На правах рукописи

ПРЕСТОН НАТАЛИЯ ЕВГЕНЬЕВНА

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕКСТУРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Специальность 25.00.34

Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Ильин Юрий Александрович

Официальные оппоненты: Зверев Анатолий Тихонович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра космического мониторинга Московского государственного университета геодезии и картографии, заведующий кафедрой

Барталев Сергей Александрович, доктор технических наук, Лаборатория спутникового мониторинга наземных экосистем Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), заведующий лабораторией

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

Защита состоится « 13 » декабря 2012 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.01 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4, МИИГАиК, зал заседания Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан « __ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Краснопевцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы:

В настоящее время широкое развитие получили космические системы дистанционного зондирования Земли в тепловом ИК-диапазоне. Результаты тепловой съемки поверхности Земли находят очень широкое применение в самых разных областях: картографирование тепловых полей Земли, определение температуры морской поверхности, наблюдение за вулканической деятельностью, мониторинг лесных пожаров; в последние годы все более широкое распространение получает изучение влияния «тепловых островов» городских территорий на окружающую среду.

Тепловые ИК-изображения на сегодняшний день характеризуются высоким пространственным разрешением. Современные сенсоры позволяют достигать таких разрешений, как 90 м (Aster), 60м (Landsat 7), 120м (Landsat 5). Такие снимки содержат качественно новую информацию о ландшафтах подстилающей поверхности и их географических характеристиках. Однако они демонстрируют высокую неоднородность, и стандартные методы, применяемые для анализа и классификации данных, становятся менее эффективными.

Актуальность диссертационной работы, таким образом, обусловлена:
необходимостью разработки новых методик обработки тепловых снимков с высоким пространственным разрешением.

Цель исследования: разработать методику текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов на основе аэрокосмических наблюдений.

Задачи исследования:

1. Изучить особенности пространственного текстурно-спектрального характера данных дистанционного зондированияна основе тепловых ИК-снимков.
2. Разработать методику пространственного текстурно-спектрального анализа тепловых ИК-снимков, основанную на фрактальном и мультифрактальном подходе.

3. Реализовать алгоритмы и математическое обеспечение, реализующие предложенную методику.
4. Провести экспериментальную проверку разработанной методики для обработки аэрокосмических изображений в тепловом ИК-диапазоне.

Объект исследования: ландшафты земной поверхности, образующие температурные контрасты на тепловых ИК-изображениях.

Методология исследования

Проведенные исследования основаны на методах математической статистики, вычислительной математики, теории обработки цифровых изображений, геоинформатики, прикладного программирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые обосновано применение мультифрактального анализа при обработке тепловых неоднородностей водной поверхности.
2. Разработана новая методика фрактальной сегментации для классификации различных типов ландшафтов по тепловым ИК-снимкам, в частности, для выявления участков «городского острова теплоты».
3. Предложена новая методика создания динамической модели электронного изображения ландшафтов подстилающей поверхности на основе исходного снимка в тепловом или оптическом диапазоне и теплофизических параметров объектов.

Научные результаты выносимые на защиту:

1. Методика пространственного текстурно-спектрального анализа, основанная на фрактальной сегментации для выявления различных объектов подстилающей поверхности по тепловым ИК-снимкам.
2. Методика мультифрактального анализа для обработки слабоконтрастных тепловых неоднородностей.
3. Методика создания динамической модели электронного изображения ландшафтов подстилающей поверхности на основе исходного снимка в тепловом или оптическом диапазоне и теплофизических параметров объектов подстилающей поверхности.

Практическая значимость работы:

Предложенная методика пространственного текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов на основе аэрокосмических наблюдений рекомендована к использованию для задач исследования природных ресурсов и экологического мониторинга для получения дополнительной информации о температурных характеристиках объектов подстилающей поверхности, что позволяет автоматизированно классифицировать различные типы ландшафтов, выделять температурные неоднородности водной поверхности и создавать динамическую модель электронного изображения подстилающей поверхности по тепловым ИК-снимкам.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности:

Данная работа посвящена исследованию тепловых неоднородностей объектов подстилающей поверхности, определению их характеристик и повышению изобразительных свойств теплового ИК-снимка на основании проведенной обработки. Таким образом, работа сфокусирована на разработке теоретических и практических принципов обработки тепловых ИК-изображений с целью получения информации о характерных свойствах объектов земной поверхности, что является одной из областей исследования специальности 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия», в рамках которой и предлагается к защите данная работа.

Апробация и реализация результатов исследования:

Основные положения диссертационной работы докладывались на 63,64,65,66 и 67 научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых, проводившихся в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) в период с 2008 по 2012 г.

Публикации:

По результатам проведенных исследований было опубликовано 3 научных работы в журнале «Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосьемка».

Структура диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, который насчитывает 113 наименований. Объём работы 112 страницы текста, 6 таблиц, 36 иллюстраций и приложения на 13 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи исследований, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе «Основные принципы и область применения тепловой ИК-съемки»** приведено краткое изложение физических основ аэрокосмической съемки в тепловом ИК-диапазоне и обзор современных направлений исследований данных дистанционного зондирования в тепловом ИК-диапазоне.

Круг объектов наблюдения дистанционного теплового мониторинга многообразен. В него входят объекты, различающиеся своими физическими свойствами, положением в пространстве, происхождением и другими характеристиками.

Так как солнечное (внешнее) и эндогенное (внутреннее) тепло нагревает различные объекты по-разному, наземный ландшафт является нестационарным во времени и неоднородным в пространстве источником излучения – собственного и отраженного. Вследствие этого на поверхности Земли возникают температурные контрасты, которые регистрирует тепловая ИК-съемка.

В соответствии с перечисленными факторами, неоднородность распределения температурного поля на снимке является индикатором объектов, процессов и явлений, имеющихся на исследуемой территории.

Тепловая ИК-съемка применяется в основном для анализа поверхностной яркостной температуры и ее связи с различными характеристиками подстилающей поверхности, оценки городского острова теплоты и корреляции радиационной температуры поверхности с потоками энергии на ней.

Исследования по данным темам в основном идут по следующим направлениям:

1. Изучение экологических характеристик ландшафтов,
2. Изучение эффекта «городского острова теплоты».
3. Обнаружение и анализ тепловых аномалий.
4. Изучение температурной неоднородности водной поверхности и ледяного покрова.

Таким образом, данные тепловой ИК-съемки применяются для широкого круга задач, каждая из которых обладает своей спецификой. Вследствие этого, требуется применение индивидуальных подходов к исследованию различных классов объектов.

Вторая глава «Характер температурных контрастов тепловых ИК-снимков и методы их изучения» посвящена изучению факторов, формирующих температурные неоднородности на тепловых ИК-снимках, существующих способов их анализа, а также прогнозирования величины температурных контрастов в заданный момент времени.

