

На правах рукописи

Учаев Дмитрий Валентинович

**Методика геоинформационного моделирования речных сетей на основе
фрактальных методов**

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2007

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Малинников В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Троицкий В.И.
доктор технических наук,
профессор Захаров В.Н.

Ведущая организация: институт космических исследований РАН

Защита диссертации состоится «25» «декабря» 2007 г. в 14.00 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 «__» «ноября» 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ю.М. Климков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важным объектом геоинформационного моделирования, как класса моделирования пространственно-временных данных, являются речные сети. В настоящее время адекватная параметризация речной сети в значительной степени обусловлена потребностью в развитии базовых представлений о пространственной структуре речных сетей. Применение степенных законов, связывающих основные геоморфологические характеристики речных систем, к описанию строения речных бассейнов за последние 50 лет было подробно изучено в рамках теории речных сетей Хортон-Страллера. Однако в середине 80-х годов XX века сформировался новый подход к анализу структуры речных сетей, объединяющий степенные законы и самоподобие в контексте теории фракталов. Этот подход обусловлен логикой развития современной естественнонаучной парадигмы. Действительно, речные сети представляют собой открытые сильно неравновесные системы, строение и эволюция которых определяются приходящим из окружающей среды потоком энергетических ресурсов. Потоки энергии и вещества, приходящие через открытые системы, обеспечивают возникновение в них эффектов самоорганизации – образование макроскопических диссипативных структур. Эти структуры обладают имманентной структурной универсальностью и демонстрируют в широком диапазоне параметров пространственно-временной скейлинг – свойство самоподобия, или масштабной инвариантности – один из фундаментальных видов симметрий физического мира, играющих формообразующую роль во Вселенной.

Совсем недавно было показано, что поведение речных сетей аналогично критическим явлениям в термодинамике. В связи с этим возникает новое актуальное направление исследований, связанное с геоинформационным моделированием универсальных классов речных сетей, характеризующихся своим набором критических показателей, отражающих особенности структуры, формирования и динамики развития речных сетей. С другой стороны актуальность темы связана с поиском единого подхода к моделированию

речных сетей фрактальными методами, который позволил бы широко использовать самоподобную природу речных сетей при решении задач геоинформатики, гидрологии, геоморфологии, картографии и др. наук. Вместе с тем, следует отметить, что существующие на сегодняшний день фрактальные модели не отражают мультискейлинговую природу реальных речных сетей. Тем не менее, мультифрактальность, проявляющаяся в пространственной структуре речных сетей, на сегодняшний день не заложена практически ни в одну из существующих геомоделей. Особый интерес представляет применение мультифрактальных моделей к оценке качества генерализации речных сетей на топографических картах.

Указанные обстоятельства позволяют считать тему диссертационной работы актуальной и важной для современной геоинформатики в той её части, которая связана с геоинформационным моделированием структуры и динамики развития речных сетей.

Цель диссертационной работы. Разработка методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов и применение модельных параметров при картографической генерализации гидрографических сетей.

Для достижения данной цели ставились и решались следующие задачи:

- обоснована возможность использования фрактальных методов при геоинформационном моделировании речных сетей;
- выполнено теоретическое обобщение и систематизация фрактальных закономерностей, описывающих строение и динамику развития речных сетей;
- выполнен сравнительный анализ фрактальных моделей речных сетей.
- сформулированы теоретические положения и разработан математический аппарат методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов;
- разработана мультифрактальная модель речной сети;

- разработано программное обеспечение для расчета мультифрактальных показателей речных сетей по их цифровым изображениям и морфометрическим характеристикам;
- проведена экспериментальная апробация разработанной методики геоинформационного моделирования речных сетей;
- обоснована возможность применения предложенной мультифрактальной модели при оценке качества картографической генерализации речных сетей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан математический аппарат и теоретические основы методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов.
2. Впервые построена мультифрактальная модель речной сети, позволяющая описывать строение речных сетей при помощи двух спектров характерного вида: спектра обобщенных фрактальных размерностей и спектра сингулярностей. Для различных моделей роста речной сети найдены границы скейлингового диапазона, при которых модельная динамика обладает скейлинговыми свойствами.
3. Предложена геоинформационная интерпретация параметров мультифрактального спектра. Показано, что индексы сингулярности, полученные при мультифрактальном анализе топологической структуры речной сети, характеризуют скорость убывания числа притоков у каждого потока в сети. Характерные значения фрактальной размерности D_0 , полученные из анализа топологической структуры речной сети, определяют скорость роста речной сети.
4. Показано, что структурная перестройка речной сети сопровождается изменением ее мультифрактальной структуры.
5. Разработан и реализован пакет мультифрактального анализа данных для использования, как в научно-исследовательских, так и в учебных целях. Реализованный пакет включает в себя серию алгоритмов и методик

разработанных для:

- получения канонических мультифрактальных спектров;
 - статистического анализа наклонов регрессионных зависимостей при оценке мультифрактальных спектров;
 - автоматизированного построения диаграмм и графиков для сравнения мультифрактальных спектров.
6. Впервые показано, что мультифрактальные показатели для речной сети могут быть использованы для количественной оценки качества генерализации речных сетей.

