

На правах рукописи

Учаев Денис Валентинович

**Разработка теоретических основ и геоинформационных приложений
мультифрактальных методов анализа пространственной структуры
сложных природных систем**

Специальность 25.00.35 — Геоинформатика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2009

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Малинников Василий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Нейман Юрий Михайлович
доктор технических наук,
профессор Захаров Валерий Николаевич

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

Защита диссертации состоится «28» «декабря» 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д. 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок, 4. (Зал заседаний Ученого Совета)

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

Автореферат разослан «23» «ноября» 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ю.М. Климков

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время широкий круг актуальных проблем географии, картографии, геоморфологии и других наук о Земле связан с анализом по данным дистанционного зондирования Земли пространственной структуры сложных природных систем. Используемые при этом методы, в большинстве своем, базируются на приближенном представлении структур геометрическими объектами с целыми размерностями (точками, линиями, поверхностями). Основным недостатком такого рода методов является то, что они характеризуют структуру на одном либо нескольких масштабных уровнях, не позволяя получить масштабно-инвариантного описания природных структур. Таким образом, все эти методы не учитывают одного из важнейших качеств систем – целостности, выражающейся в принципиальной несводимости свойств системы к сумме свойств составляющих ее элементов и невыводимости из последних свойств системы.

Преодолеть указанные трудности позволяет фрактальный подход, уже нашедший применение при описании пространственной структуры таких сложных природных систем, как ландшафты речных долин, лесные экосистемы, горные ландшафты. Количественное описание пространственной структуры природных систем с использованием фрактального подхода позволяет выделять иерархические уровни структурной организации природных систем, строить модели, воспроизводящие иерархическую структуру пространственной организации природных систем, а также формулировать гипотезы о возможных механизмах их генезиса.

Однако, несмотря на достигнутые успехи, связанные с использованием фрактального подхода для количественного описания природных структур, многочисленные исследования продемонстрировали явную ограниченность такого подхода. Причина этого кроется в том, что природные структуры являются сложными стохастическими образованиями, самоподобными в среднем только в определенном диапазоне масштабов. Как следствие, количественная параметризация на основе одной лишь величины фрактальной

размерности не способна отразить такие свойства природных структур как неоднородность, пространственная упорядоченность, периодичность, организованность. Широкие возможности в этом отношении предоставляет мультифрактальный подход, предполагающий переход от исследования масштабно-инвариантных свойств объектов к изучению особенностей тем или иным образом сформированной по изображениям структур меры, отражающей пространственное распределение физических, геометрических, химических и других свойств объектов. Мультифрактальный подход дает возможность ставить в соответствии изучаемой структуре не одну, а целый спектр фрактальных размерностей, число которых в общем случае может быть бесконечным и, тем самым, позволяет количественно оценить трудно поддающиеся количественному описанию структурные характеристики сложных природных систем.

С учетом всего вышесказанного, весьма актуальной представляется разработка теоретических основ мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем по их аэрокосмическим изображениям, а также разработка новых геоинформационных приложений теории мультифракталов, направленных на решение широкого спектра задач географии, геологии и других наук о Земле.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ и геоинформационных приложений мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Обосновать возможность использования мультифрактального подхода для исследования пространственной структуры сложных природных систем по их аэрокосмическим изображениям.
2. Выполнить сравнительный анализ современных методов фрактального и мультифрактального анализа изображений сложных природных структур.

3. Разработать математический аппарат и теоретические основы метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений.
4. Создать и протестировать программное обеспечение, реализующее существующие и разработанные методы мультифрактального анализа изображений.
5. Провести экспериментальную апробацию разработанного метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений.
6. Разработать геоинформационные приложения мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем.

Объект и предмет исследования. Объектом диссертационного исследования является пространственная структура сложных природных систем. Предметом диссертационных исследований являются теоретические основы и геоинформационные приложения мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые показано, что посредством мультифрактального анализа изображений могут быть получены локальные и глобальные мультифрактальные параметры, связанные преобразованием Лежандра.
2. Разработан математический аппарат и теоретические основы нового метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений, позволяющего проводить полномасштабный мультифрактальный анализ аэрокосмических снимков, получаемых в результате дистанционного зондирования Земли, и получать информацию одновременно о локальных и глобальных мультифрактальных свойствах исследуемых природных структур.
3. Разработана методика мультифрактального анализа изображений взволнованной морской поверхности, позволяющая получать оценку

функции распределения квадратов модулей уклонов морской поверхности мультифрактальными методами.

4. Разработана методика оценки эффективности мероприятий по тушению лесных пожаров на основе фрактального анализа результатов обработки данных спутниковых наблюдений.
5. Разработана методика выделения контуров природных структур на аэрокосмических снимках посредством их мультифрактального анализа.

Практическое значение. Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в том, что разработанные в ней методики могут быть использованы при проведении научных и практических исследований по моделированию структуры сложных природных систем, при разработке систем идентификации и обнаружения изменений природных систем со сложной структурой по их аэрокосмическим изображениям, при подготовке специалистов в области аэрокосмических технологий.

Кроме того, разработанный в диссертации метод обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа позволяет уточнить и существенно дополнить сведения о пространственной структуре различных природных систем со сложной самоподобной структурой, способствует получению новых локальных и глобальных количественных характеристик исследуемых природных структур.

