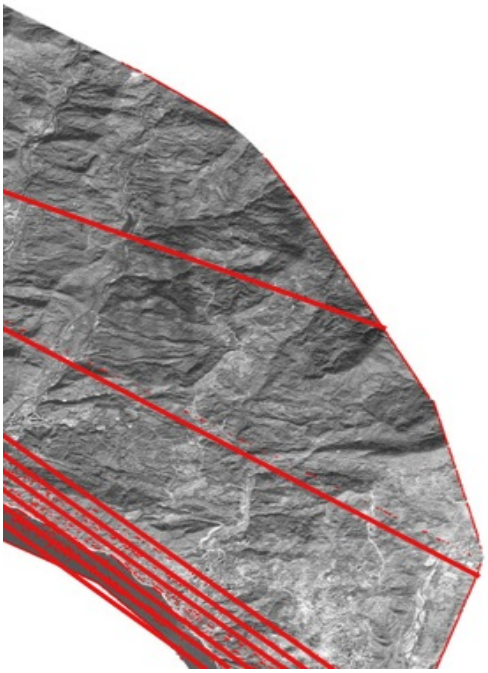


Рисунок 5. Второй фрагмент космического изображения Quick Bird с нанесенными линеаментами (порог 70)

Результаты автоматизированного дешифрирования 21 фрагмента космического изображения при пороге 80 сведены на рис. 3. Как мы видим, резко преобладает СВ-е поперечные системы линеаментов. Продольные линеаменты развиты гораздо меньше. Примечательным обстоятельством является то, что большинство как поперечных, так и продольных линеаментов имеют продолжение на соседних фрагментах космоизображения. Это свидетельствует не только об устойчивости данных систем по простиранию, но и достоверности полученных результатов автоматизированного дешифрирования, т.к. реальность существования выявленных линеаментов на каждом из фрагментов подтверждается продолжением (наращиванием) их на соседних фрагментах.

Следует отметить, что если продольные линеаменты на схеме дешифрирования выражены в виде одной линии, то поперечные линеаменты- в виде целой зоны сближенных линий. Это свидетельствует в пользу того, что выявленные продольные линеаменты отвечают разрывным нарушениям, а поперечные – зонам трещиноватости горных пород. Так как для всего Западного Кавказа, характерно осложнение продольной (общекавказской) зональности поперечными разрывными структурами, которые часто не выходят на земную поверхность, то из этого следует вывод о том, что автоматически выявленные поперечные зоны линеаментов являются зонами трещин, которые проектируют на поверхности скрытые разломы земной коры.

На схемах дешифрирования (рис.3) отдельные поперечные зоны линеаментов нередко изменяют свою ширину. Данное обстоятельство обусловлено влиянием на интенсивность надразломной трещиноватости продольных разрывных нарушений, пересекающих весь верхнемеловой - кайнозойский складчатый комплекс данного региона. Изменение тектонофизических условий в разделенных продольными разломами блоках земной коры влияет на интенсивность растрескивания слагающих их горных пород над скрытыми поперечными разрывными нарушениями, что приводит к наблюдаемому изменению ширины поперечных зон линеаментов по простиранию.

Уменьшение порога не приводит к существенному изменению пространственного положения трещин. Это указывает на то, что скрытые разрывные нарушения имеют достаточно крутые падения. В противном случае зоны слабо выраженных линеаментов, выявляемых при уменьшении порога (в нашем случае при пороге 70) были бы смещены от основных (наиболее устойчиво выраженных) зон линеаментов в сторону уклона сместителя скрытого разрывного нарушения. И чем более пологое залегание имеет поверхность сместителя, тем больше должно быть подобное смещение. Наблюдающиеся отдельные случи смещения зон линеаментов, выявленные при пороге 70, по отношению к зонам при пороге 80, обусловлены именно данным обстоятельством. Так как подобное смещение может происходить как в СЗ-м, так и в ЮВ-м направлениях, то сместители скрытых разломов в этих случаях при общих крутых углах наклона могут иметь примерную в равной степени как СЗ-е, так и ЮЗ-е азимуты падения.

На рис. 4 и рис. 5 приведены схемы линеаментов, полученные при автоматизированном дешифрировании двух половинок исходного космического изображения – на СЗ-ую и ЮВ-ую части Дагомысского тестового участка при пороге 70 и размерах 1000x1500 пикселей. Генерализация исходного изображения (огрубление пикселей) достигало 4 раз. При таком размере пикселей поперечные зоны линеаментов проявлены лишь вдоль долины р.Хобза и в междуречье рек Мамайка-Сочи. Продольные

линеаменты и секущие их под острым углом линеаменты выражены в прибрежной полосе, а также к северу от проектируемой автомобильной трассы, пересекая ее лишь вблизи р.Хобза. Таким образом, в западной части трассы, в районе р.Хобза, наблюдается очень напряженная тектоническая обстановка, связанная с пересечением здесь продольных и поперечных зон разрывных нарушений и зон трещиноватости горных пород.