Практическая значимость результатов диссертационной работы связана с разработкой методики геоинформационного моделирования, обеспечивающей комплексный анализ пространственной структуры речных сетей. В диссертации решается задача теоретического обоснования и экспериментальной верификации гипотезы о мультифрактальности речных сетей. Предложена геоинформационная интерпретация мультифрактальных показателей. Развиваемый в диссертации мультифрактальный подход дает принципиально новую основу для решения актуальных прикладных задач геоморфологии, гидрологии и картографии.

Результаты диссертации используются в курсах «Методы решения обратных задач дистанционного зондирования Земли» и «Автоматизированная обработка аэрокосмических изображений».

Достоверность результатов подтверждается:

1. Корректным применением математических методов и вычислительных средств теории вероятностей и математической статистики, вычислительной математики, цифровой обработки изображений, теории фракталов и дискретной математики.
2. Научно-методическим обоснованием выбора характеристик фрактальных и мультифрактальных свойств пространственной структуры речных сетей.
3. Тестированием программ, а также удовлетворительным совпадением

результатов с расчетами в аналитических и численных моделях, полученными другими авторами.

На защиту выносятся следующие разработки и результаты:

1. Методика геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов.
2. Мультифрактальная модель речной сети.
3. Алгоритмы и программное обеспечение, реализующие предложенную методику геомоделирования.
4. Практическое использование разработанной мультифрактальной модели при оценке качества картографической генерализации речных сетей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных заседаниях кафедры Прикладной экологии МИИГАиК, на 60 (апрель, 2005), 61 (апрель, 2006), и 62 (апрель, 2007) научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, проводившихся в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК), на Международной конференции посвященной 225-летию МИИГАиК (Москва, май, 2004 г.), на X Межвузовском научно-практическом семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых Московского региона по актуальным проблемам экологии и природопользования, на 7-ом Международном научно-промышленном форуме «Великие реки» (Нижний Новгород, май, 2005 г.), на седьмом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (Кисловодск, май, 2006 г.), на XXIII Международной картографической конференции (Москва, август, 2007 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал работы изложен на 181 странице машинописного текста, содержит 11 таблиц, 54 рисунка, 6 приложений. Список литературы состоит из 178 наименований, из них 98 на иностранных языках, 6 интернет-источников.

СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна, практическая значимость.

В первой главе. «Теория фракталов и ее место в геоинформационном моделировании речных сетей» вводятся основные понятия об объекте исследования. В ней описываются основные элементы речных систем, дан краткий обзор классификаций долин (потоков) и их бассейнов, определяются основные характеристики речных сетей и бассейнов речных систем. Приводится сравнительный обзор скейлинговых зависимостей и отношений, отражающих структурное самоподобие речных сетей и самоаффинность отдельных потоков. Делается вывод, что все скейлинговые экспоненты могут быть получены при помощи двух независимых величин h (экспонента Хэка) и d (фрактальная размерность, характеризующая скейлинг длин главных потоков). В рамках гипотезы универсальности параметры h и d позволяют выделить универсальные классы, в пределах которых различные речные сети характеризуются одинаковыми критическими показателями. На основе анализа работ отечественных и зарубежных ученых в области фрактальных методов исследования речных сетей показано, что результаты, достигнутые в этой области, легли в основу трех основных подходов к пониманию пространственной структуры речных сетей. Согласно первому подходу, сформировавшемуся гораздо раньше двух других, речные сети самоподобны, т.е. демонстрируют скейлинговые свойства на достаточно широком (неограниченном, бесконечном) диапазоне масштабов. В рамках второго подхода отдельные потоки речной сети представляют собой самоаффинные объекты, демонстрирующие самоподобное поведение только на ограниченном (конечном) диапазоне масштабов. В последнее десятилетие начал формироваться третий подход к пониманию речных сетей, как сложных стохастических образований (стохастических фракталов) самоподобных только в среднем на определенном диапазоне масштабов. Основным итогом проведенного анализа является утверждение о том, что современный подход к

исследованию пространственной структуры речных сетей недостаточен для описания их сложной мультимасштабной природы. Поэтому для более адекватного описания речных сетей требуется внедрение и адаптация мультифрактального формализма.

Во второй главе «Исследование фрактальных моделей речных сетей» дана общая характеристика проблемы фрактального моделирования речных сетей. Показано, что существующая на сегодняшний день идеология моделирования речных сетей фрактальными методами не позволяет учесть различия в геологических и климатических условиях формирования речных сетей. Отмечено, что на сегодняшний день созданы существенные предпосылки к активному внедрению фрактальных методов моделирования речных сетей в геоинформационные системы. Однако многие актуальные проблемы остаются открытыми. В частности, все еще существуют бассейны с неизвестным скейлинговым режимом. Здесь изложены основные подходы к моделированию речных сетей на основе фрактальных методов. Исследование начинается с подробного анализа основных типов моделей речных сетей:

- моделей неориентированных речных сетей (Леопольд и Лангбейн, 1962);
- моделей ориентированных речных сетей (Шейдеггер, 1968);
- моделей речных сетей случайной топологии (Ховард, 1971);
- моделей оптимальных речных сетей (Родригес-Итурбе и Риналдо, 90-е гг).

Затем проводится обобщение моделей трех наиболее известных семейств речных сетей на основе двух независимых величин: h (экспонента Хэка) и d (фрактальная размерность, характеризующая скейлинг длин главных потоков). Для демонстрации эффективности такого подхода в данном разделе осуществлено фрактальное моделирование р. Псыш. Расчет фрактальных показателей осуществлялся по топографической карте масштаба 1:100000. Значения скейлинговых показателей для р. Псыш представлены в таблице 1.