Характер тепловых контрастов – основной признак, определяющий возможности и особенности дистанционного мониторинга Земли в тепловой ИК-части спектра, поэтому общую систематизацию всех объектов наблюдения по полученным тепловым изображениям целесообразно производить на этой основе.

В ИК-диапазоне температурный контраст зависит как от физических характеристик рассматриваемых земных покровов, так и от метеорологических условий. На величину контраста оказывает влияние облачность, которая с одной стороны уменьшает амплитуду суточного хода температур, а с другой стороны увеличивает яркостную температуру поверхности вследствие отражения ею излучения облаков. Также тепловые контрасты находятся в сильной корреляционной зависимости от силы ветра, нивелирующее влияние которого очень велико.

Существует несколько основных типов поверхностей: почвы, городская территория, растительность и водные объекты. Каждый из них имеет индивидуальную специфику собственного излучения, обусловленную не только свойствами материала, но и условиями съемки.

Характер температурного поля (или температурных контрастов) объектов земной поверхности зависит от большого количества факторов, связанных с физическими параметрами объектов, изменениями внешних условий и определяется в первую очередь источником нагрева. Для большинства объектов земной поверхности таким источником является солнечная радиация, которая нагревает поверхность Земли неравномерно – в зависимости от физических характеристик объектов, условий освещенности, географических координат, сезона и времени суток.

Тепловые изображения с высоким пространственным разрешением содержат качественно новую информацию о земных ландшафтах. Это обстоятельство приводит к развитию новых подходов к обработке изображений, таких как фрактальный и мультифрактальный анализ, инструменты которых используются в данной работе.

2.1. Фрактальный анализ

Одним из методов анализа текстуры является фрактальный анализ, который успешно используется в исследовании городских островов теплоты и их динамики.

Применение фрактальной геометрии в области дистанционного зондирования основывается на оценке фрактальной размерности. Фрактальная размерность (D) является центральным понятием в фрактальной геометрии для описания геометрической сложности природных явлений, а также другие сложных форм.

Фрактальная размерность строго самоподобного объекта может быть вычислена математически с помощью формулы:

$$D = \frac{\log(N_r)}{\log(1/r)}, \text{ где} \qquad (1)$$

N_r представляет объект из N_r частей, уменьшенных в r раз.

2.2. Мультифрактальный анализ

Сложные фракталы, называемые мультифракталами, важны, прежде всего, потому, что именно они, как правило, и встречаются в природе, тогда как простые самоподобные объекты являются идеализацией реальных явлений. Фактически, мультифрактальный подход означает, что изучаемый объект каким-то образом можно разделить на части, для каждой из которых наблюдаются свои свойства самоподобия.

Наилучшие результаты в обработке тепловых ИК-снимков дает инструмент мультифрактального анализа, называемый точечные показатели Гельдера.

Смысл этой функции состоит в следующем. Предположим, что задано распределение меры μ на некотором множестве. Если это множество покрывать шарами диаметра ε, то мера шара с центром в точке xi зависит от ε по степенному закону вида:

$$\mu_{xi}(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\alpha(xi)}, \qquad (2)$$

где α (xi) называется гельдеровским показателем сингулярности меры.

Третья глава «Разработка методик пространственного текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов и динамической модели тепловых изображений на основе аэрокосмических наблюдений» посвящена описанию ключевых этапов методик пространственного текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов и динамической модели тепловых изображений на основе аэрокосмических наблюдений.

Методика пространственного текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов разработана с учетом специфики выбранных классов объектов и применения индивидуального подхода обработки к каждому из них.

Разработанная методика пространственного текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов разработана включает в себя пять основных этапов. В первой подготовительной части необходимо собрать информацию о выполнении съемки, такую как: дата и время съемки, координаты снимка на местности, параметры солнечного движения; а также рассчитать поверхностную яркостную температуру по полю изображения.

На втором этапе происходит выделение и анализ тепловых аномалий, если они присутствуют на снимке. Следующим шагом является выделение участков водной поверхности, участков «городского острова теплоты», почвы и растительности с помощью инструментов фрактального анализа, описанных во второй главе.

На четвертом этапе проводится исследование выделенных классов объектов на основании их температурных характеристик. На пятом этапе проводится прогнозирование тепловой картины исследуемой территории в заданный момент времени на базе имеющегося теплового ИК-снимка.

Графически методика представлена в виде схемы, показанной на рис. 1.

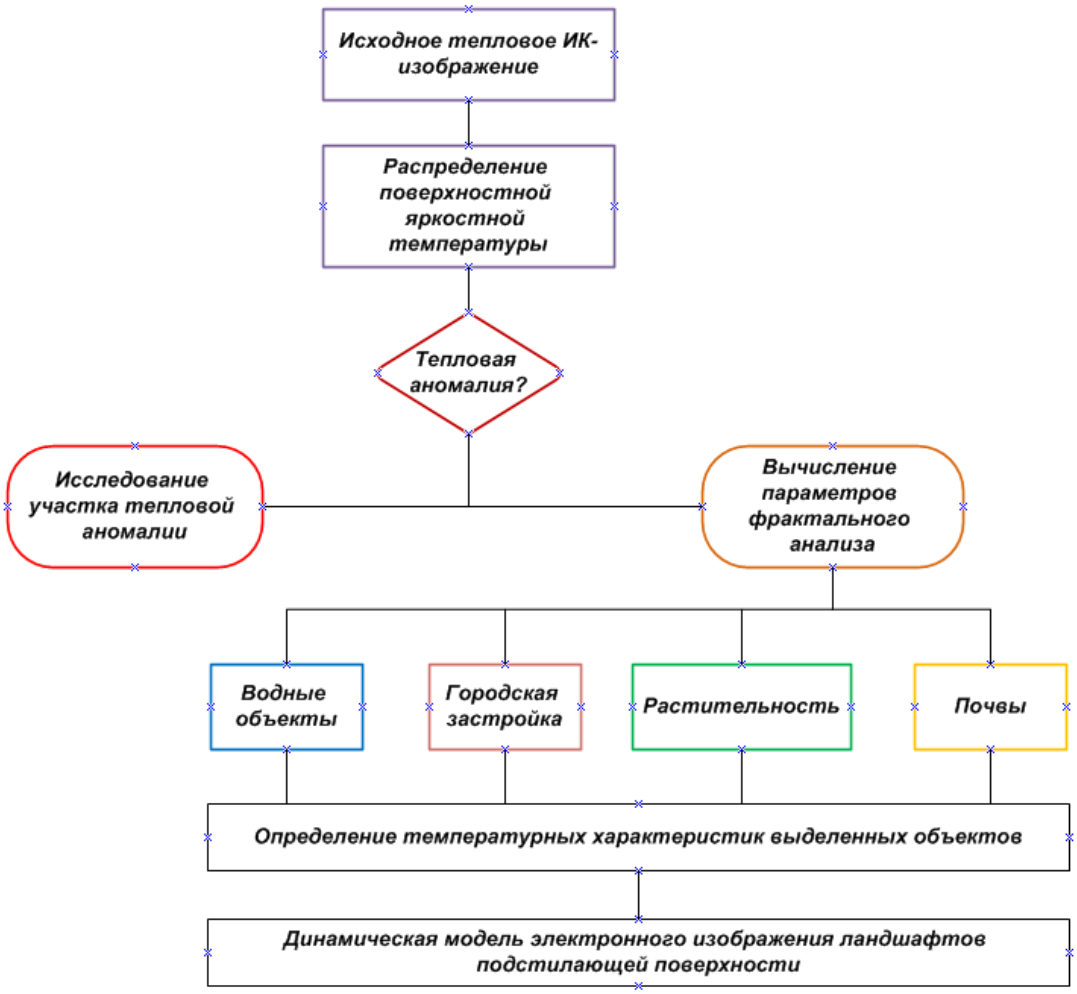


Рис. 1. Графическое представление методики текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов

Рассмотрим каждый этап подробнее.