По результатам автоматизированного линеаментного анализа космического изображения Quick Bird и его фрагментов составлена карта линеаментной тектоники проектируемого участка автодороги в масштабе 1:25000, которая приведена в приложении к диссертации. На карте показаны поперечные зоны трещин, продольные и поперечные разрывные нарушения, проектируемая автомобильная трасса, углы крутизны склонов вдоль трассы. Зоны поперечных трещин, узлы их пересечения, расположенные на склонах с уклонами более 20 градусов представляют собой места, благоприятные для развития оползневых процессов, которые отмечены в междуречье рек Лоо – Дагомыс , Дагомыс – Мамайка.

Автоматизированный линеаментный анализ аэрофотоснимков. Проанализировано 34 аэрофотоснимка масштаба 1:10000. Автоматизированный линеаментный анализ выполнен при порогах 60, 50, 40. Это позволило выявить как основные линеаменты (при порогах 60, 50), так и оперяющие (при пороге 40), (рис 6, 7).

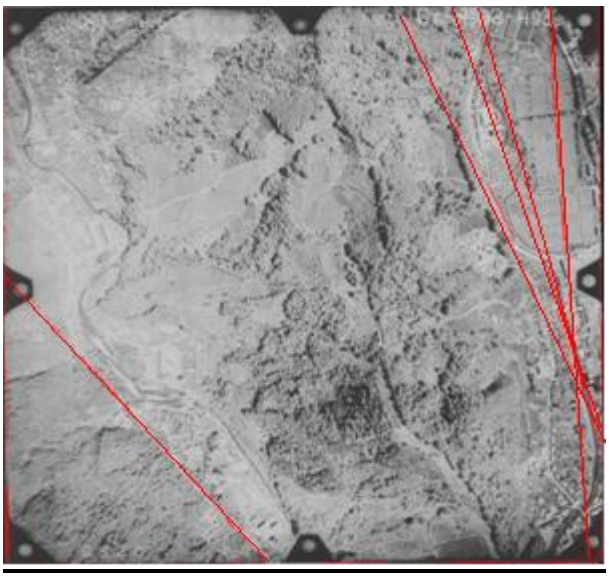


Рисунок 6. Схема дешифрирования аэрофотоснимка при пороге 60 (междуречье Западного и Восточного Дагомыса)

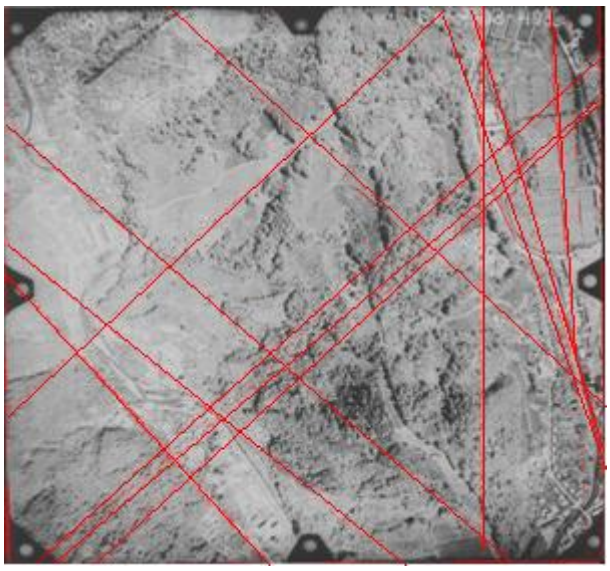


Рисунок 7. Схема дешифрирования аэрофотоснимка при пороге 50 (междуречье Западного и Восточного Дагомыса)

Основные результаты автоматизированного линеаментного анализа аэрофотоснимков сведены на рис. 8, а отдешифрированные аэрофотоснимки приведены в приложении к работе.

Анализ схемы дешифрирования (рис.8) показывает, что линеаменты, проявленные, на аэрофотоснимках расположены под углом 45^0 к линеаментам, выявленным по космическим изображениям. Большая часть из них имеют субширотные или близкие к ним простирания. Но на отдельных участках проектируемой автотрассы (особенно ее восточной части) имеются линеаменты субмеридиональных и ЮВ-СЗ-х простираний, которые так же не были выражены на космических изображениях.

Подобное соотношение систем линеаментов, выявленных по аэрофотоснимкам и по космическим изображениям, объясняется тем, что в связи с малой площадью охвата и высоким разрешением на аэрофотоснимках, выявлен самый верхний уровень организации систем линеаментов, проявленный в локальных неоднородностях ландшафта и прежде всего в орографии, гидрографии (овражно-балочной сети) и рыхлых толщах горных пород, развитых на дневной поверхности. Это хорошо видно на геологической карте, на которой восточнее р. В. Дагомыс и других местах четвертичные отложения развиты в виде узких языков (по долинам оврагов и лощин), вытянутых в субширотных и близких к ним направлениях.