Методы исследования. Проведенные в диссертационной работе теоретические исследования основаны на методах теории вероятностей и математической статистики, вычислительной математики и теории фракталов. Для реализации алгоритма обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа цифровых изображений, а также основных этапов разработанных методик, автором было создано несколько программных модулей к пакету "Фрактал-ПК" в среде Microsoft Visual Studio 2008 для Windows 98/Vista.

Достоверность результатов подтверждается:

1. Корректным применением математических методов и вычислительных

средств теории вероятностей и математической статистики, вычислительной математики, цифровой обработки изображений, теории фракталов.

2. Апробацией разработанных метода и методик, а также удовлетворительным совпадением результатов с расчетами в аналитических и численных моделях, полученными другими авторами.
3. Тестированием разработанных программных модулей на модельных фрактальных агрегатах, сформированных в специальных компьютерных экспериментах.

На защиту выносятся следующие разработки и результаты:

1. Метод обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений.
2. Методика мультифрактального анализа изображений взволнованной морской поверхности.
3. Методика оценки эффективности мероприятий по тушению лесных пожаров на основе фрактального анализа результатов обработки данных спутниковых наблюдений.
4. Методика выделения контуров природных структур на аэрокосмических снимках посредством их мультифрактального анализа.
5. Результаты экспериментальной апробации разработанного метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений.
6. Результаты экспериментальной апробации разработанных методик анализа пространственной структуры сложных природных систем.
7. Алгоритм и программное обеспечение, реализующие разработанный метод обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений, а также основные этапы разработанных методик.

Апробация работы. Основные результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на научных заседаниях кафедры Прикладной экологии и химии МИИГАиК, на 67-ой (апрель, 2007), 68-ой (апрель, 2008) и

69-ой (апрель, 2009) научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, проводившихся в Московском государственном университете геодезии и картографии, на Пятом международном аэрокосмическом конгрессе (Москва, август, 2006), на Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр — XXI век», посвященной 230-летию основания МИИГАиК (Москва, май, 2009).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 199 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 42 рисунков. Список литературы состоит из 140 наименований, из них 90 на иностранных языках, 6 интернет-источников.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации.

Первая глава — «Теория фракталов и ее место в анализе и моделировании пространственной структуры сложных природных систем» носит, в основном, обзорный характер. В ней приведены общие сведения о фрактальном подходе к анализу пространственной структуры сложных природных систем, рассмотрены основные методы оценки фрактальной размерности природных структур по их изображениям, освещены достижения и проблемы фрактальной обработки изображений, получаемых в процессе дистанционного зондирования Земли. Обзор литературных источников позволил выявить теоретические предпосылки научной работы, обосновать цель и определиться с постановкой задач исследования.

Во второй главе — «Разработка теоретических основ метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений» изложены основы теории мультифрактального анализа изображений, который открывает гораздо более широкие возможности для количественного описания представленных на них природных структур, чем фрактальный анализ.

В первом пункте данной главы дано определение мультифракталов и изложены теоретические основы двух основных подходов к мультифрактальному анализу.

Мультифракталами принято называть множества, которые могут быть разбиты на бесконечное число сложно переплетенных фрактальных подмножеств, каждое из которых характеризуется своим значением фрактальной размерности. На математическом языке исследование мультифрактальных свойств множеств означает анализ мультифрактальных свойств тем или иным образом сформированной меры (математической, физической, химической и т.д.), определенной на заданном носителе. Мультифрактальная мера полностью определяется либо посредством спектра фрактальных размерностей $f(\alpha)$, либо с помощью спектра обобщенных размерностей Реньи D_q , введенного Хентшелем и Прокачча.

Существуют два основных подхода к мультифрактальному анализу: строгий, в соответствие с которым анализируется структура и размерности, составляющих ее фракталов, и грубый (нестрогий), в соответствие с которым анализируется распределение меры шаров достаточно малого радиуса, покрывающих анализируемую структуру. Нестрогий подход находит применение на практике при анализе структур по их цифровым изображениям, тогда как строгий подход более удобен для математического анализа меры.

Положим μ — мера, определенная на пространстве R^n и $0 < \mu(R^n) < \infty$. Рассмотрим множества F_α точек $\mathbf{x} \in R^n$, для которых мера μ замкнутых шаров $B_r(\mathbf{x})$ радиуса r с центром в точках \mathbf{x} ведет себя при малых значениях r как степенная функция $\mu(B_r(\mathbf{x})) \sim r^\alpha$

$$F_\alpha = \left\{ \mathbf{x} \in \text{supp } \mu \left| \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln \mu(B_r(\mathbf{x}))}{\ln r} = \alpha \right. \right\},$$

где $\text{supp } \mu$ — носитель меры μ , т.е. множество всех точек, все окрестности которых имеют положительную меру; α — локальная Гельдеровская экспонента.

В соответствии со строгим подходом к мультифрактальному анализу осуществляется непосредственный расчет Хаусдорфовой размерности подмножеств F_α , т.е.

$$f_H(\alpha) = \dim_H F_\alpha.$$

Спектр $f_H(\alpha)$ называют строгим мультифрактальным спектром меры, Хаусдорфовым мультифрактальным спектром, либо спектром сингулярностей мультифрактала.

В соответствии с нестрогим подходом, вместо Хаусдорфоваго рассчитывается так называемый грубый мультифрактальный спектр меры, оценивающий распределение значений Гельдеровских показателей.