3.1. Вычисление поверхностной яркостной температуры

Поверхностная яркостная температура (ПЯТ) определяется как средняя яркостная температура подстилающей поверхности и объектов на ней, принятых за черные тела.

Для различных спутниковых систем применяются разные методики расчета ПЯТ.

В данной работе поверхностная яркостная температура была рассчитана следующим образом:

$$T = k_1 / \ln(1 + k_2 / R_{TM}), \qquad (3)$$

где k_1 и k_2 – калибровочные константы. Для спутниковой системы Landsat 5:

k_1 = 1260,56 K и k_2 = 60,766 $мВтсм^{-2}\ стр^{-1}мкм^{-1}$.

R_{TM} – спектральная интенсивность излучения, измеренная сенсором. Величину R_{TM} можно получить, используя значения пикселей *DN* тепловых ИК-изображений с помощью формулы:

$$R_{TM} = \frac{DN}{255}(R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min}, \qquad (4)$$

где R_{max} и R_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения спектральной интенсивности излучения, определенные сенсором.

3.2. Выделение и анализ температурных аномалий на тепловых ИК-снимках

Тепловые ИК снимки предлагают больше возможностей для изучения лесных пожаров, в том числе, подземных торфяных, чем оптические.

Выбранный пиксель считается содержащим тепловую аномалию, если для него выполняются следующие условия:

1. $T(i,j) > t_1$ (5)
2. $|T(i,j) - T_{mean}| > t_2$,

где t_1 и t_2 – пороговые коэффициенты.

На этом этапе возможна загрузка теплового изображения на эту же территорию, сделанного в другой момент времени.

Из второго ИК-снимка выделяются пиксели с координатами тепловой аномалии первого изображения, и значения их ПЯТ записываются в отдельный вектор. Для анализа динамики тепловой картины к нему добавляется вектор ПЯТ тепловых аномалий, определенный по первому снимку. На основании величины коэффициента корреляции делается вывод о динамике или статике тепловой аномалии.

Графически данный этап представлен в виде схемы, показанной на рис. *2*.

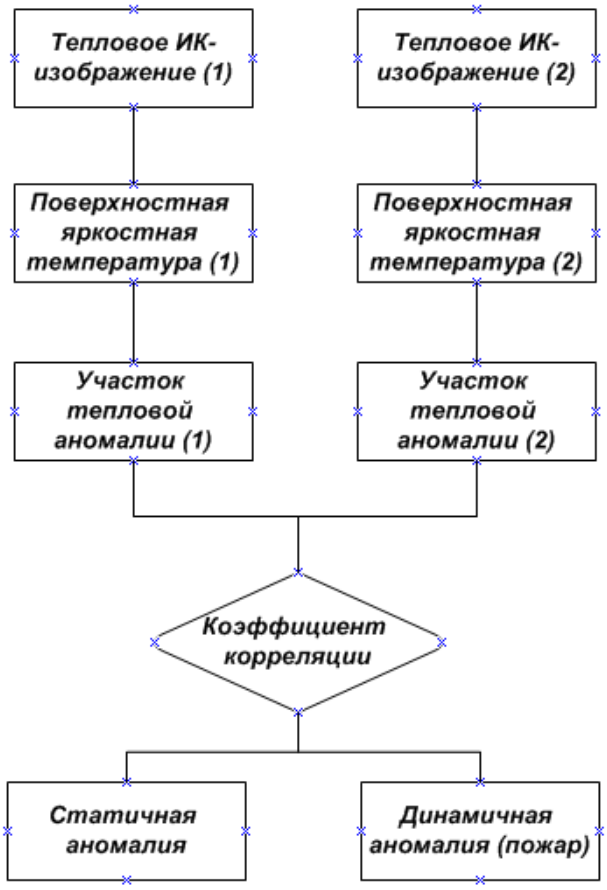


Рис. 2. Графическое представление методики выделения и анализа тепловых аномалий

Результатом обработки изображений на данном этапе является температурная картина участков тепловой аномалии и близлежащих территорий, на основании которой будут сделаны выводы о характере аномалии и динамике распространения огня, очагах пожара и площади выгоревших территорий, в случаях, если аномалия не статична.

Для уменьшения числа ложных источников теплового излучения (например, отражаемых от гладких поверхностей солнечных бликов) целесообразно использовать тепловые снимки, полученные в ночные и утренние часы.

Этап реализован в пакете прикладных программ MATLAB.

3.3. Выделение классов «водных объектов», «городской застройки», «почв» и «растительности» с помощью фрактального анализа

Анализируя распределение ПЯТ по полю снимка и определяя пороговое значение, можно определить «горячие» и «холодные» участки на тепловом ИК-изображении. Однако, как показывает практика, температурные диапазоны объектов различных классов значительно

перекрываются и использование только порогового значения поверхностной яркостной температуры не дает возможности точно выделить заданные классы объектов. Проиллюстрировать эту тенденцию можно с помощью гистограммы интенсивности пикселей, которая показывает распределение регистрируемой яркостной температуры на изображении (рис. *3*).