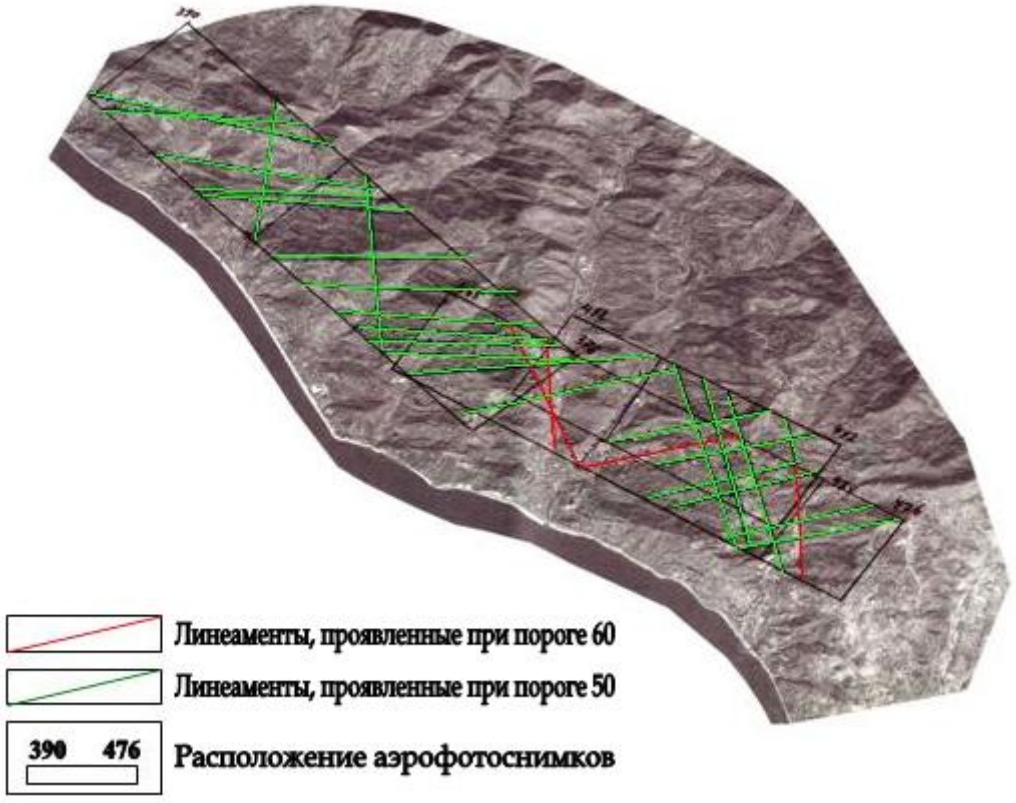


Рисунок. 8. Схема дешифрирования линеаментов по аэрофотоснимкам

Подобное соотношение систем линеаментов, выявленных по аэрофотоснимкам и по космическим изображениям, объясняется тем, что в связи с малой площадью охвата и высоким разрешением на аэрофотоснимках, выявлен самый верхний уровень организации систем линеаментов, проявленный в локальных неоднородностях ландшафта и прежде

всего в орографии, гидрографии (овражно-балочной сети) и рыхлых толщах горных пород, развитых на дневной поверхности. Это хорошо видно на геологической карте, на которой восточней р. В. Дагомыс и других местах четвертичные отложения развиты в виде узких языков (по долинам оврагов и лощин), вытянутых в субширотных и близких к ним направлениях.

Мамайский оползневый участок расположен между тыльной частью Воронцовского покрова и р. Мамайка (р.Псахе).). В его пределах имеется два крупных субширотных разлома. Кроме данных разломов, обнаруженных прямыми наблюдениями на местности и в скважинах, имеется ещё серия поперечных (субмеридиональных) разломов, которые не выходят на земную поверхность, но фиксируются по субмеридионально вытянутыми долинам рек Дагомыс, Мамайка(Псахе) и Сочи, которые развились в ослабленных зонах (зонах трещиноватости), возникших над этими скрытными разрывными нарушениями. Отклонения простирания долин от меридиана находятся в среднем в пределах ±20°. Кроме данных поперечных разломов, по-видимому, существуют и другие менее амплитудные и широкие разломы, которые выявляются по рисунку овражной сети и рельефа. Наличие большого количества крупных коленообразных изгибов вышеназванных рек говорит о том, что продольных (субширотных) разломов гораздо больше, чем это показано на геологической карте. Видимо, эти разломы либо малоамплитудны и развиты в однородных породах и поэтому не обнаружены при полевых исследованиях, либо они, как и поперечные разломы не выходят не земную поверхность и фиксируются в рисунке гидросети и рельефа благодаря развитым над ними зонами трещиноватости. Таким образом, на Мамайском оползневом участке и прилегающих к нему территориях развита достаточно плотная ортогональная (меридионально-широтная) система выходящих и не выходящих на земную поверхность зон разрывных нарушений и связанных с ними зон трещиноватости. Анализ линеаментов, выявленных при автоматизированном дешифрировании аэрофотоснимков, позволил установить характерные особенности (специфику) напряжения - деформационного состояния Мамайского оползневого участка. Таким образом, выполнены автоматизированный линеаметный анализ зональных космических изображений за 1989-2004 г. выявил достаточно высокую динамичность систем космолинементов, что, видимо обусловлено изменением поля тектонических напряжений, активизирующих одни системы трещины и “ закрывающим “ другие системы. Наиболее благоприятные условия для развития гравитационных процессов возникают в ослабленных тектонических зонах земной коры, характеризующихся наибольшей раздробленностью и проницаемостью и характеризующиеся максимальной плотностью космолинеаментов.