Здесь же приведены значения основных скейлинговых показателей для трех наиболее известных семейств речных сетей.

Таблица 1

Скейлинговый параметр	Ориентированные случайные сети	Неориентированные случайные сети	Оптимальные водосборные сети	Реальный бассейн (р. Псыш)
h	$2/3$	$5/8$	0,57-0,58	0,62
D	$3/2$	2	1,8-1,9	1,68
H	$1/2$	1	-	0,68
d	1	$5/4$	1,1	1,04
τ	$4/3$	$11/8$	$1,43 \pm 0,02$	1,38
γ	$3/2$	$8/5$	$1,8 \pm 0,05$	1,61

Как видно из таблицы 1, значения скейлинговых показателей h и d р. Псыш близки к значениям скейлинговых параметров, характерных для неориентированных речных сетей.

Таким образом, внедрение фрактального подхода позволило значительно упростить процесс моделирования речных сетей. Однако большинство из существующих на сегодняшний день моделей имеют ярко выраженный детерминированный характер и объясняют случайные процессы возникновения и развития речных сетей достаточно грубо. В связи с этим более реалистичным представляется использование мультифрактальных геомodelей, которые учитывали бы изменение скейлингового режима в процессе эволюции речных сетей.

В третьей главе «Разработка методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов» изложены основные положения, программная и техническая реализация разработанной методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов.

Разработанная методика геоинформационного моделирования речных сетей состоит из двух взаимосвязанных частей:

- 1) моделирование пространственной структуры речной сети;
- 2) моделирование топологической структуры речной сети,

обусловленной динамикой ее развития и построение картины последовательного формирования потоков с использованием мультифрактального подхода.

В основе разработанной мультифрактальной модели лежат следующие положения:

- 1) проекция речной сети в плане является мультифракталом;
- 2) число притоков у потоков в сети растет степенным образом.

1-ый этап. На подготовительном этапе моделирования осуществляется отбор карт с изображением исследуемой речной сети. Исходный картографический материал может быть представлен в цифровой, векторной (слои) или традиционной бумажной форме. В последнем случае необходимо выполнить сканирование и цифрование рассматриваемой реки с привлечением средств ГИС.

2-ой этап. На следующем этапе моделирования проводится ранжирование потоков в сети (присвоение порядков потокам в сети) в соответствии с одной из схем упорядочивания потоков: Страллера, Хортон или модифицированной схемы Хортон с обратным заданием порядков притокам. Показано, что каждая из выше перечисленных схем обладает своими достоинствами и недостатками и наиболее удачной в плане отражения последовательности формирования потоков в сети является модифицированная схема Хортон с обратным заданием порядков притокам.

3-ий этап. На третьем этапе геоинформационного моделирования создается растровый образ векторной модели речной сети и производится расчет чисел и длин потоков различных порядков. По полученным данным составляется таблица, в которой фиксируются порядки потоков, их порядковый номер и длина, а также порядок и номер родительского потока. Каждая такая таблица отражает иерархическое строение речной сети и может использоваться в качестве исходного материала на этапе мультифрактального описания топологической структуры речной сети.

4-ый этап. Мультифрактальный анализ речных сетей.

Мультифрактальный анализ изображения речной сети

Мультифрактальный анализ изображений включает в себя следующие три вычислительных этапа:

- 1) разбиение изображения речной сети на квадратные ячейки заданного размера;
- 2) формирование фрактальной меры на основе значений коэффициента густоты, характеризующего каждую ячейку карты;
- 3) получение мультифрактальных характеристик, позволяющих описать неоднородные по густоте участки бассейна (на карте).

Фрактальная мера при описании геометрической структуры речной сети определяется как отношение суммарной длины потоков в пределах данной ячейки (элемента карты) к суммарной длине потоков во всей речной сети, т.е.

$$p_i(\varepsilon) = \frac{l_i(\varepsilon)}{L},$$

где $l_i(\varepsilon)$ - суммарная длина потоков (рек) (суммарное число значимых пикселей внутри i -ой ячейки) в пределах i -ой ячейки; L - суммарная длина потоков во всей речной сети. Таким образом, мера каждой ячейки пропорциональна коэффициенту густоты, полученному для данной ячейки, характеристике наиболее полно отражающей различные с геометрической точки зрения участки речной сети.

В случае мультифрактальности сконструированной меры моменты распределения вероятностей ведут себя степенным образом, т. е. справедливо соотношение

$$Z_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-\tau(q)}. \quad (1)$$

Преобразуя формулу (1) получим явное выражение для показателя массы $\tau(q)$

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}. \quad (2)$$

Последовательность показателей массы $\tau(q)$, характеризует скорость

изменения соответствующих моментов. Функция $\tau(q)$ связана непосредственно с обобщенными фрактальными размерностями D_q , $D_q = \tau(q)/(q-1)$. Наряду с функциями D_q и $\tau(q)$ используют и так называемый спектр сингулярностей $f(\alpha)$, представляющий собой размерности неких однородных фрактальных подмножеств исходного множества, которые дают наибольший вклад в моменты распределения (1) при заданных q . Спектр $f(\alpha)$ получают путем преобразования Лежандра функции $\tau(q)$, $f(\alpha) = \alpha q - \tau(q)$, где $\alpha(q) = d\tau/dq$.