Одним из наиболее часто используемых подходов для получения грубого мультифрактального спектра является подход, состоящий в определении так называемого спектра больших отклонений $f_G(\alpha)$. Для расчета мультифрактального спектра $f_G(\alpha)$ используется следующее соотношение

$$f_G(\alpha) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N_r(\alpha, \varepsilon)}{\ln(1/r)},$$

где $N_r(\alpha, \varepsilon)$ — наибольшее число непересекающихся шаров $B_r(x)$ радиуса r , таких, что $\alpha - \varepsilon \leq \frac{\ln \mu(B_r(x))}{\ln r} < \alpha + \varepsilon$.

Непосредственный расчет спектра больших отклонений, как правило, затруднителен. В связи с этим для оценки Хаусдорфоваго мультифрактального спектра, как правило, используется подход, в соответствии с которым носитель меры разбивается на непересекающиеся подмножества, строится функция разбиения $\Phi_\Delta(q, \tau)$ и посредством преобразования Лежандра скейлинговой функции моментов $\tau(q)$, характеризующей поведении функции $\Phi_\Delta(q, \tau)$, рассчитывается мультифрактальный спектр $f_L(\alpha)$ ($f_H(\alpha) \leq f_G(\alpha) \leq f_L(\alpha)$).

В целом можно отметить, что мультифрактальный подход к анализу меры дает возможность количественно охарактеризовать как локальное, так и глобальное поведение меры. При этом локальное, возможно сингулярное, поведение меры описывается с помощью Гельдеровских показателей α . А

информацию о глобальных флуктуациях меры предоставляет мультифрактальный спектр $f(\alpha)$.

Во втором пункте главы перечислены преимущества использования мультифрактального подхода при анализе структур по их цифровым изображениям и представлен сравнительный анализ наиболее распространенных методов мультифрактального анализа цифровых изображений. В результате проведенного анализа был сделан вывод, что все существующие методы обладают рядом существенных недостатков.

В частности, в методах расчета спектров больших отклонений спектры $f_G(\alpha)$ в силу особенностей расчета, как правило, не являются гладкими и, следовательно, в большинстве случаев не могут быть использованы для восстановления остальных мультифрактальных спектров ($\tau(q)$ и $D(q)$), также широко используемых на практике для количественного описания структур по их цифровым изображениям.

В свою очередь методы расчета Лежандровских мультифрактальных спектров не позволяют получать локальные мультифрактальные спектры. Кроме того, эти методы требуют построения оптимального покрытия изображения, при котором, число ячеек, участвующих в разбиении, минимально, что не всегда является простой задачей. Более того, методы расчета Лежандровских спектров не позволяют получать устойчивые оценки мультифрактальных параметров для отрицательных значений параметра q , что связано, прежде всего, с тем, что при отрицательных q появляются ячейки с неестественно малой мерой, которые дают неестественно большой вклад в статистическую сумму и, в итоге, приводят к получению так называемых инвертированных мультифрактальных спектров, как правило, не поддающихся физической интерпретации.

Заключительная часть главы посвящена разработке принципиально нового метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа цифровых изображений. Изложим кратко основную идею предлагаемого метода.

Положим K — цифровое изображение исследуемой структуры (носитель меры) размера $N_x \times N_y$ и μ — вероятностная мера, определенная на носителе K , т.е. $\mu(K) = 1$. Разобьем носитель K на N непересекающихся ячеек Δ_i как можно меньшего размера $\varepsilon(\Delta_i)$. Тогда функция разбиения $\Phi_\Delta(q, \tau)$ сходится к некоторому постоянному значению c , т.е.

$$\Phi_\Delta(q, \tau) = \sum_{i=1}^N [\mu(\Delta_i)]^q [\varepsilon(\Delta_i)]^{-\tau} = c. \quad (1)$$

Мера μ является мультифрактальной, если при $\varepsilon \rightarrow 0$ для всякой последовательности ячеек Δ_i , содержащих точку (x, y) изображения, выполняется соотношение

$$\mu(\Delta_i) \approx \varepsilon(\Delta_i)^{\alpha(x, y)}, \quad (2)$$

где $\mu(\Delta_i)$ — мера ячеек, к которой принадлежит точка (x, y) изображения; $\alpha(x, y) \in R^+$ — значение Гельдеровской экспоненты в точке (x, y) .

Равноячеечный подход. Положим, что носитель меры разбит на ячейки равного размера, т.е. $\varepsilon(\Delta_i) = \varepsilon = const$. Тогда величина $\varepsilon^{-\tau}$, как постоянный множитель, может быть вынесена за знак суммы в соотношении (1). Таким образом, соотношение (1) принимает следующий вид:

$$\Phi_\Delta(q, \tau) = \varepsilon^{-\tau} \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} [\mu(\Delta_i)]^q = c, \quad (3)$$

где $N(\varepsilon)$ — число ячеек размера ε , необходимых для покрытия носителя меры.

Подставляя в уравнение (3) выражение (2) для расчета меры ячеек и разрешая его относительно τ , приходим к выражению для оценки спектра $\tau(q)$

$$\tau(q) = \frac{\ln \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \varepsilon^{\alpha(x, y)q}}{\ln \varepsilon} - \frac{\ln c}{\ln \varepsilon},$$

в котором константа c определяется из условия $\tau(1) = 0$.