Туапсинский тесовый участок охватывает полосу вдоль проектируемой автомобильной дороги на обходе г. Туапсе в интервале между километровыми столбами 50-74. Цель ранее выполненных (НИПИ «ИнжГео») здесь инженерно-геологических изысканий развития опасных геологических процессов для уточнения местоположения трассы. Высокая степень расчлененности природного крутосклонного рельефа, наличие активных тектонических зон и разрывов, повышенная сейсмичность территории (7-9 баллов), напряженно-деформированное состояние рыхлых грунтов и подстилающего субстрата, повышенная обводненность, наличие специфических грунтов предопределили здесь инженерно-геологическую обстановку, обуславливающую в первую очередь активное развитие негативных геологических и инженерно-геологических процессов: оползни, селевые потоки, эрозия, осыпи, обвалы, карст и др. Детальный анализ геологических карт и геологического профиля, составленный по линии обходной дороги г. Туапсе позволяет выявить особенности тектонического строения данной зоны. Наиболее характерной чертой тектонического строения зоны является ее высокая раздробленность на отдельные блоки, имеющими ширину (толщину) от 150-200 м. до 600-800 м. Отдельные блоки по взбросо-надвигам подвинуты друг от друга в юго-западном направлении с амплитудами от 20-50 м. до 200-700 м. Наиболее высокоамплитудные смещения наблюдаются на отрезке от начала обходной дороги до р. Туапсе, амплитуды смещения не превышают 20-80 м. Из экзогенных процессов и форм рельефа в районе наиболее значимое распространение получили плоскостная и линейная эрозия, оползни, крип, обвалы и осыпи. В процессе обработки результатов автоматизированного дешифрирования линеаментов на аэрокосмоснимках отбирались те линеаменты и их серии, которые устойчиво выражены на аэроснимках разного масштаба и имеют продолжение на соседних снимках. В результате подобного отбора и выбраковки была составлена крупномасштабная карта линеаментов в масштабе 1:25000, характеризующая современную геодинамическую обстановку в Туапсинском регионе вдоль проектируемой трассы автодороги на участке обхода г.Туапсе. Анализ карты линеаментов показывает, что наиболее сложная геодинамическая обстановка, характеризующаяся максимальным развитием серий линеаментов, т.е. зон разрывных нарушений и трещиноватости, существует в междуречьях рек Агой-Паук, Туапсе-Деберкой и Шепси-Шаюк. Наиболее напряженная геодинамическая обстановка существует в местах пересечений зон линеаментов разных направлений. В этих местах горные породы в наибольшей степени раздроблены и поэтому наиболее мобильны. Последнему обстоятельству в значительной степени способствует их максимальная обводненность, т.к. они служат естественными наиболее проницаемыми путями, как поглощения поверхностных (атмосферных) осадков,

так и миграции подземных вод. Фактором, сдерживающим развитие опасных геодинамических процессов (оползневых, солифлюкционных, суффозионных др.) в зонах линеаментов и местах их пересечений является обратный (навстречу склону) по отношению к рельефу уклон слоев горных пород, обусловленный перемещением и опрокидыванием к юго-западу складчато-надвиговых структур в Туапсинском регионе.

Исходя из анализа карты линеаментов, выявленных в результате автоматизированной обработки аэрофотоснимков, можно выделить следующие наиболее раздробленные (трещиноватые) участки, характеризующиеся пересечением серий трещин разных направлений и представляющих наибольшую потенциальную угрозу для развития негативных (оползневых и др.) склоновых процессов, особенно под действием антропогенного фактора (подрезных склонов, вырубки лесов, распашки территории, нарушение и уничтожение естественной овражно-балочной дренажной системы и т.п.).
Вдоль проектируемой трассы автодороги подобные участки наибольшей раздробленности горных пород можно выделить в междуречье рек Агой-Паук, в долине р.Туапсе и в районе села Кроянское. Но следует сразу же отметить, что хорошо развитая на данных участках естественная дренажная овражно-речная сеть и достаточно крутые склоны быстро сбрасывают поверхностный водный сток, образующийся во время дождей и снегатаяния, вниз по склону и тем самым препятствует значительному пополнению запасов подземных (в первую очередь грунтовых) вод. Данное обстоятельство способствует сохранению гравитационной устойчивости склонов и не способствует активизации развития склоновых процессов, по крайней мере тех из них, которые глубоко затрагивают коренные породы. В данных условиях могут развиваться и развиваются в основном лишь склоновые процессы преобразований перемещения рыхлых покровных (делювиальных, элювиальных и т.п.) четвертичных отложений.