Мультифрактальный анализ топологической структуры речной сети, обусловленной динамикой ее развития

При исследовании топологической структуры речных сетей выполняется мультифрактальный анализ структуры потоков речной сети. Для этого каждому потоку в сети ставится в соответствие величина

$$p_i = \frac{N_i}{N},$$

где N_i - число притоков i -го потока ($i = 1..N$), N – общее число потоков (здесь и далее сама главная река в расчет не принимается).

В соответствии с формулируемым в диссертационной работе положением в случае мультифрактальности структуры потоков моменты распределения вероятностей ведут себя степенным образом с увеличением размера речной сети, т.е.

$$Z_q(N) = \sum_{i=1}^N p_i^q \propto N^{\tau(q)}, \quad (3)$$

где $Z_q(N)$ - моменты порядка q , N - общее число потоков, на каждой стадии формирования речной сети. Как и при мультифрактальном анализе изображений речной сети функция $\tau(q)$ в соотношении (3) характеризует скорость изменения соответствующих моментов. Величина $\tau(q)$ позволяет получить еще две полезные кривые: спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q и спектр сингулярностей $f(\alpha)$.

5-ый этап. Геоинформационная интерпретация мультифрактальных параметров

Количественная характеристика скорости роста речной сети – D_0

Фрактальная размерность D_0 , полученная при анализе топологии речной сети, есть количественная характеристика скорости роста речной сети. Чем ближе величина к 1, тем большее число потоков в сети на данной стадии формирования реки имеет хотя бы один приток. И наоборот, близость величины D_0 к 0, означает, что притоки формируются у потоков, сформировавшихся на ранних стадиях развития речной сети (т.е. у главной реки и у ее основных притоков). Таким образом, размерности характеризуют два предельных режима развития речной сети, когда на каждой стадии формирования речной сети ветвится только главная река и ее основные притоки, или когда в формировании речной сети участвуют потоки малых (по Хортону) порядков.

Количественные характеристики роста числа потоков в сети с минимальным и максимальным числом притоков – $f_{-\infty}$ и f_{∞}

Среди всех величин $f(\alpha)$, используемых в целях описания топологии речной сети наиболее важное место занимает величины $f_{-\infty}$ и f_{∞} . Величина $f_{-\infty}$ представляет собой фрактальную размерность подмножества, характеризуемого максимальным значением индекса сингулярностей α_{\max} . Величина α_{\max} характеризует потоки с наименьшим количеством притоков. Число таких потоков при формировании речной сети растет как

$$N_{\min} \sim N^{f_{-\infty}}, \quad (4)$$

Из соотношения (4) получим явное выражение для размерности $f_{-\infty}$

$$f_{-\infty} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln N_{\min}}{\ln N}.$$

Таким образом, размерность $f_{-\infty}$ характеризует скорость роста числа потоков с наименьшим числом притоков. На практике, как правило, на всех стадиях формирования речной сети присутствуют потоки с одним притоком. Это

означает, что $p_{\min} = 1/N$, где N общее число потоков в сети. Таким образом, $\alpha_{\max} = 1$. Аналогично величина $f_{-\infty}$ представляет собой фрактальную размерность подмножества, характеризуемого минимальным значением индекса сингулярностей α_{\min} . Поскольку величина α_{\min} , напротив, характеризует потоки с наибольшим числом притоков, то

$$N_{\max} \sim N^{f_{\infty}} \text{ и } f_{\infty} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln N_{\max}}{\ln N}.$$

Таким образом, размерность f_{∞} характеризует скорость роста числа потоков с наибольшим числом притоков. На практике максимальное число притоков наблюдается у главной реки, либо у одного из ее основных притоков. В связи с этим фрактальная размерность f_{∞} в большинстве случаев принимает нулевое значение (размерность одноточечного подмножества).

Расчет мультифрактальных характеристик при анализе топологии потоков и геометрической структуры речной сети осуществлялся в среде мультифрактальной обработки изображений и рядов данных, разработанной автором работы совместно с аспирантом кафедры ПЭ МИИГАиК Учаевым Денисом Валентиновичем под руководством научного руководителя проф. д. т. н. Малинникова В. А. Данный программный комплекс состоит из двух основных блоков:

1. Блок формирования фрактальной меры по цифровому изображению речной сети и данным о числе притоков у каждого потока.
2. Блок статистического анализа наклонов регрессионных прямых.

Блок формирования фрактальной меры

Как известно, оценки мультифрактальных характеристик цифровых изображений существенным образом зависят от способа формирования покрытий и формы покрывающих элементов. При этом наилучший результат достигается при выборе такого покрытия, при котором число элементов, наиболее лучше отражающих особенности исследуемой структуры, минимально. Ошибки, возникающие на этапе покрытия изображения исследуемой структуры, могут привести к существенным искажениям

формируемой впоследствии меры и, как следствие, к появлению всплесков на спектрах (вплоть до получения инвертированных спектров (ИМФ-спектры), для которых наблюдается возрастание значений фрактальных размерностей Реньи $D(q)$ с увеличением q , а спектр сингулярностей $f(\alpha)$ имеет не выпуклую, а вогнутую форму.) С целью получения канонических мультифрактальных спектров автором предложена методика получения канонических мультифрактальных спектров, основанная на процедуре переформирования ячеек с недопустимыми значениями индекса сингулярности α .