Равномассовый подход. Положим теперь, что Δ такое разбиение, что $\mu(\Delta_i) = \mu = const$. Тогда множитель μ^q может быть вынесен за знак суммы в соотношении (1), которое в этом случае принимает следующий вид:

$$\Phi_{\Delta}(q, \tau) = \mu^q \sum_{i=1}^{N(\mu)} [\varepsilon(\Delta_i)]^{-\tau} = c, \quad (4)$$

где $N(\mu)$ — число ячеек с массой μ , необходимых для покрытия носителя меры.

Выразив из соотношения (2) размер покрывающих элементов, подставив полученное выражение в уравнение (4) и разрешая его относительно q , приходим к выражению для оценки спектра $q(\tau)$

$$q(\tau) = -\frac{\ln \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \mu^{\frac{\tau}{\alpha(x,y)}}}{\ln \mu} + \frac{\ln c}{\ln \mu},$$

в котором константа c определяется из условия $q(0) = 1$.

Формулы расчета основных локальных и глобальных мультифрактальных характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1

Формулы расчета локальных и глобальных мультифрактальных характеристик

Глобальные мультифрактальные характеристики	
Спектр скейлинговых показателей $\tau(q)$	$\tau(q) = \frac{\ln \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \varepsilon^{\alpha(x,y)q}}{\ln \varepsilon} - \frac{\ln \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \varepsilon^{\alpha(x,y)}}{\ln \varepsilon} \quad \text{или}$ $\tau(q) = q^{-1}(\tau) = -\frac{\ln \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \mu^{\frac{\tau}{\alpha(x,y)}}}{\ln \mu} + \frac{\ln [N_x N_y - N_0]}{\ln \mu}, \text{ где}$ $N_0 \text{ — количество точек с } \alpha(x, y) = 0$
$\alpha(q)$	$\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq}$
Спектр размерностей Реньи $D(q)$	$D(q) = \frac{\tau(q)}{q-1}$
Спектр фрактальных размерностей $f_L(\alpha)$	$f_L(\alpha) = \inf_{q \in R} (\alpha q - \tau(q))$
Локальные мультифрактальные характеристики	
Спектр Гельдеровских показателей $\alpha(x, y)$	$\alpha(x, y) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln [\mu(B_{\varepsilon}(x, y))]}{\ln \varepsilon}, \text{ где}$ $B_{\varepsilon}(x, y) \text{ — ячейки размера } \varepsilon, \text{ надстроенные над точкой } (x, y)$
Спектр локальных фрактальных размерностей $f_L[\alpha(x, y)]$	$f_L[\alpha(x, y)] = \inf_{q \in R} (\alpha(x, y)q - \tau(q))$

Процедура расчета значений локальных и глобальных мультифрактальных характеристик может включать в себя следующие этапы:

- 1) Формирование меры ячеек, надстраиваемых над каждым элементом цифрового изображения;
- 2) Расчет для каждой точки изображения значений Гельдеровских показателей $\alpha(x, y)$, характеризующих локальное поведение меры;
- 3) Расчет значений одномерных мультифрактальных спектров, $\tau(q)$, $D(q)$ и $f_L(\alpha)$, характеризующих глобальное поведение меры;
- 4) Расчет значений локального спектра фрактальных размерностей $f_L[\alpha(x, y)]$, демонстрирующего к какому из фрактальных подмножеств принадлежит каждый элемент изображения.

Разработанный метод мультифрактального анализа, соединяя в себе преимущества методов получения Лежандровских спектров и спектров больших отклонений, позволяет получать связанные преобразованием Лежандра локальные и глобальные мультифрактальные характеристики.

Предложенный метод обладает целым рядом преимуществ по отношению к существующим методам расчета мультифрактальных спектров. Во-первых, предлагаемый метод в отличие от методов расчета Лежандровских спектров не требует реализации сложной процедуры поиска оптимального покрытия изображения, существенным образом влияющей на оценки мультифрактальных характеристик. Кроме того, в отличие от методов получения спектров больших отклонений, спектры, получаемые в данном методе, гладкие и, следовательно, могут быть использованы для восстановления мультифрактальных спектров $\tau(q)$ и $D(q)$. Существенным достоинством данного метода является и то, что он в силу специфики расчета мультифрактальных спектров исключает получение так называемых инвертированных мультифрактальных спектров.

Третья глава — «Разработка геоинформационных приложений мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем». Под разработкой геоинформационных приложений мультифрактальных методов анализа понимается разработка

методик решения с использованием мультифрактального подхода конкретных геоинформационных задач.