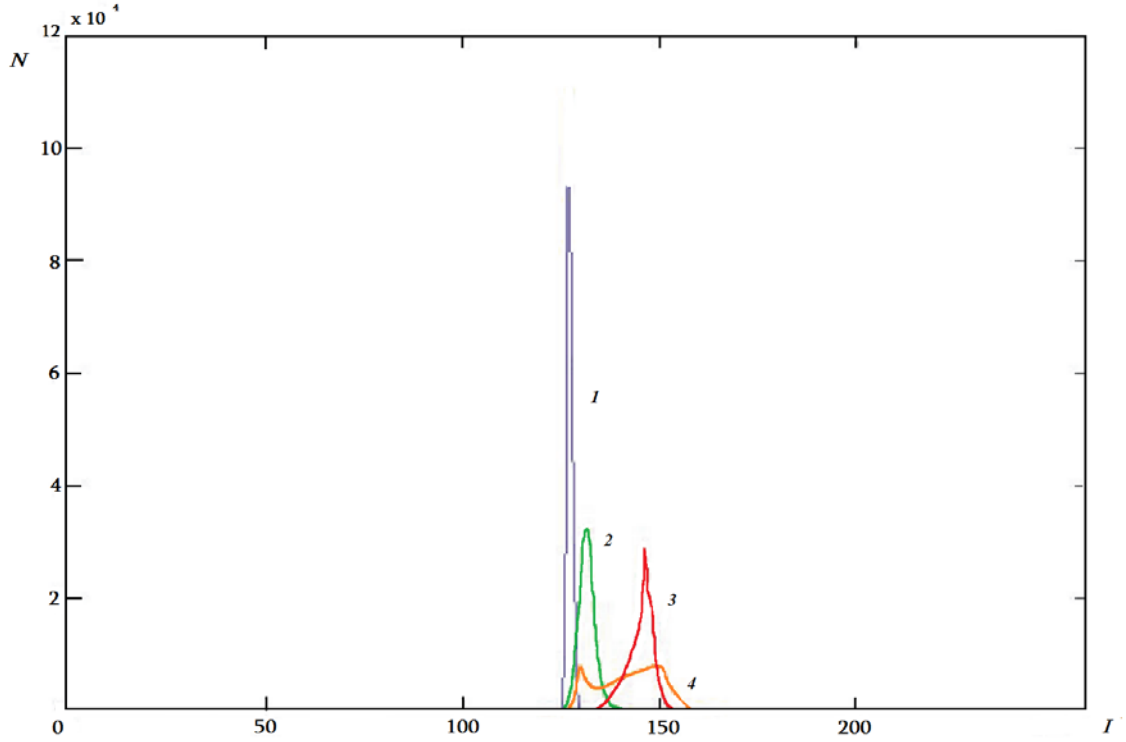


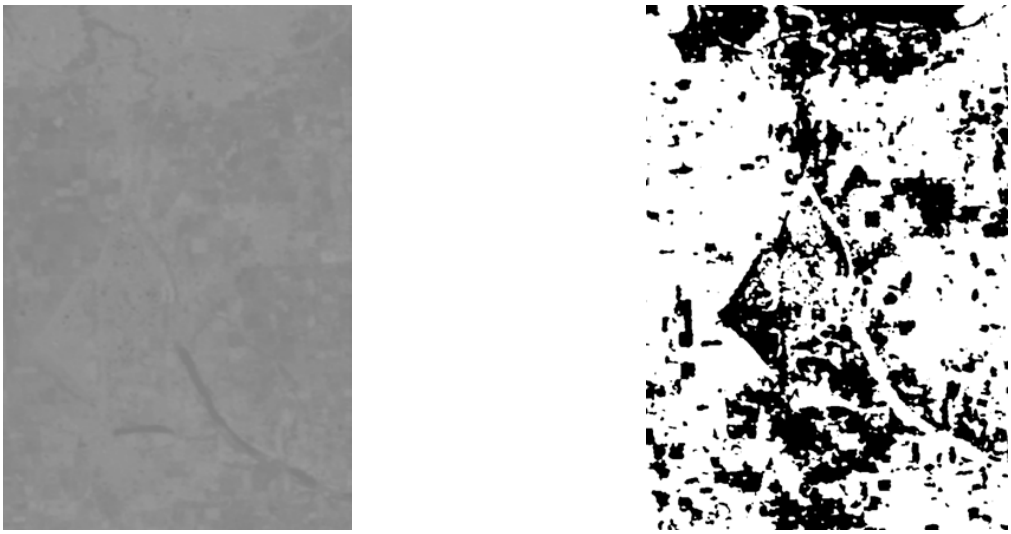
Рис. 3. Гистограммы интенсивности для объектов:

1 - водный объект; 2 - растительноть; 3 - городская застройка; 4 - почвы

Решением описанной проблемы является применение инструментов фрактального геометрии. Рассмотрим принцип этого подхода на примере теплового ИК-снимка с областью городской застройки. Эффект городского острова теплоты активно изучается с помощью фрактального анализа в работах многих авторов, однако в них вычисление параметров фрактальной геометрии происходит для заданного региона городской территории. Предложенная методика же на базе фрактального анализа позволяет эффективно сегментировать области на тепловых ИК-снимках и, в частности, выделять области городской застройки.

На рис. *4* показано исходное тепловое и соответствующее ему бинаризованное изображение, в качестве порога при бинаризации которого принято среднее значение ПЯТ по полю снимка.

Бинаризация теплового снимка позволяет проявить более заметную разницу в текстурах объектов с различным уровнем ПЯТ и, следовательно, в значениях их фрактальных размерностей. Это объясняется тем, что плотность участков с высокой ПЯТ выше в зонах городской застройки, поэтому ее фрактальная размерность, которая характеризует степень заполнения пространства, больше.



(а) (б)

Рис. 4. Исходный тепловой ИК-снимок (а) и соответствующее бинаризованное изображение (б)

В скользящем по полю изображения окне вычисляется фрактальная размерность. Участки, фрактальная размерность которых выше порогового значения, относятся к классу «городская застройка».

Данный этап обработки предусматривает вычисление фрактальной размерности пространственной модели и допускает некоторые ошибки в результате сегментации. Уточнить их позволяет вычисление набора параметров фрактального анализа, таких как фрактальнай размерность профильной модели и значение лакунарности.

Следуя данному принципу и принимая на этапе бинаризации различные значения ПЯТ, происходит выделение классов «водных объектов», «городской застройки», «почвы» и «растительности». Этап реализован в пакете прикладных программ MATLAB.

3.4. Исследование выделенных объектов на основании их температурных характеристик

Мультифрактальный анализ водных объектов

В процессе обработки тепловых изображений водных объектов появляются следующие задачи:

- описание температурных неоднородностей водной поверхности
- выделение четких структур на поверхности воды (вихрей)
- определение границ суши и льда на поверхности воды

Существующий на сегодняшний день метод расчета доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) позволяет выделять вихревые структуры на поверхности воды, но является достаточно сложным в использовании.

В предложенной методике реализовано применение мультифрактального анализа к изучению тепловых неоднородностей водных объектов, не различимых в оптическом диапазоне, в частности, вычисление точечных показателей Гельдера $\alpha(x,y)$. Первым шагом к их расчету является выбор меры. В данной разделе показано, что наилучшие результаты дает использование мер *Min(I)* и *Max(I)*, то есть мер, содержащих минимальное и максимальное значение интенсивности среди пикселей в заданном регионе.

Диапазон значений $\alpha(x,y)$ делится на равные промежутки, количество которых задается перед началом обработки, по умолчанию оно равно 256. Далее все пиксели изображения (x,y), в зависимости от значения вычисленного показателя $\alpha(x,y)$, распределяются по этим классам, и для каждого из них подсчитывается количество соответствующих пикселей. На основании этого деления можно проводить классификацию объектов, характеризующихся различными значениями показателей Гельдера.