Блок статистического анализа наклонов регрессионных прямых

В разработанном блоке анализа наклонов для принятия окончательного решения о том, какой наклон соответствует регрессионной прямой, построенной по всему диапазону масштабов, строятся гистограммы степени повторяемости наклонов, вычисленных по поддиапазнам для каждого значения параметра q . Наклон, наиболее часто получаемый при анализе отдельных поддиапазнов шкал (максимум гистограммы), с наибольшей вероятностью соответствует наклону регрессионной прямой, построенной по всему диапазону масштабов.

Экспериментальная апробация разработанной методики была проведена на серии рек с различными геоморфологическими и географическими характеристиками. В качестве примера рассмотрим бассейны рек Псыш и Сахрай с хорошо развитой речной сетью. Исходным материалом при геоинформационном моделировании речных сетей рек Псыш и Сахрай служили листы топографических карт масштаба 1:100000. Каждая из карт относится к классу среднемасштабных карт и целиком содержит бассейны рек Псыш и Сахрай.

На первом этапе моделирования на основе топографических листов масштаба 1:100000 были созданы векторные карты гидрографических сетей бассейнов рек Псыш и Сахрай.

На втором этапе геомоделирования всем потокам рек Псыш и Сахрай были присвоены порядки в соответствии с модифицированной схемой

упорядочивания потоков (см. рис 1). При данной схеме упорядочивания водотоков порядок главной реки равен 1, а все элементарные потоки имеют максимальный порядок.

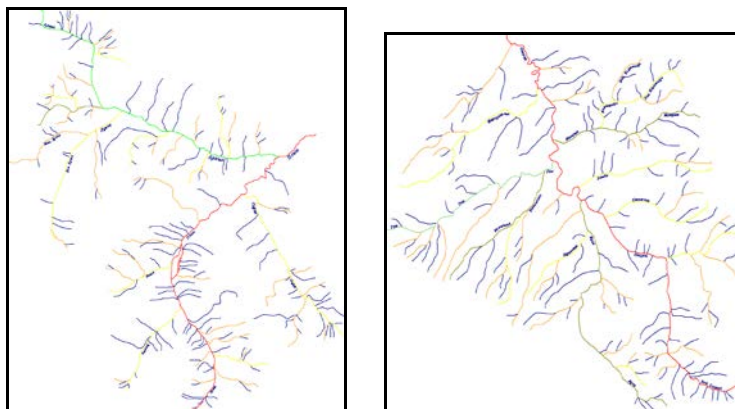


Рис.1. Векторные карты р. Псыш и р. Сахрай, построенные по топографическим картам масштаба 1:100000

Для того, чтобы отличать реки одного и того же порядка каждому водотоку данного порядка был присвоен свой идентификационный номер. Порядки потоков, их порядковый номера и длины, а также порядки и номер родительского потока в рассматриваемой схеме упорядочивания потоков были автоматизированным способом занесены в таблицы, используемые на этапе мультифрактального описания топологической структуры речных сетей.

Проанализируем результаты, полученные для р. Псыш и р. Сахрай по картам масштаба 1:100000. Поскольку размерность бассейнов рек Псыш и Сахрай меньше двух, то это доказывает, что обе речные сети не охватывают весь водосборный бассейн и тем самым остаются не дренируемые области. Этот результат полностью согласуется с исследованиями Клапса и Оливето, которые утверждали, что *фрактальная размерность* бассейна, как правило, меньше двух и лежит в диапазоне 1,6 – 1,8. Значение индекса упорядоченности больше для изображения реки Псыш, что в целом свидетельствует о большей степени нарушения симметрии. Остальные размерности несут дополнительную информацию о распределении ячеек с различными значениями коэффициента густоты. При этом наибольшую информацию о густоте каждой отдельной ячейки несет размерность, которая характеризует вероятность попадания q случайным образом выбранных точек сети в ячейку фиксированного размера

при некотором достаточно большом значении порядка момента q .

Экспериментально установлено (см. рис. 2 и 3), что правые ветви спектров $f(\alpha)$, соответствующие отрицательным q , систематически короче левых. Это объясняется тем, что областей с малыми значениями удельного коэффициента плотности гораздо больше на среднемасштабных топографических картах. Напротив ячейки с относительно высокими значениями коэффициента плотности практически не встречаются. Сходимость к нулю левой ветви спектра $f(\alpha)$ для r . Псыш на карте масштаба 1:100000 свидетельствует о том, что имеется всего одна ячейка, удельная плотность которой, характеризуется показателем сингулярности α_{\min} .