Методика мультифрактального анализа изображений взволнованной морской поверхности. Функция $f(\alpha)$, полученная в ходе мультифрактального анализа изображения взволнованной морской поверхности, играет важную роль в физике моря. С одной стороны, она представляет спектр фрактальных размерностей мультифрактала, каковым является взволнованная морская поверхность. А с другой, представляет статистику значений уклонов взволнованной морской поверхности в неупорядоченной системе. Действительно, примем для простоты размер ячейки покрытия $\varepsilon=1$. Тогда вероятность нахождения частицы в ячейки с номером i определяется формулой $p_i \sim (1/L)^{\alpha_i}$, где L — размер образца в единицах ε . В случае использования дисперсионного метода расчета фрактальной меры, вероятности p_i можно рассматривать как значения квадрата модуля уклона морской поверхности $|\psi(\mathbf{r}_i)|^2$ в некоторой точке \mathbf{r}_i . Пользуясь тем, что распределение значений α определяется формулой $n(\alpha) \sim \exp[f(\alpha)\ln L]$, учитывая, что $\alpha = -\ln p / \ln L$, и принимая во внимание, что вблизи своего максимума функция $f(\alpha)$ может быть аппроксимирована параболой, определяемой параметрами α_0 и $D = f(\alpha_0)$, получаем, что функция плотности распределения вероятностей p_i имеет логнормальный вид, т.е. $\tilde{N}(p) \sim \exp[-\ln L(\ln p / \ln L + \alpha_0)^2]$. Поскольку вероятности p_i характеризуют величину $|\psi(\mathbf{r}_i)|^2$ получаем, что квадрат модуля уклона также распределен логнормально по отображаемому на изображении участку морской поверхности. Полученные результаты с одной стороны подтверждают мультифрактальность взволнованной морской поверхности, а с другой, позволяют предложить новый мультифрактальный метод оценки плотности распределения значений квадрата модуля уклона морской поверхности.

Данная методика включает в себя следующие три вычислительных этапа:

1. Предварительная обработка аэрокосмических снимков.

2. Выделение на снимках участков с характерным типом волнений.
3. Мультифрактальный анализ выделенного фрагмента изображения.
4. Структурно-статистическое описание фрагментов изображений взволнованной морской поверхности при помощи полученных мультифрактальных характеристик.

Методика оценки эффективности мероприятий по тушению лесных пожаров на основе анализа результатов обработки данных спутниковых наблюдений. Основу предлагаемой методики оценки эффективности проведенных мероприятий по тушению лесных пожаров составляют сведения о площадях, пройденных огнем, содержащиеся в базе данных Информационной Системы Дистанционного Мониторинга лесных пожаров (ИСДМ «Рослесхоз»).

В основу методики положены следующие положения:

- При беспрепятственном распространении пожара имеет место линейная зависимость площади, пройденной огнем, от времени в логарифмических осях. При этом угол наклона регрессионной прямой может значительно превосходить значение фрактальной размерности $D_{\text{мод}}$ перколирующего кластера лесного пожара и, как правило, не опускается ниже некоторого критического значения $D_{\text{кр}}$.
- При эффективном вмешательстве человека в процесс распространения пожара линейная зависимость между площадью, пройденной огнем, и временем в логарифмических осях сохраняется, однако угол наклона регрессионной прямой не превосходит $D_{\text{мод}}$. В данной методике эффективным считается систематическое вмешательство человека на всех этапах развития пожара, при котором принятых мер по тушению оказывается достаточно, чтобы минимизировать скорость вовлечения новых территорий в пожар.

В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что величину $D_{\text{кр}}$ можно принять равной 1,8. В свою очередь, зависимость площади, пройденной огнем, от времени в логарифмических осях можно считать линейной, если значения коэффициента корреляции R , лежат в диапазоне от

0,85 до 1. На основе всего вышесказанного можно заключить, что в совокупности величины R и D могут использоваться для оценки эффективности проведенных мероприятий по тушению лесных пожаров (см. табл. 2).

Таблица 2

Оценка эффективности принятых мер по тушению лесных пожаров

Общая оценка принятых мер	R	D	Пояснение
Эффективные	0,85 – 1	< 0,8	Эффективное вмешательство человека в процесс тушения пожара и/или самозатухание пожара в течение всего времени существования пожара
Малозэффективные	0 – 0,85	< 0,8	Малозэффективное вмешательство человека либо вмешательство человека, сопровождающееся и/или чередующееся с процессами самовозгорания и самозатухания пожара
	0 – 1	0,8 – 1,8	
	0 – 0,85	> 1,8	
Неэффективные	0,85 – 1	> 1,8	Невмешательство либо крайне неэффективное вмешательство человека в процесс тушения пожара

Таким образом, методика оценки эффективности принятых мер по тушению лесных пожаров будет включать в себя следующие этапы:

1. Построение в логарифмических осях зависимости значений площади, пройденной огнем, приведенных в форме 3-ИСДМ, от числа дней с момента начала наблюдения за пожаром.

2. Расчет значений коэффициента корреляции R , отражающего степень близости полученной зависимости к линейной, и угла наклона регрессионной прямой D , аппроксимирующей данную зависимость.

3. Соотнесение рассчитанных значений R и D с одной из оценок в табл. 2, характеризующих эффективность принятых мер по тушению.

4. Детальный анализ непосредственно самой зависимости с целью поиска и учета всех факторов (климатические условия, рельеф местности и т.д.), которыми осложнена динамика пожара.

Методика выделения контуров природных структур на аэрокосмических снимках. Функция $f[\alpha(x, y)]$, полученная в результате анализа аэрокосмических снимков, может быть использована для выделения контурных объектов. Сущность предлагаемой методики выделения контуров состоит в мультифрактальной обработке исходного снимка и последующей бинаризации

полученного в результате мультифрактального анализа изображения локальных фрактальных размерностей.

Таким образом, предлагаемая методика выделения контуров объектов на аэрокосмических снимках состоит из четырех вычислительных этапов:

1. Предварительная обработка аэрокосмических снимков.
2. Расчет значений Гельдеровских показателей $\alpha(x, y)$.
3. Расчет двумерного мультифрактального спектра $f[\alpha(x, y)]$.
4. Пороговая обработка изображения локальных фрактальных размерностей $f[\alpha(x, y)]$ с целью получения контурного изображения.