Данный этап реализован с помощью модуля Fraclab, входящего в программный пакет MATLAB, а также разработанного в МИИГАиК программного пакета «Фрактал-ПК».

Исследование области городской застройки на основе распределения температуры и значения индекса TVDI

Распределение поверхностной температуры городской области в сочетании с результатами фрактального анализа позволяет делать выводы о суточных, сезонных и годовых изменениях

поверхностной температуры районов плотной застройки; влиянии развития города на географическое распределение температуры.

Дополнительной характеристикой при изучении городских территорий по данным дистанционного зондирования является индекс TVDI, который вычисляется на основе регрессионного анализа зависимости поверхностной яркостной температуры и индекса NDVI. Как показывают исследования в этой области, на основе значений индекса TVDI в городской области можно выделять районы с высокой и низкой плотностью застройки, городские парки и рекреационные зоны.

Вычисление индекса TVDI для растительности позволяет охарактеризовать степень ее влажности – от «очень сухой» ($0.8 < TVDI < 1.0$) до «очень влажной» ($0.0 < TVDI < 0.2$).

3.5. Методика создания динамической модели электронного изображения ландшафтов подстилающей поверхности

Пространственную неоднородность теплового поля характеризует температура поверхности, полученная по данным одномоментной съемки. Ее величина является достаточной при решении широкого спектра задач, однако на практике часто требуются мультивременные значения температуры, т.е. данные разновременных измерений температуры поверхности, такие как суточный ход и скорость изменения термодинамической температуры.

Суточный ход термодинамической температуры рассчитывается в соответствии с моделью, описанной во второй главе работы, и графически представляется в виде кривой, положение максимума которой зависит от физических характеристик выбранной поверхности. В данные формулы входит величина температуры поверхности в момент восхода Солнца, значение которой в большинстве случаев неизвестно. В предложенной методике эта величина рассчитывается исходя из значений температуры поверхности в момент съемки и времени восхода Солнца с помощью решения интегрального уравнения.

Таким образом, параметры дневного хода термодинамической температуры выбранного объекта можно рассчитать в 4 этапа:

1. вычисление термодинамической температуры в данном пикселе на основании яркостной температуры, полученной со снимка, и излучательной способности объекта;
2. расчет температуры поверхности в момент восхода Солнца;

3. построение графика суточного хода температуры или вычисление термодинамической температуры в заданный момент времени;
4. переход от термодинамической температуры к яркостной и составление прогнозируемого изображения, что подразумевает собой вычисление яркостной температуры каждого пикселя исходного изображения в заданный момент времени.

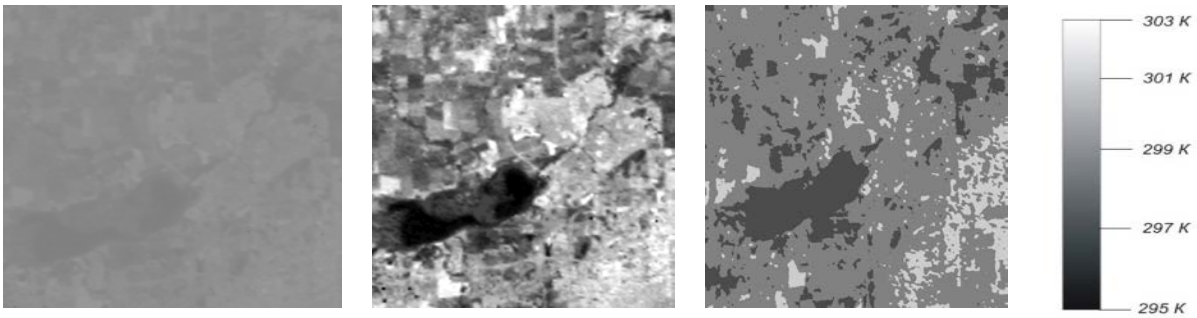
В результате такого подхода к обработке тепловых ИК-изображений проведено:

- усиление контрастов между соседними объектами с различными теплофизическими параметрами;
- выбор наиболее оптимального времени съемки;
- моделирование тепловых полей ландшафтов на основе снимков в оптическом диапазоне и информации о физических и излучательных характеристик сред.

Четвертая глава «Экспериментальная проверка методик пространственного текстурно-спектрального анализа ландшафтных комплексов и динамической модели тепловых изображений на основе аэрокосмических наблюдений» посвящена экспериментальным исследованиям и применениям разработанных методик к обработке данных спутникового дистанционного зондирования.

4.1. Распределение поверхностной яркостной температуры

На первом этапе происходит расчет поверхностной яркостной температуры по полю снимка на базе стандартных формул. Изменяя градации полученной тепловой картины, можно проводить первичную классификацию холодных и теплых объектов на снимке (рис. 5).

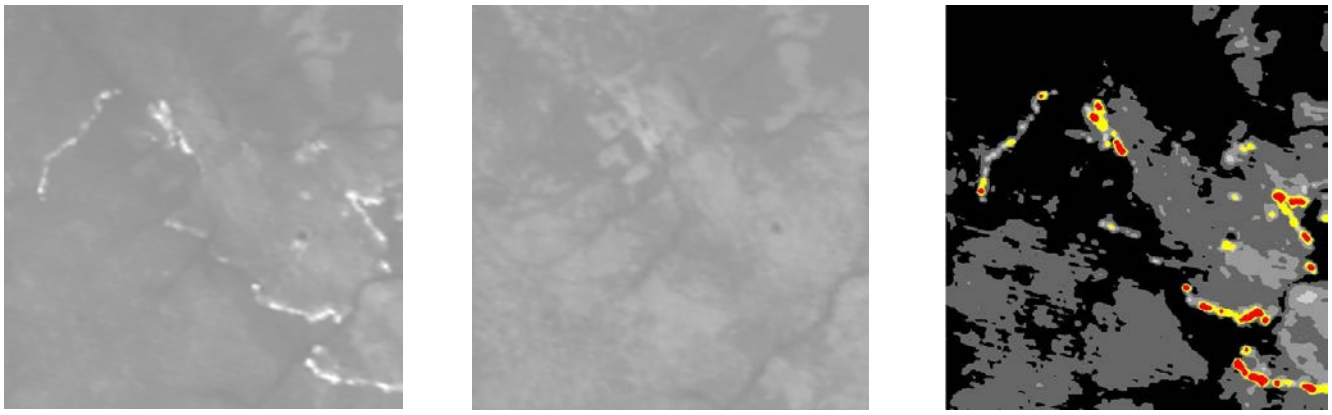


(а) *(б)* *(в)* *(г)*

Рис. 5. Исходное тепловое ИК-изображение - (а); тепловая картина - (б), (в); температурные градации - (г)

4.2. Выделение и анализ температурных аномалий на тепловых ИК-снимках

На рис. *6* показан фрагмент ИК-снимка с тепловой аномалией. В результате сравнения его согласно алгоритму (рис. *2*) со снимком, сделанным на 15 дней позже, выявляется динамичный характер аномалии, что соответствует пожарам. Далее, после обработки снимка выделяются очаги возгорания, области активного огня и выгоревшие территории.