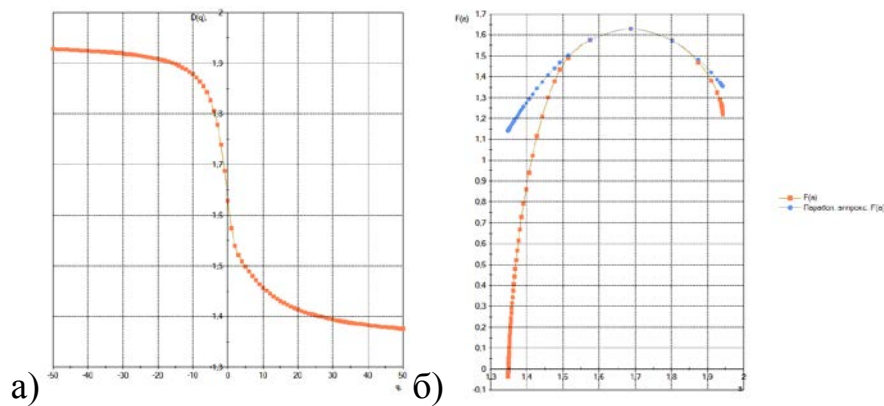


Рис. 2. а) Спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q ; б) спектр сингулярностей $f(\alpha)$ и его параболическая аппроксимация для изображения r . Псыш на карте масштаба 1:100000

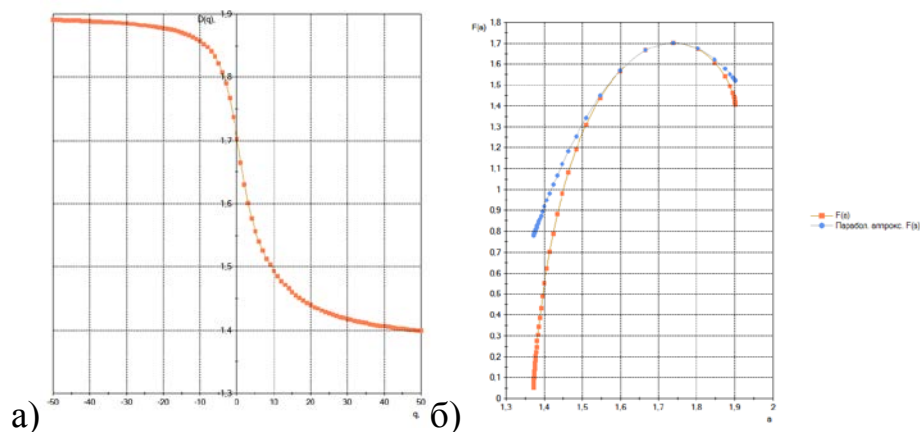


Рис. 3. а) Спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q ; б) спектр сингулярностей $f(\alpha)$ и его параболическая аппроксимация для изображения r . Сахрай на карте масштаба 1:100000

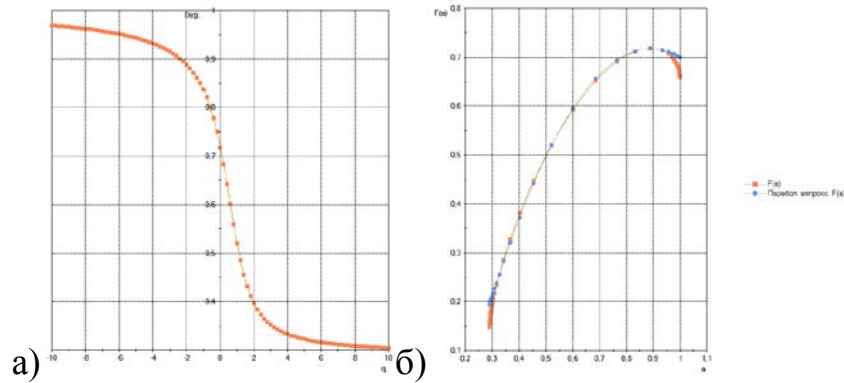


Рис. 4. а) Спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q ; б) спектр сингулярностей $f(\alpha)$, полученные по распределению потоков по числу притоков у них для р. Псыш на карте масштаба 1:100000

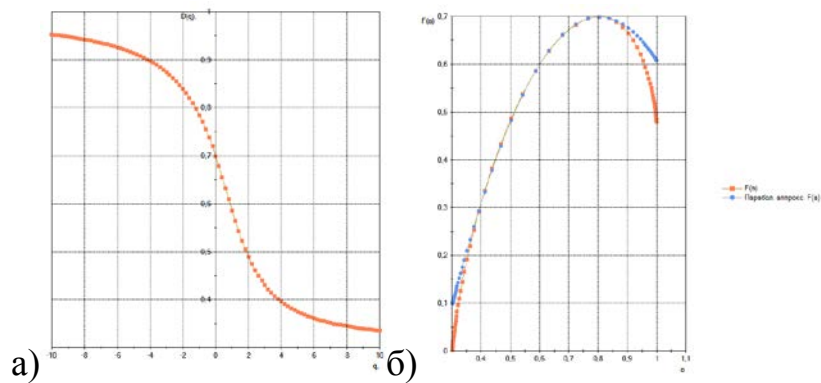


Рис. 5. а) Спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q ; б) спектр сингулярностей $f(\alpha)$, полученные для распределения потоков по числу притоков у них для р. Сахрай на карте масштаба 1:100000

На рисунках 2б-5б показан спектр $f(\alpha)$ и его параболическая аппроксимация для изображений и потоковой структуры для каждой из исследуемых речных сетей. Как видно из рисунков в каждом случае можно выделить участок спектра, который полностью накладывается на аппроксимирующую кривую. При этом гораздо лучше согласуются левые ветви спектров, соответствующие потокам с достаточно большим числом притоков. Это может быть связано с тем, что в процессе формирования наибольшей перестройки подвергаются бассейны малых по Хортону порядков. Мультифрактальный анализ структуры потоков речной сети позволяет выявить вклад потоков с малым числом притоков (см. рис. 4 и 5). Экспериментально установлено, что правые ветви спектров, соответствующие отрицательным q , систематически короче левых. При больших отрицательных величинах порядка

моментов их вклад становится определяющим, подавляя влияние других потоков, характеризуемых большим числом сторонних притоков. В бассейне р. Псыш имеется большее число потоков с одним притоком, поэтому правая ветвь спектра для р. Псыш расположена выше соответствующей ветви $f(\alpha)$ -спектра для р. Сахрай.