Четвертая глава — «Программная реализация и экспериментальная апробация разработанного метода мультифрактального анализа изображений и методик решения ряда геоинформационных задач посредством мультифрактальной обработки аэрокосмических изображений». Для апробации и тестирования разработанного метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа цифровых изображений были обработаны изображения самоподобных мер, сгенерированные посредством случайного итерационного алгоритма (рис. 1).

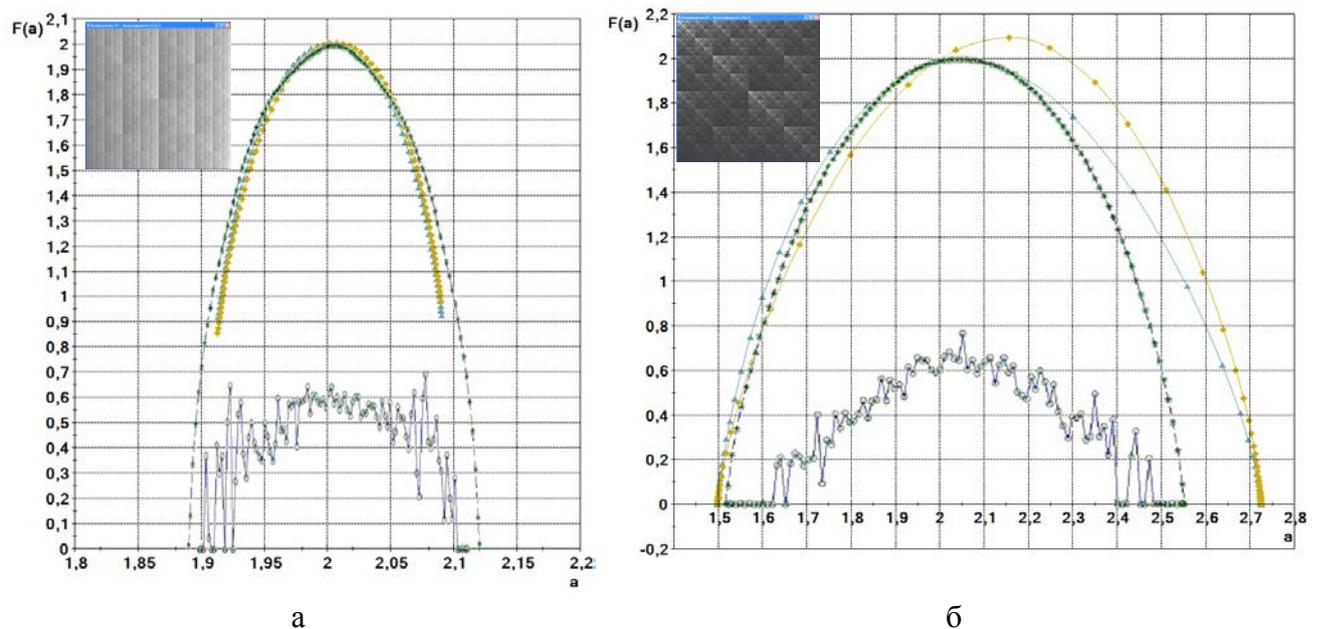


Рис. 1. Эталонные изображения самоподобных мер и рассчитанные для них мультифрактальные спектры $f_L(\alpha)$, полученные разработанными равноячеечным (\blacktriangle), равномассовым (\blacklozenge) методами, $f_H(\alpha)$ (\blackstar) и $f_G(\alpha)$ (\bullet)

С целью сравнения полученных мультифрактальных спектров $f_L(\alpha)$ с теоретическими спектрами $f_H(\alpha)$ и спектрами больших отклонений $f_G(\alpha)$, для которых спектры $f_L(\alpha)$ являются огибающими, для каждого исследуемого изображения в одной системе координат были построены все три спектра. Как видно из рис. 1, обнаруживается высокая степень соответствия (95%) между спектрами, полученными предложенным методом, и теоретическими спектрами для большинства значений α (в частности, левые ветви спектров, соответствующие положительным значениям параметра q , в обоих случаях практически целиком накладываются друг на друга).

Экспериментальная апробация методики мультифрактального анализа изображений взволнованной морской поверхности. Для исследования возможности использования мультифрактального подхода при изучении структурной организации морских волн на аэрокосмических снимках был выполнен мультифрактальный анализ двух типов изображений морской поверхности (рис. 2).

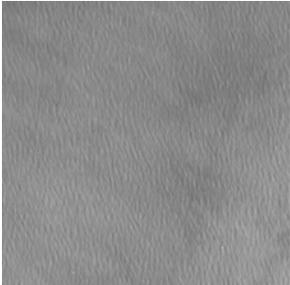
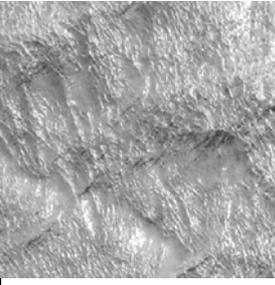
	D_0	2,0000	2,0000		D_0	2,0000	2,0000
	D_1	1,9997	1,9989		D_1	1,9978	1,9914
	D_2	1,9994	1,9977		D_2	1,9957	1,9837
	Δ_{40}	0,0153	0,0699		Δ_{40}	0,0372	0,0822
	f_{40}	0,8770	0,1984		f_{40}	1,3520	1,0692
а			б				

Рис. 2. Цифровые изображения морских поверхностей с гравитационными волнами а) и бликами б) и их основные мультифрактальные характеристики при использовании традиционной меры (первый столбец) и дисперсионной меры (второй столбец).