По результатам автоматизированного линеаментного анализа аэрокосмоизображений составлена карта инженерно-геологических условий вдоль трассы обхода г. Туапсе в масштабе 1:10000 и геологические профили. Выполненные исследования на обходе г. Туапсе показали, что вдоль проектируемой трассы автодороги инженерно-геологические условия вполне благоприятны для ее строительства насколько они могут быть вообще благоприятны в условиях сложной геодинамической обстановки, существующей на Кавказе. Активизацию развития экзогенных процессов (оползневых и др.) нередко провоцируют различные антропогенные факторы, связанные с большой хозяйственной и рекреационной нагрузкой на Черноморском побережье Кавказа. С целью предотвращения активизации негативных природных процессов необходимо сохранять естественные дренажные поверхностные (эрозионные) системы, защищать склоны от

обводнения поверхностными и хозяйственными водами, от подтопления и подрезания (антропогенного, эрозионного и абразионного). Кроме того, следует избегать больших статистических и динамических нагрузок на склон. Особое внимание при строительстве следует обращать на места пересечений трассой зон линеаментов, которые характеризуются наибольшей раздробленностью и обводненностью горных пород.

В четвертой главе продемонстрирована возможность использования мультифрактального похода для прямого обнаружения оползневых структур по космическим изображениям и аэрофотоснимкам. В ней по существу впервые рассматривается методика применения мультифрактального анализа для обнаружения оползневых структур на аэрокосмических снимках высокого разрешения.

Предлагаемая автором работы методика состоит из пяти последовательных этапов:

1) предварительная подготовка аэрокосмических снимков;
2) выделение на аэрокосмических снимках участков представляющих интерес для исследования оползневых структур и их активности;
3) расчет мультифрактальных характеристик для каждой области интереса;
4) построение и анализ пространственных спектров изменения мультифрактальных характеристик;
5) интерпретация полученных результатов.

Априорной основой данной методики является предположение о том, что оползневые процессы могут находить отклик в вариациях мультифрактальных характеристик цифровых изображений, полученных в процессе дистанционного зондирования Земли. Трудность интерпретации изображений земной поверхности (оползневых структур) обусловлена комплексным влиянием различных внешних и внутренних факторов, вследствие метеорологических, техногенных, антропогенных и других воздействий. В результате такого воздействия могут проявляться разнообразные вариации мультифрактальных спектров в широком диапазоне значений, которые затрудняют выделение аномальных участков земной поверхности, связанных с оползневой деятельностью. Поэтому интерпретация пространственных спектров, полученных в ходе мультифрактальной параметризации, должна проводится совместно с анализом результатов применения других методов обнаружения оползневых структур по аэрокосмическим снимкам высокого разрешения, полученным в ходе ДЗЗ. Так же в четвертой главе описаны методики мультифрактальной параметризацией изображений природных структур. Дана информационная интерпретация мультифрактального формализма. С целью экспериментальной апробации предложенной методики применения мультифрактального анализа цифровых изображений для обнаружения оползневых

структур, был проведен анализ аэро- и космического снимков высокого разрешения прибрежной полосы Сочинского района Краснодарского края. Выбор Сочинского района в качестве тестового региона был обусловлен наличием данных, полученных в ходе наземных исследований, указывающих на высокую оползневую активность, наблюдавшуюся на данной территории на протяжении последних лет. В работе были использованы космический снимок полученный со спутника QuickBird 19 сентября 2007 года в панхроматическом спектральном диапазоне с пространственным разрешением равным 61 см (см. рис. 9) и аэроснимок (рис. 10), сделанный на год ранее (26 октября 2006 г.). Контуром на снимке указаны приблизительные границы оползневого объекта. Поскольку оба снимка были получены в ясную погоду практически при полном отсутствии облачности, исследуемые цифровые изображения отличались высоким контрастом и низким уровнем помех.