В четвертой главе «Применение обобщенной фрактальной модели для оценки качества генерализации речной сети на среднемасштабных топографических картах» предлагается метод оценки качества генерализации речной сети на среднемасштабных топографических картах, базирующийся на использовании мультифрактальных характеристик речной сети.

В первой части главы изложены основные положения теории картографической генерализации речных сетей. Отмечается, что в современной практике отбор рек на картах чаще всего определяется общим правилом, по которому на карту наносятся реки, начиная с некоторой установленной длины. Это правило является механическим и не отвечает полностью задаче правильного отбора элементов речной сети. В предыдущей главе диссертации был сделан вывод о том, что речные сети мультифрактальны. В связи с этим ставится задача разработки количественных критериев оценки качества генерализации рек, сохраняющих мультифрактальность речных сетей. Среди прочих важнейшим аспектом качества данных генерализованных цифровых карт является их логическая согласованность. В частности, при генерализации речных сетей операции согласования должны подвергаться как отдельные элементы речной сети (сегменты, потоки), так и вся речная сеть в целом, как комплексный объект карты. Несложно заметить, что эти требования естественным образом учитываются в рамках разработанной мультифрактальной модели речной сети. Для оценки качества генерализации речных сетей на среднемасштабных топографических картах предлагается использовать следующие количественные характеристики:

- *количественная мера близости мультифрактальных спектров, описывающих геометрическую структуру речных сетей*

$$\mu_{\Gamma}(MapA, MapB) = \frac{f_{\Gamma}(\alpha)(MapA)}{f_{\Gamma}(\alpha)(MapB)};$$

- *количественная мера близости мультифрактальных спектров, описывающих топологическую структуру речных сетей*

$$\mu_{\Gamma}(MapA, MapB) = \frac{f_{\Gamma}(\alpha)(MapA)}{f_{\Gamma}(\alpha)(MapB)}.$$

Для визуальной оценки качества генерализации речных сетей предлагается сопоставить мультифрактальные показатели исходной и полученной в ходе генерализации карт.

Эффективность применения выработанных критериев была продемонстрирована на примере речных сетей р. Псыш и р. Сахрай.

Как видно из рис. 6 спектры D_q , полученные по картам масштаба 1:200000 лежат ниже спектров D_q , рассчитанных для исходного изображения масштаба 1:100000.

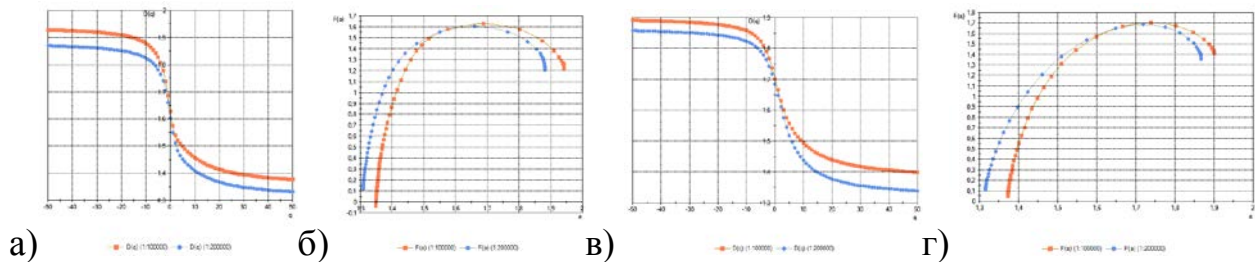


Рис.6. Спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q и спектр сингулярностей $f(\alpha)$, характеризующие геометрическую структуру р. Псыш (а, б) и р. Сахрай (в, г) на картах масштаба 1:100000 и 1:200000, построенные в одной системе координат

В обоих случаях фрактальная размерность генерализованного изображения несколько ниже фрактальной размерности исходного. Такое незначительное понижение размерности может быть связано с упрощением отдельных потоков на карте масштаба 1:200000 и в целом говорит о сохранении структурного самоподобия рек на картах масштаба 1:200000. Остальные размерности обнаруживают некоторое расхождение в значениях фрактальной размерности подмножеств. Эта разница проявляется в наибольшей степени при предельных значениях индекса сингулярности, характеризующего области изображения с наименьшим и наибольшим значениями коэффициента густоты. Уменьшение размерности для данного подмножества ячеек свидетельствует о том, что в

удельном выражении таких областей стало гораздо меньше.

На рис 7 приведены спектры сингулярностей и обобщенных фрактальных размерностей для карт масштаба 1:100000 и карт масштаба 1:200000, характеризующие топологию речной сети.