Для наиболее полного описания пространственной организации элементов изображения с различными уровнями яркости по полученным спектрам $f(\alpha)$ и их параболической аппроксимации были построены кривые распределения для каждого из изображений (рис. 3). При сравнении графиков распределений для изображения с бликами (рис. 2б) видно, что все они

достаточно хорошо ложатся на нормированную гистограмму распределения уровней яркости на изображении. Это свидетельствует о том, что распределение элементов изображения по различным значениям оптической плотности имеет логнормальный вид. Распределение уровней яркости на изображении морской поверхности с гравитационными волнами (рис. 3а) только приближенно логнормальное, что проявляется в отклонении дисперсий экспериментальных кривых от теоретической дисперсии.

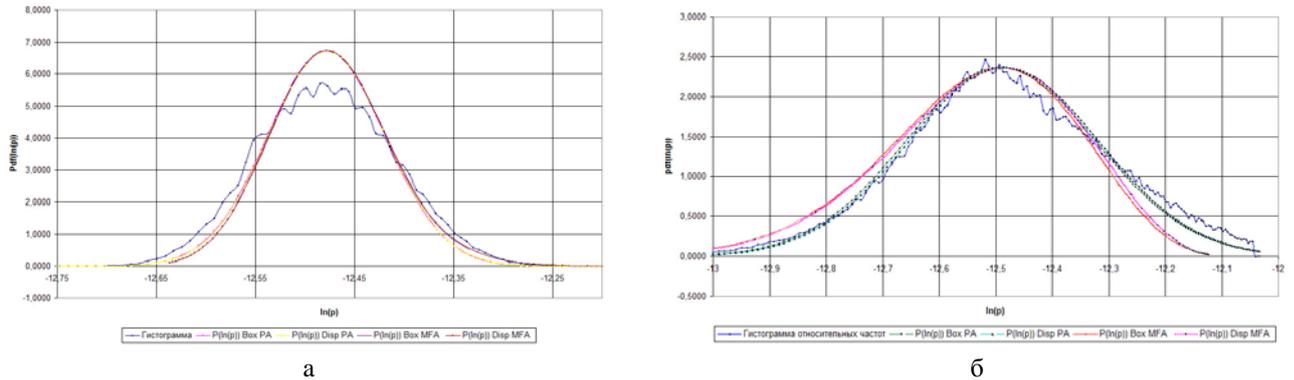


Рис. 3. Кривые распределения значений квадрата модуля уклона морских поверхностей на рисунках 2а и 2б, полученные с помощью спектра $f(\alpha)$ и его параболической аппроксимации

Экспериментальная апробация методики оценки эффективности проведенных мероприятий по тушению лесных пожаров. Тестирование методики проводилось на реальных лесных пожарах, для которых специалистами Института космических исследований РАН была дана экспертная оценка эффективности принятых мер по тушению. Для каждого пожара были построены зависимости пройденных огнем площадей от времени по данным космомониторинга и сделан вывод об эффективности всей совокупности проведенных мероприятий по тушению пожара (табл. 3). Из табл. 3 видно, что значения R и D , полученные по данным космомониторинга, дают возможность охарактеризовать проведенные мероприятия по тушению пожара. Полученные результаты хорошо согласуются с оценками, сделанными экспертами ИКИ РАН. Вместе с тем требуется дальнейшее исследование влияний различных факторов на получаемые оценки, а также тестирование методики на пожарах, имеющих различную динамику распространения.

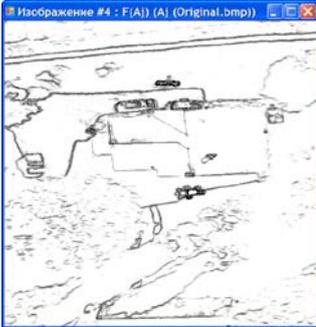
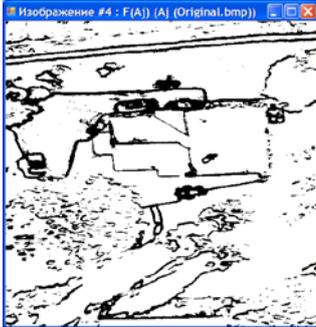
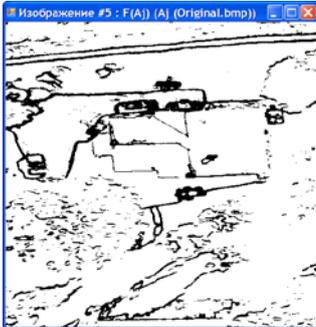
Оценка эффективности принятых мер по тушению пожаров
№ 3023, № 5481, № 5391, № 4932, № 3475 и № 1060

Номер пожара	R	D	Общая оценка принятых мер
№ 3023	0,8979	1,6244	малоэффективные
№ 5481	0,8278	1,8163	малоэффективные
№ 5391	0,8441	0,1676	малоэффективные
№ 4932	0,9228	0,4073	эффективные
№ 3475	0,9139	1,8173	неэффективные
№ 1060	0,6732	1,3111	малоэффективные

Экспериментальная апробация методики выделения контуров природных структур на аэрокосмических снимках. С целью экспериментального подтверждения возможности применения мультифрактального анализа для выделения контуров на аэрокосмических снимках были построены контурные изображения для нескольких снимков высокого разрешения, один из которых приведен во втором столбце табл. 4.