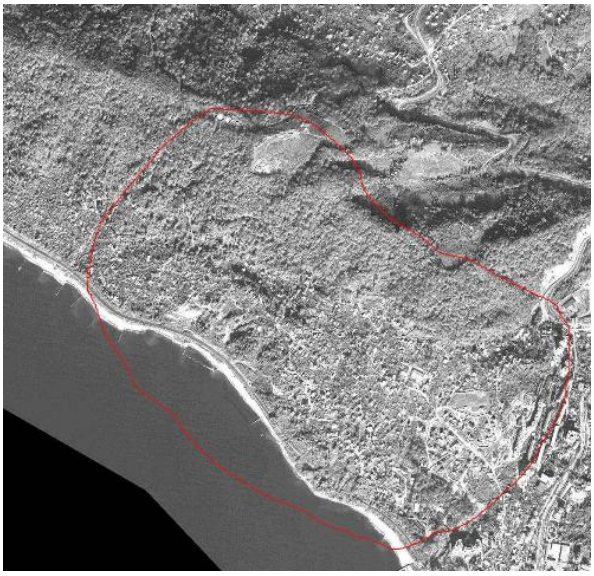


Рисунок. 9 Фрагмент панхроматического изображения прибрежной полосы Сочинского района Краснодарского края (район р. Мамайка), полученное со спутника QuickBird. Пространственное разрешение – 61 см. 19 сентября 2007 г.

Рисунок 10. Аэрофотоснимок прибрежной полосы Сочинского района Краснодарского края. 26 октября 2006 г.

В результате тщательного анализа материалов аэрокосмической съемки было принято решение о проведении мультифрактальной обработки территории, расположенной вдоль береговой линии моря. Причинами принятия такого решения были: наличие большого числа оползней в прибрежной полосе и простота представления пространственных спектров вариации мультифрактальных параметров, полученных вдоль заданной траектории. Исходя из этого, первоначально на цифровых изображениях, используемых в данной работе, были сформированы последовательности областей интереса квадратной

формы размером 256 и 512 пикселей для космического снимка и 256 и 512 для аэроснимка с площадью перекрытия значительно превышающей площадь прямоугольника, образованного смещением любой точки области интереса в горизонтальном и вертикальном направлениях по отношению к новому положению. На рисунках 11, 12 продемонстрированы изучаемые материалы аэрокосмической съемки с последовательностями выделенных областей интереса размером 512×512 пикселей.

Оценка и анализ мультифрактальных характеристик данных изображений осуществлялись с помощью разработанного в МИИГАиК программного пакета «Фрактал-ПК», позволяющего проводить всесторонний мультифрактальный анализ цифровых изображений геопространственных структур различной природы. В качестве входных параметров для мультифрактального анализа были выбраны следующие:

$q_{\min} = 0$, $q_{\max} = 20$ и $\varepsilon = 2^i$, $i = 1, 2, \ldots \log_2 L$, где L - размер области интереса.

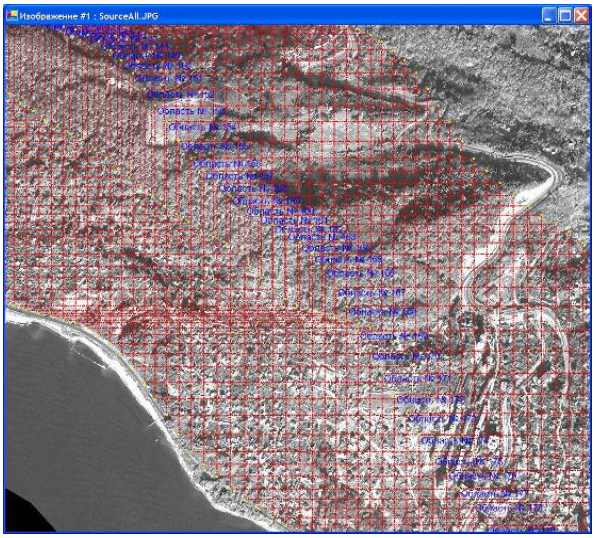


Рисунок 11. Цифровое изображение фрагмента космического снимка с последовательностью областей интереса размером 512×512 пикселей

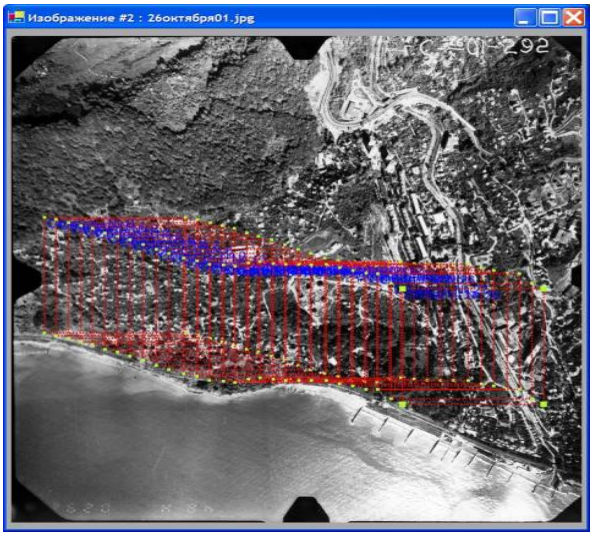


Рисунок 12. Цифровое изображение аэроснимка с последовательностью областей интереса размером 512×512 пикселей

В результате проведенного анализа для каждой последовательности пространственных окон были построены спектры варьирования размерностей Реньи и параметра Δ_Q, показанные в таблицах 1 и 2. В ходе исследования полученных зависимостей было обнаружено, что в графиках варьирования показателя Δ_Q, вычисленного для космического снимка, можно выделить как области минимальных значений, характеризующие территории с наименьшей степенью нарушения симметрии и порядка, так и участки с резкими вариациями мультифрактального параметра, диагностирующие