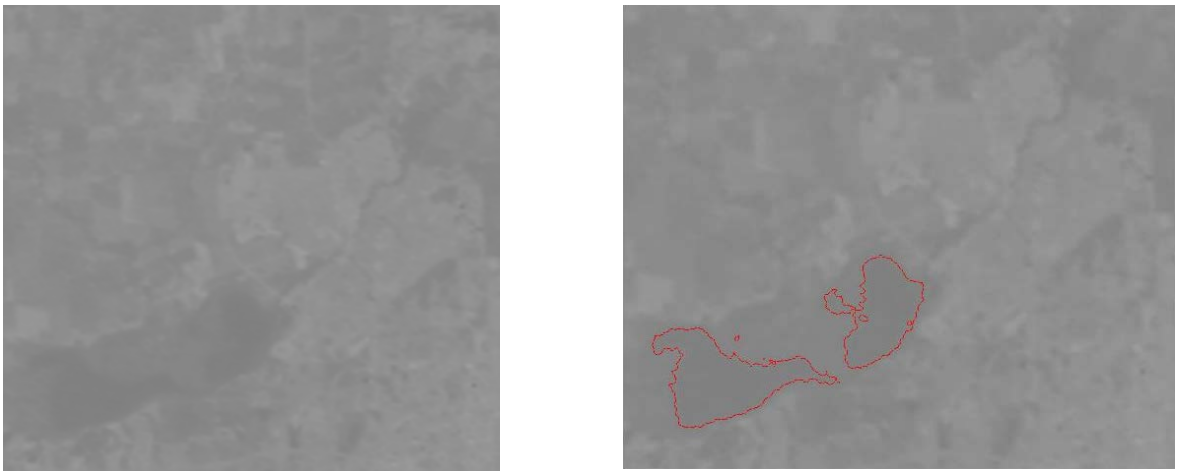


(а) *(б)* *(в)*

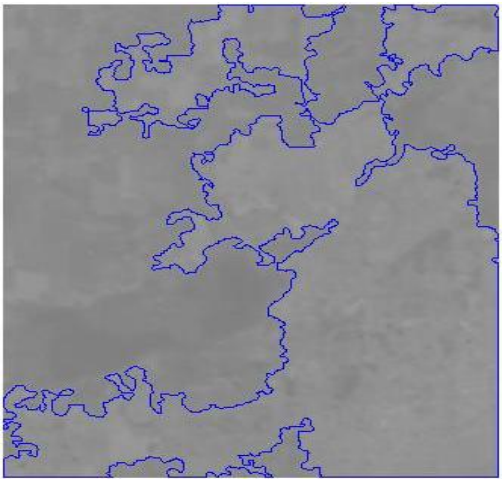
Рис. 6. Исходное тепловое изображение, полученное 26 июля 2010 года - (а) и 11 августа 2010 года - (б); тепловая картина области пожара - (в)

4.3. Фрактальная сегментация объектов по тепловым ИК-снимкам

Результаты сегментации теплового ИК-изображения с помощью фрактального анализа показаны на рис. *7а, 7б, 7в*. Для лучшей визуальной оценки на рис. 7*г* показан снимок в оптическом диапазоне на ту же территорию, по которому проводилась оценка точности результатов классификации.



(а) *(б)*



(в)

(г)

Рис. 7. Результаты фрактальной сегментации теплового ИК-снимка: (а) – исходное изображение, (б) – выделенный водный объект, (в) – выделенная область городской застройки, (г) – снимок в оптическом диапазоне

Оценка точности проводилась путем определения коэффициента правдоподобия, вычисляемого следующим образом:

$$k = \frac{2AB}{A+B}, \qquad (6)$$

где A – количество пикселей, автоматически классифицированных на основании тепловых изображений, B – пиксели, классифицированные путем ручного дешифрирования по оптическим снимкам, AB – объединение этих областей. Таким образом, для идеального случая ($A = B = AB$) коэффициент $k = 1$, в случае полностью ошибочной автоматической классификации ($AB = 0$) k = 0.

Таблица

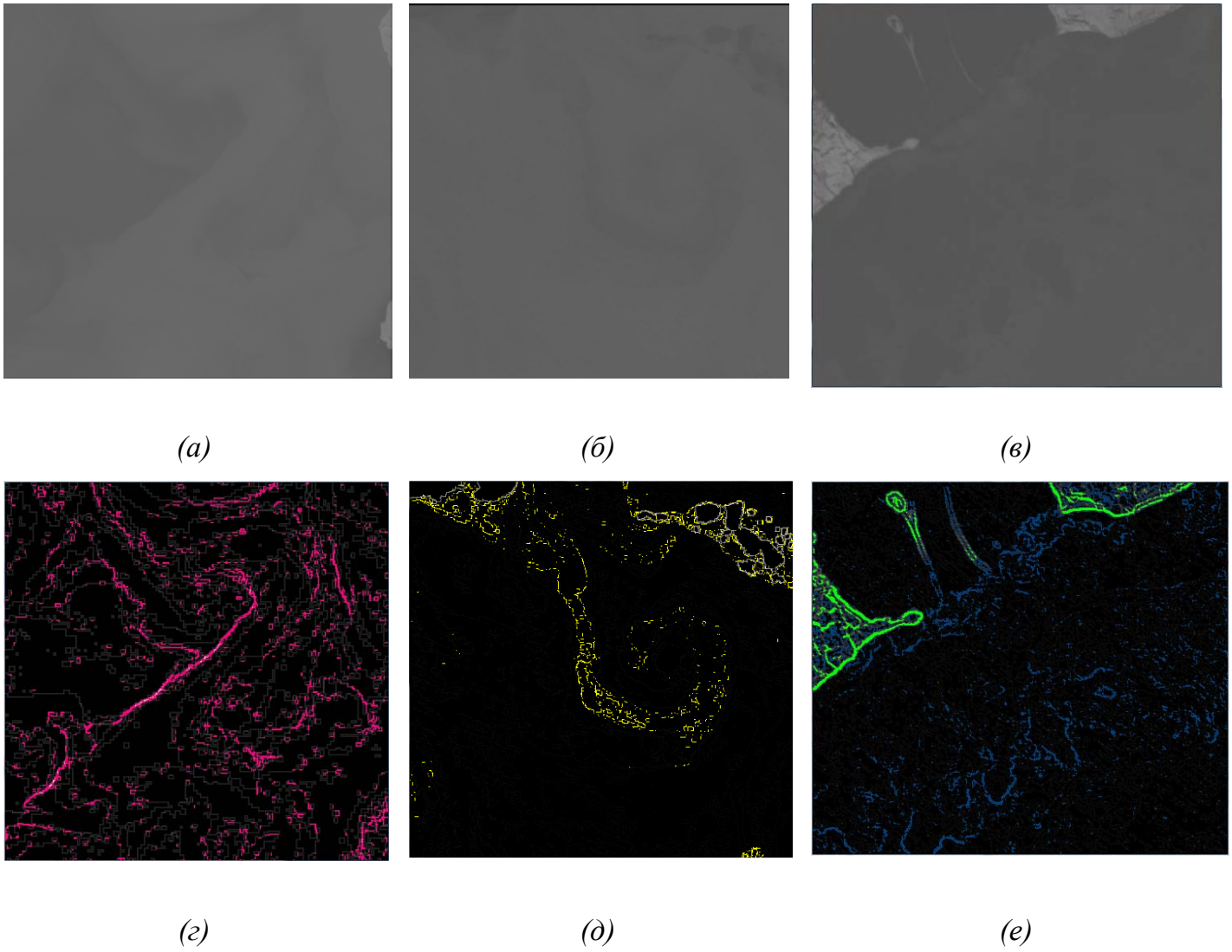
Оценка точности результатов фрактальной сегментации объектов по тепловому ИК-изображению