Таблица 4

Контурные изображения, полученные посредством мультифрактальной сегментации

	Исходное изображение	Полутонное изображение с контурами	Контурное изображение
метод гистограмм (μ_{iso})		 $f[\alpha(x,y)], \varepsilon = \{2, 4, 8, 16, 32, 64\}$	 $f[\alpha(x,y)] \in [0, 1, 6)$
локально-глобальный метод (μ_{iso})		 $f[\alpha(x,y)], q = \{-40, -39, \dots, 40\}$	 $f[\alpha(x,y)] \in [0, 1, 6)$

В результате апробации было обнаружено, что наиболее подходящими для выделения контуров являются емкости μ_{\min} , μ_{\max} и μ_{iso} . При этом каждая из перечисленных емкостей имеет свои преимущества, проявляющиеся при обработке аэрокосмических изображений различных ландшафтов.

Так, емкость μ_{\min} позволяет получить контурное изображение, в котором контура образованы элементами исходного изображения с более высокими значениями интенсивности по сравнению с интенсивностями пикселей в областях наиболее резкого изменения функции яркости. Данная емкость подходит для выделения контуров темных объектов на светлом фоне. Емкость μ_{\max} , напротив, позволяет получить контуры, ограничивающие площадные объекты «с более темной стороны», что оказывается полезным при выделении границ светлых площадных объектов на темном фоне. И наконец, емкость μ_{iso} , как бы дополняя емкости μ_{\min} и μ_{\max} , обладает большим распознавательным потенциалом при высоком уровне зашумленности исследуемого изображения.

В результате анализа полученных контурных изображений, было установлено, что на всех изображениях достаточно точно отображаются контуры крупных площадных и линейных объектов. Таким образом, проведенные исследования показывают, что методика мультифрактальной сегментации может с успехом использоваться для выделения контуров на аэрокосмических снимках высокого разрешения.

Заключение

Представленная диссертационная работа содержит исследования и разработки автора, которые можно рассматривать как решение актуальной научной задачи, посвященной разработке теоретических основ и геоинформационных приложений мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем.

Основными теоретическими и практическими результатами работы являются следующие:

1. Выполнен сравнительный анализ современных методов фрактального и мультифрактального анализа изображений природных структур. Составлены

таблицы основных методов фрактального и мультифрактального анализа изображений, полученных дистанционными методами.

2. Впервые показано, что посредством мультифрактального анализа изображений могут быть получены локальные и глобальные мультифрактальные параметры, связанные преобразованием Лежандра.
3. Разработаны математический аппарат и теоретические основы метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений.
4. Создано программное обеспечение, реализующее существующие и разработанные методы мультифрактального анализа изображений. Выполнена апробация разработанного метода и программы на модельных фрактальных множествах.
5. Разработаны приложения мультифрактальных методов анализа пространственной структуры сложных природных систем в форме методик, направленных на решение конкретных геоинформационных задач.
6. Проведена апробация разработанных методик, в ходе которой была продемонстрирована возможность применения мультифрактального подхода для анализа пространственной структуры сложных природных систем.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Учаев Д.В., Малинников В.А. Анализ методов формирования мультифрактальной меры, основанных на вейвлет-обработке экспериментальных данных // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2007. — № 6. — С. 57-61.
2. Учаев Д.В. и др. Применение мультифрактального анализа для обнаружения оползневых структур на аэрокосмических снимках // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2008. — № 6. — С. 12-18.
3. Учаев Д.В., Малинников В.А. Применение методики мультифрактальной сегментации изображений для выделения контуров на аэрокосмических снимках // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2008. — № 6. — С. 37-41.

4. Учаев Д.В. и др. Методика геоинформационного моделирования структуры древних поселений на основе фрактальных методов // Известия вузов. "Геодезия и аэрофотосъемка". — 2009. — № 3. — С. 76—79.
5. Учаев Д.В. и др. Мультифрактальная параметризация геопространственных структур // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. — М.: МИИГАиК, 2004. — С. 163-167.
6. Учаев Д.В., Малинников В.А., Учаев Дм.В. Методика получения канонических спектров при мультифрактальном анализе цифровых изображений // Обозрение прикладной и промышленной математики. — 2006. — Т. 13. — В. 3. — С. 516-517.
7. Учаев Д.В., Малинников В.А. Тематическая обработка аэрокосмических изображений методов мультифрактального анализа // Пятый международный аэрокосмический конгресс. Тезисы докладов — Юбилейный М.о.: Хоружевский А.И., 2006. — С. 236.
8. Учаев Д.В. и др. Разработка методики оценки эффективности мероприятий по тушению лесных пожаров на основе фрактального анализа результатов обработки данных спутниковых наблюдений // Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Геодезия, картография и кадастр — XXI век". — М.: МИИГАиК, 2009. — С. 106-107.
9. Учаев Д.В., Малинников В.А., Учаев Дм.В. Разработка фрактального подхода к исследованию пространственной структуры геосистем // Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Геодезия, картография и кадастр — XXI век". — М.: МИИГАиК, 2009. — С. 129-130.