области на изображениях со сложными, крайне неупорядоченными текстурами. На графиках изменения значений спектров Δ_Q при L=512 выделяются четыре отчетливых максимума, один из которых (области № 165 – 175) (см. таблицу 1) значительно превосходит по своему значению три остальные. Этот максимум практически точно соответствует области, которая в ходе полевых исследований была указана как территория, содержащая признаки оползневой активности. Значения параметра Δ_Q, наблюдаемые для областей от №80 до №100 значительно ниже значений главного максимума. Вместе с тем этот участок высоких значений Δ_Q сохраняется и при уменьшении размера выбираемых областей интереса. Окончательное решение относительно присутствия на данной территории оползневых объектов, может быть принято только при сопоставлении полученных результатов с данными наземных наблюдений. Остальные участки высоких значений Δ_Q приходятся на области городской и промышленной застройки, характеризующиеся чередованием большого числа мелких объектов с высокой и низкой отражательной способностью. Это проявляется в размытии и раздваивании данных максимумов при уменьшении линейного размера пространственного скользящего окна. Как видно из таблицы 2 разброс значений D_q для аэрофотоснимка также позволяет локализовать территорию с высокой оползневой активностью. Из сравнения рисунков 10 и 11 хорошо видно, что контур территории, покрываемой областями интереса с №0 по №18, для которых Δ_Q принимает максимальные значения, находится в хорошем соответствии с границей оползневого объекта, указанной на рис. 10.

Таблица 1. Графики изменения мультифрактальных параметров D_q и Δ_Q в скользящем пространственном окне линейного размера *L*, построенные для цифрового изображения космического снимка

Линейный размер областей интереса, *L* (пикс.)	График изменения размерностей D_q, $q \in (0, 20)$	График изменения параметра Δ_Q

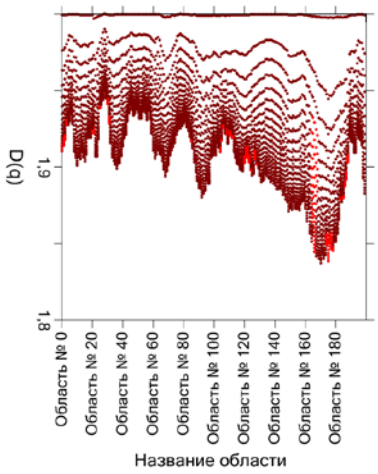
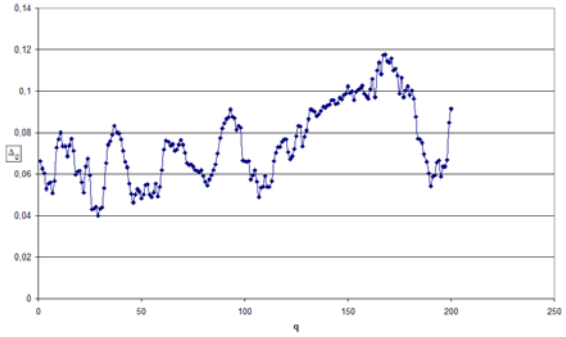
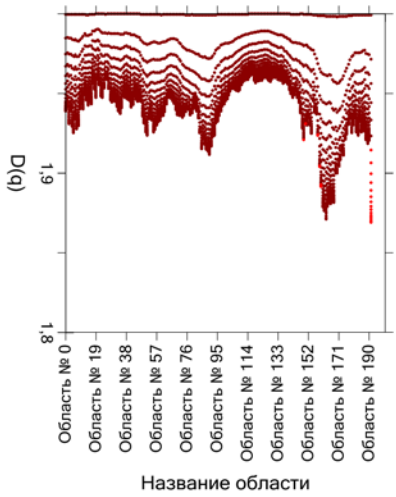
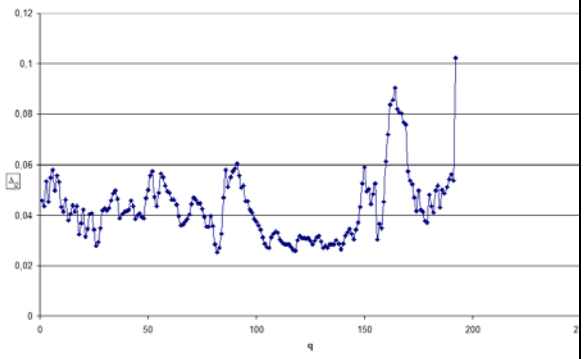
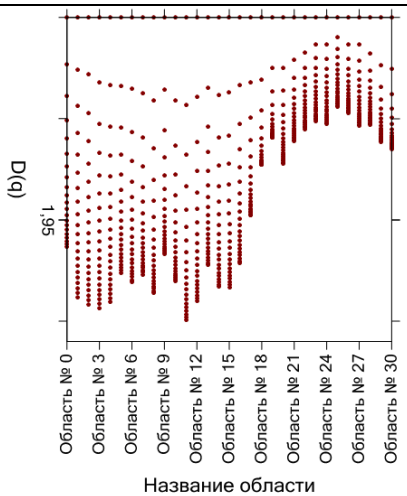
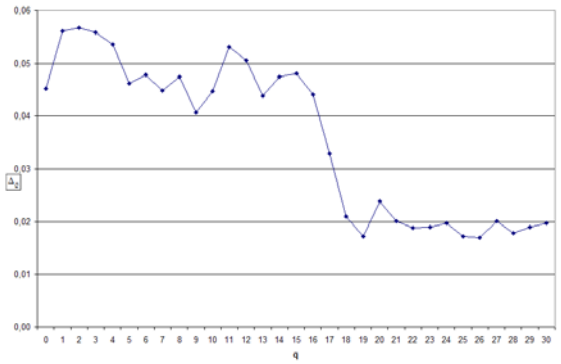
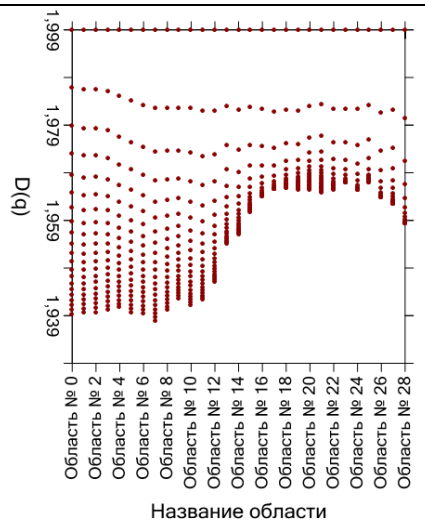
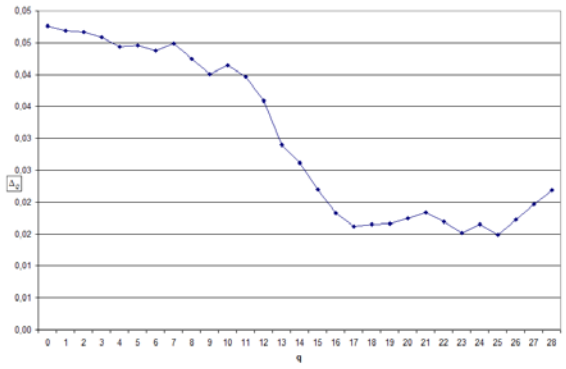
256		
512		