Классы	*k*
«водный объект»	0,88
«городская застройка»	0,72
«почвы»	0,75

4.4. Исследование выделенных объектов на основании их температурных характеристик

Мультифрактальный анализ водных объектов

Как показано на рисунках, значения точечных показателей Гельдера позволяют описать температурные неоднородности на поверхности воды (рис. *8а*, *8г*), выделить участки суши и льда (рис. *8е*).



(а) *(б)* *(в)*

(г) *(д)* *(е)*

Рис. 8. Исходные тепловые ИК-изображения водной поверхности - (а, б, в); результаты вычисления точеных показателей Гельдера – (г, д, е)

Наилучшие результаты применение мультифрактального анализа дает в случае присутствия вихревой структуры на поверхности воды (рис. *8б*, *8д*). В этом случае пиксели на снимке, находящиеся на границе вихря (отмечены желтым цветом), имеют близкое значение α (*x*,*y*) и

располагаются на одном пике графика (рис. *9*), показывающего распределение количества пикселей в зависимости от значений их α (*x*,*y*). Описанное свойство дает возможность автоматизировать процесс выделения вихревой структуры.

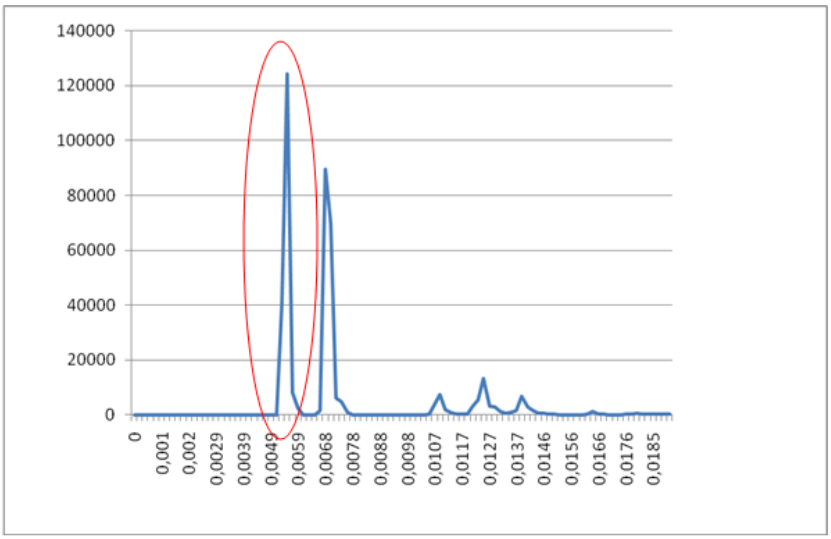
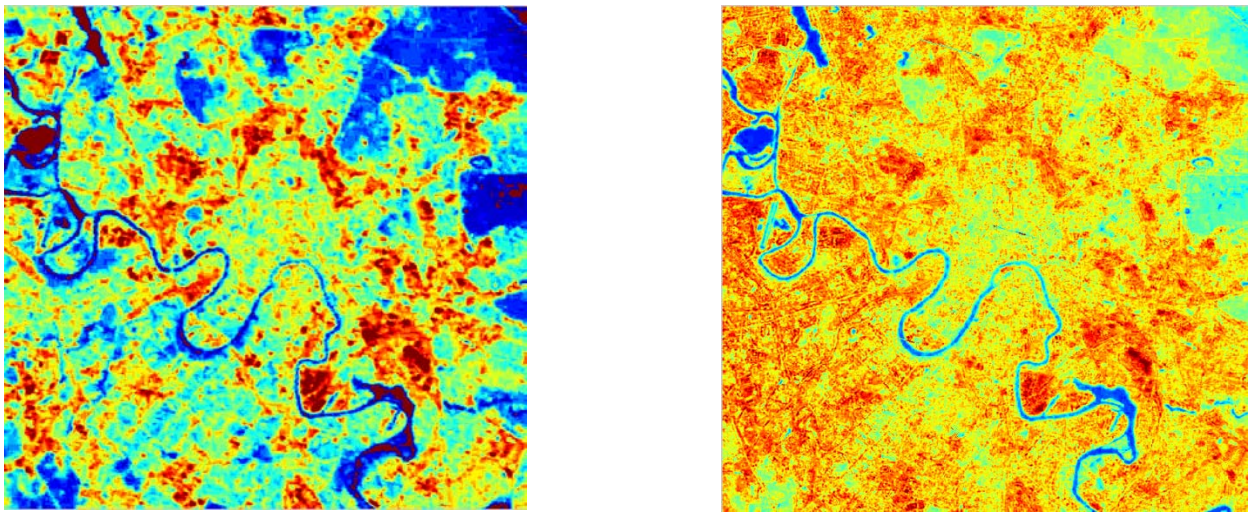


Рис. 9. Распределение количества пикселей в зависимости от значений α (x,y)

Исследование области городской застройки на основе распределения поверхностной яркостной температуры и значения индекса TVDI

Распределение поверхностной яркостной температуры и значений индекса TVDI для г. Москвы показано на рис. *10*.



(а) *(б)*

Рис. 10. Распределение ПЯТ области городской застройки – (а), распределение TVDI области городской застройки – (б)

Между изображениями существует сильная корреляция. Четко прослеживаются зоны повышенной температуры в области плотной застройки на юго-востоке и западе города. Анализ распределения поверхностной яркостной температуры в совокупности и индексом TVDI позволяет делать выводы о динамике развития города, экологической обстановке отдельных районов, а также планировать действия по ее улучшению.

4.5. Динамическая модель электронного изображения ландшафтов подстилающей поверхности

Суточный ход температур, вычисленный по алгоритму, описанному в разделе 5 третьей главы, показан на рис. *11*.