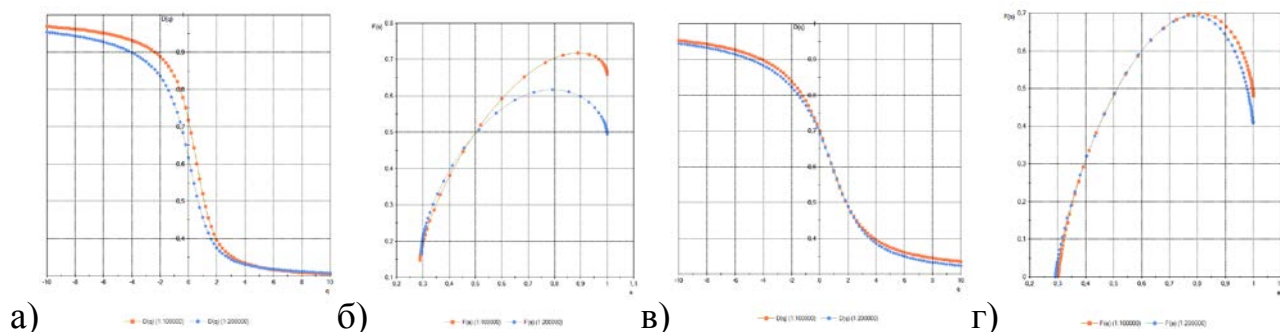


Рис.7. Спектры обобщенных фрактальных размерностей D_q и спектры сингулярностей $f(\alpha)$, характеризующие топологическую структуру р. Псыш (а, б) и р. Сахрай (в, г) на картах масштаба 1:100000 и 1:200000, построенные в одной системе координат

При сопоставлении спектров сингулярностей видно, что левые ветви спектров, соответствующие потокам с достаточно большим числом сторонних притоков (главная река и ее основные притоки), практически целиком накладываются друг на друга. Это свидетельствует о том, что отбрасывание притоков у крупных потоков при генерализации выполнено корректно с соблюдением соответствующих норм и цензов. Отбрасывание же притоков у потоков с небольшой долей притоков выполнено корректно для изображения р. Сахрай, что наглядно обнаруживается наложением правой ветви спектра для исходной и генерализованной карт. Напротив спектры для р. Псыш расходятся при значениях индекса сингулярности близких к единице. Такое расхождение спектров для исходной и генерализованной карт может объясняться тем, что отбрасывание притоков у потоков с небольшим числом притоков приводит к резкой перестройке сети и изменению ее топологической структуры.

Заключение

Представленная диссертационная работа содержит исследования и разработки автора, которые можно рассматривать как решение актуальной научной задачи, посвященной разработке и исследованию методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных

методов. Основными теоретическими и практическими результатами работы являются следующие:

1. Выполнено теоретическое обобщение и систематизация фрактальных закономерностей, описывающих строение и динамику развития речных сетей. Составлена таблица основных скейлинговых закономерностей организации речных сетей.
2. Проведен анализ и обобщение фрактальных моделей речных сетей. Обоснована возможность использования фрактальных методов при геоинформационном моделировании речных сетей.
3. Разработан математический аппарат и теоретические основы, выполнена практическая реализация методики геоинформационного моделирования речных сетей на основе фрактальных методов.
4. Предложена и обоснована мультифрактальная модель речной сети. Для различных моделей роста речной сети найдены условия (границы скейлингового диапазона), при которых модельная динамика обладает скейлинговыми свойствами.
5. Разработано программное обеспечение для расчета мультифрактальных показателей речных сетей по их цифровым изображениям и морфометрическим характеристикам. Разработана и реализована методика получения канонических мультифрактальных спектров.
6. Обоснована возможность применения разработанной мультифрактальной модели при оценке качества картографической генерализации речных сетей. Предложены количественные критерии оценки качества генерализованных речных сетей на среднемасштабных топографических картах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мультифрактальный математический анализ синергетических структур // Труды Международной научно-практической интернет-конференции «Перспектива и развитие». – М.: МФТИ, 2004. (соавторы Малинников В. А., Никольский А. Е., Учаев Д. В.).

2. Мультифрактальная параметризация геопространственных структур // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. – М.: МИИГАиК, 2004. – С. 163-167 (соавторы Малинников В. А., Никольский А. Е., Учаев Д. В.).
3. Современные математические методы параметризации изображений синергетических объектов. Учебное пособие. – М.: МГГИИ, 2005. – 98 с., ил. 20. (соавтор Никольский А. Е.).
4. Мультифрактальные методы исследования речных систем // Труды 7-го международного научно-промышленного форума «Великие реки 2005». (соавторы Савиных В. П., Малинников В. А.).
5. Методика получения канонических спектров при мультифрактальном анализе цифровых изображений. - Обзорение прикладной и промышленной математики, 2006, т.13, в. 3, с. 516-517. (соавторы Малинников В. А., Учаев Д. В.).
6. Мультифрактальные методы исследования речных систем // Рациональное природопользование, промышленная экология и дистанционные методы: Сб. науч. Трудов. – М.: ГУЗ, 2006. – С. 98-104.
7. Application of Multifractal Approach in Generalizing River Networks Cartographic Images. In: CD-Rom Proc of the 23th ICC, Moscow, Russia, Section 10, 2007. (соавтор Малинников В. А.).
8. Применение фрактального подхода в геоинформационном моделировании речных сетей // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2007. № 4. С. 76-86.
9. Синергетический подход к изучению природных и социальных процессов / Труды Всероссийской конференции «Социальная интеграция, доступное качественное образование, проблемы семьи и молодежи», Москва, 24-25 мая, 2007, с. 17.