Таблица 2. Графики изменения мультифрактальных параметров D_q и Δ_Q в скользящем пространственном окне линейного размера *L*, построенные для цифрового изображения аэроснимка

Линейный размер областей интереса, *L* (пикс.)	График изменения размерностей D_q, $q \in (0, 20)$	График изменения параметра Δ_Q
256		

512		

Результаты проведенных исследований показали, что разработанная методика мультифрактального анализа аэро- космических изображений позволяет определять местоположение территорий с подозрением на высокую оползневую активность для последующего проведения детального обследования наземными, авиационными и спутниковыми методами, и может быть использована в целях параметризации опасных экзогенных геологических процессов.

Заключение. Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработана методика оценки оползневой опасности на основе многоуровневого линеаментного анализа аэрокосмических изображений земной поверхности, позволяющая выявить участки земной поверхности благоприятные для развития оползневых процессов.
2. Разработана методика оценки оползневой опасности на основе мультифрактального анализа аэрокосмических изображений земной поверхности, позволяющая определить местоположение участков территории с высокой оползневой активностью.
3. Проведена апробация разработанных методик при выполнении производственных работ по определению степени оползневой опасности территорий на объекте «Федеральная автомобильная дорога М-27 Джубга – Сочи». Составлены карты оползневой опасности на исследуемую территорию.

Основные публикации по теме диссертации

1. Малинников В.А., Зверев А.Т., **Донов В.В**. Методика оценки оползневой опасности на Черноморском побережье Кавказа на основе линеаментного анализа аэрокосмических изображений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». -2007. -№ 6 – с. 86-92.

2. Малинников В.А., Учаев Д.В., **Донов В.В**. Применение мультифрактального анализа для обнаружения оползневых структур на аэрокосмических снимках // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». -2008. -№ 6 – с. 12-18.

3. Малинников В.А., Зверев А.Т., **Донов В.В**. Методика оперативной оценки оползневой опасности по результатам аэрофотосъемки // Известия ВУЗов «Геодезия и аэрофотосъемка». -2009. -№ 5 – с. 28-33

4. Малинников В.А., Зверев А.Т., **Донов В.В**. Методика многоуровневого линеаментного анализа аэрокосмических изображений и использование ее для оценки оползневой опасности // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр – XXI век». – 2009 – с. 111