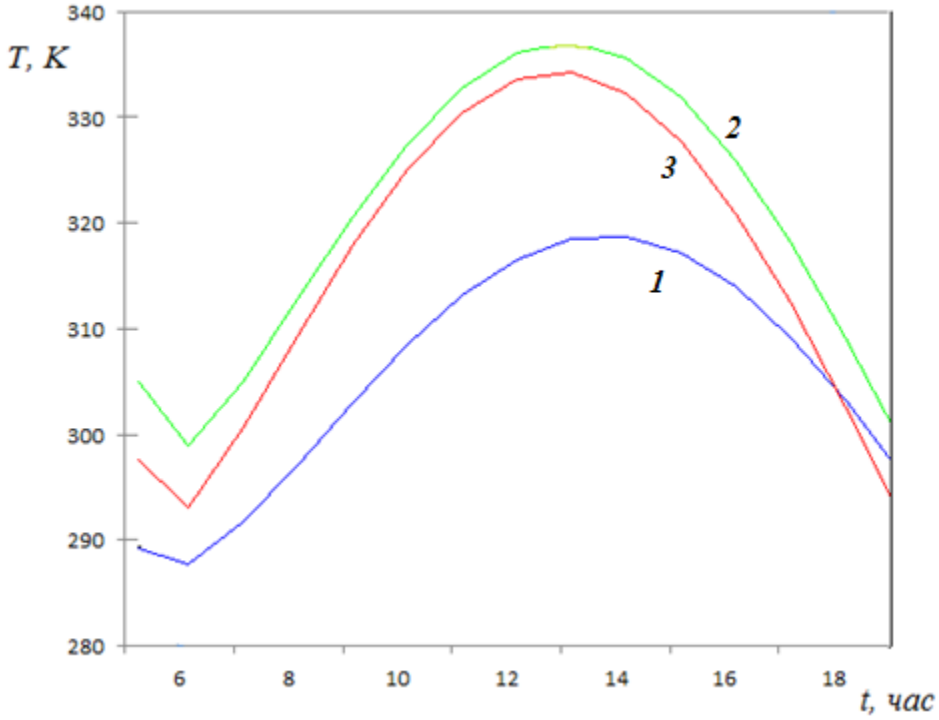


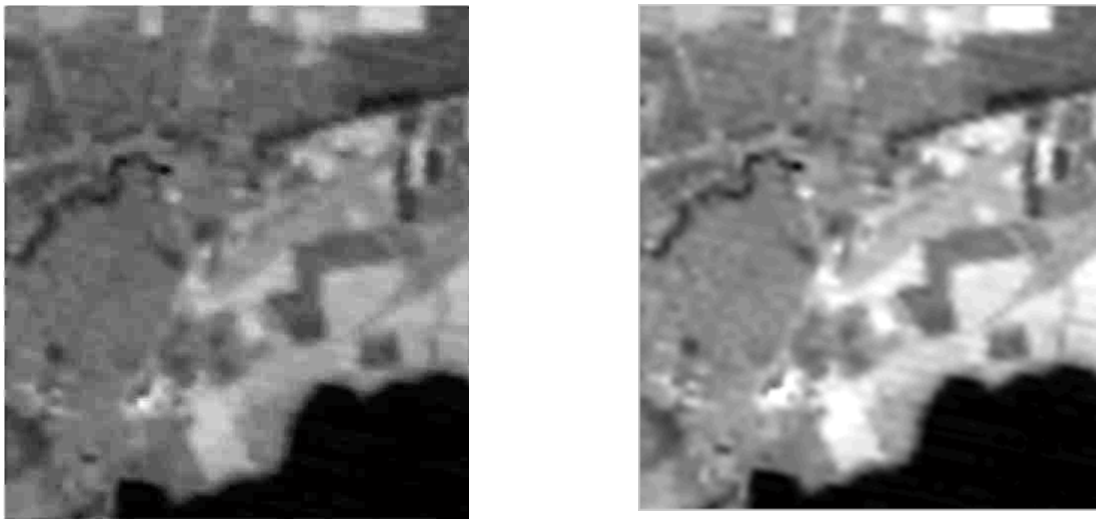
Рис. 11. Суточный ход термодинамической температуры для объектов:

1 - водный объект; 2 - почвы; 3 - городская застройка (приняты излучательные харатеристики кирпича)

Суточный температурный контраст, определенный по графику, характеризует амплитуду суточных вариаций теплового поля поверхности и позволяет выявлять неоднородности, связанные с особенностями тепловых свойств исследуемых объектов

Анализируя кривые суточного хода температур и исходя из полученных значений тепловых контрастов, можно прогнозировать наиболее оптимальное время для выполнения тепловой съемки. Как видно из графиков, сложно выбрать единый момент времени, когда тепловые контрасты между всеми исследуемыми объектами будут максимальны, поэтому планировать время тепловой съемки следует для заранее выбранных поверхностей.

На рис. *12* показан исходный тепловой ИК-снимок, сделанный в 8 часов утра, и прогнозируемая на 13 часов дня тепловая картина подстилающей поверхности при нулевой скорости ветра.



(а) *(б)*

Рис. 12. Исходный тепловой ИК-снимок, 8 часов – (а);
прогнозируемая тепловая картина, 13 часов – (б)

В **Заключении** сформулированы выводы по результатам проделанной работы:

1. Разработана методика пространственного текстурно-спектрального анализа тепловых полей излучения ландшафтных комплексов на основе аэрокосмических наблюдений.
2. Предложена методика мультифрактального анализа для обработки слабоконтрастных тепловых неоднородностей
3. Разработана методика создания динамической модели электронного изображения ландшафтов подстилающей поверхности на основе исходного снимка в тепловом или оптическом диапазоне и теплофизических параметров объектов подстилающей поверхности.

4. Предложенные методики реализованы с использованием языка программирования MATLAB и дополнительного пакета программ.
5. Проведена обработка данных дистанционного зондирования в тепловом ИК-диапазоне на основе разработанных методик.
6. Предложенные методики рекомендованы к использованию на практике для задач исследования природных ресурсов и экологического мониторинга с целью получения дополнительной информации о температурных характеристиках объектов подстилающей поверхности.

Список публикаций, в которых представлены основные положения диссертации:

1. Престон Н.Е. «Особенности пространственного распределения радиационной температуры различных видов ландшафтов на тепловых ИК снимках» // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – Выпуск № 5. – 2012 г. – С. 63 - 66 (перечень ВАК)
2. Ильин Ю.А., Чуфарова Н.Е. «Комплексный анализ тепловых ИК изображений земной поверхности» // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – Выпуск № 2. – 2011 г. – С. 37 – 40 (перечень ВАК)
3. Чуфарова Н.Е. «Фрактальный анализ районов городской застройки на снимках в тепловом ик диапазоне» // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – Выпуск № 1. – 2012 г. – С. 62 – 67 (перечень ВАК)