



ФРАКТАЛЬНЫЙ

АНАЛИЗ

В ФЛЮВИАЛЬНОЙ

ГЕОМОРФОЛОГИИ

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ФЛЮВИАЛЬНОЙ ГЕОМОРФОЛОГИИ

Под редакцией А.В. Иванова, А.В. Позднякова

Москва
Издательство «УНИВЕРСИТЕТСКАЯ КНИГА»
2013

УДК 551.4.011

ББК 26.3

Ф 82

Рецензенты:

заведующий кафедрой динамической геологии,
доктор геолого-минералогических наук, профессор *В.П. Парначёв*
(Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск);
доктор геолого-минералогических наук, профессор *О.Д. Смилевец*
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.)

Авторы:

И.К. Андронаке, А.В. Иванов, А. А. Короновский, М.А. Мельник,
А.В. Поздняков, С.А. Чупикова, И.А. Яшков

Ф 82 Фрактальный анализ в флювиальной геоморфологии: монография / Под ред. А.В. Иванова, А.В. Позднякова. – М.: Издательство «Университетская книга», 2013. 188 с.
ISBN 978-5-91304-326-9

В монографии рассматриваются общие теоретические вопросы и методы фрактального анализа применительно к геоморфологическим объектам флювиальной природы. На примере территорий Саяно-Тувинского нагорья, Горного Алтая, Западно-Сибирской низменности, Саратовского Поволжья в России и поймы р. Дуная в Румынии обсуждаются вопросы самоподобия элементов эрозионной сети различного порядка, раскрываются основные причины фрактальности речной и овражно-балочной сетей.

Для широкого круга специалистов. Книга будет полезной также аспирантам и студентам вузов, чья будущая профессия связана с исследованиями в области геологии, геоморфологии и геоэкологии.

УДК 551.4.011

ББК 26.3

Работа выполнена при поддержке:

- Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 94-05-16328-а, 98-02-26091-г, 01-05-65151-а, 01-06-85047-г, 08-05-08147-з);
- Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2012-2014 годы, проект 01201253988 «Исследование системы инженерно-геоэкологических опасностей сети городских поселений: закономерности развития, обеспечение устойчивого развития и предупреждение чрезвычайных ситуаций (на примере Среднего и Нижнего Поволжья)»;
- Программы стратегического развития Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина на 2012-2016 годы, тема 2.1.6. «Развитие учебно-научной лаборатории инженерной геоэкологии»

ISBN 978-5-91304-326-9

© Коллектив авторов, 2013

© Издательство «Университетская книга», 2013

**FRACTAL ANALYSIS
IN THE FLUVIAL GEOMORPHOLOGY**

Edited by A.V. Ivanov, A.V. Pozdnyakov

University Book
Moscow 2013

UDK 551.4.011

BBK 26.3

F 82

Referees:

Head of the Department of Dynamic Geology, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor *V.P. Parnachev*
(National Research Tomsk State University, Tomsk);

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor *O.D. Smilevets*
(Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin)

Authors:

I.K. Andronake, A.V. Ivanov, A.A. Koronovskii, M.A. Melnik,
A.V. Pozdnyakov, S.A. Chupikova, I.A. Yashkov

F 82 **Fractal analysis in fluvial geomorphology** / Edited by A.V. Ivanov, A.V. Pozdnyakov. – Moscow: Publishers «University Book», 2013. 188 p.
ISBN 978-5-91304-326-9

The book deals with the general theoretical issues and methods of fractal analysis applied to the geomorphic objects of the fluvial nature. On the example of the Sayan-Tuva Plateau, Altai Mountains, the West Siberian Plain, Saratov Volga region in Russia and the floodplain of Danube in Romania the problems of the self-similarity of network elements of different order are discussed and the main causes of the fractality of the river and ravine networks are revealed.

For a wide range of specialists. The book can be useful also to the post-graduate students and university students whose future career is related to the researches in the field of the geology, geomorphology and geoecology.

UDK 551.4.011
BBK 26.3

This work was supported by:

- Russian Foundation for Basic Research (project 94-05-16328-a, 98-02-26091-g, 01-05-65151-a, 01-06-85047-g, 08-05-08147-Z);
- Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State institutions of higher education jobs for 2012-2014, the project 01201253988 «The study of engineering and geo-environmental hazards network of urban settlements: patterns of development, sustainable development and disaster situations (on example of the Middle and Lower Volga»);
- Strategic Development Program of the Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin in 2012-2016, the topic 2.1.6. «The development of teaching and research laboratories of engineering geo-ecology»

ISBN 978-5-91304-326-9

© Authors, 2013

© Publishers «University Book», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение (<i>А.В. Поздняков, А.В. Иванов</i>).....	7
1. Основы фрактальной методологии (<i>М.А. Мельник</i>)	11
1.1. Терминология и принципы	11
1.2. История становления.....	14
1.3. Фрактальный анализ в геоморфологии	19
2. Природные структуры и модельные фракталы	28
2.1. Фрактальный анализ эрозионного рельефа (<i>А.В. Поздняков, М.А. Мельник</i>).....	28
2.2. Качественные аналоги в строении природных эрозионных структур и кривой Коха (<i>И.А. Яшков, А.В. Иванов</i>)	39
3. Фрактальный анализ речной сети	46
3.1. Применение фрактального анализа в изучении морфологии речной сети (<i>А.В. Поздняков, М.А. Мельник, С.А. Чутикова</i>).....	46
3.2. Некоторые аспекты реконструирования и нелинейного моделирования эрозионной сети в геологическом прошлом (<i>И.А. Яшков, А.В. Иванов</i>).....	66
4. Региональный опыт исследований	75
4.1. Речная сеть Саяно-Тувинского нагорья (<i>С.А. Чутикова</i>).....	75
4.2. Речная сеть Томской области (<i>М.А. Мельник</i>).....	105
4.3. Интегральный фрактальный анализ морфологии и динамики поймы р. Дунай (<i>И.К. Андронаке</i>)	114
4.4. Овражно-балочная сеть города Саратова (<i>А.В. Иванов, А.А. Короновский, И.А. Яшков</i>)	133
5. Свойства бинарности и масштабная инвариантность геосистем (<i>А.В. Поздняков</i>).....	147
Заключение (<i>А.В. Иванов, А.В. Поздняков</i>)	159
Библиографический список	161
Фотографические материалы	169

CONTENT

Introduction (<i>A.V. Pozdnjakov, A. V. Ivanov</i>).....	7
1. Fundamentals of fractal methodology (<i>M.A. Melnik</i>)	11
1.1. Terminology and principles.....	11
1.2. Formation history.....	14
1.3. Fractal analysis in the geomorphology.....	19
2. Natural structures and model fractals	28
2.1. Fractal analysis of the erosion relief (<i>A.V. Pozdnjakov, M.A. Melnik</i>).....	28
2.2. The qualitative analogies in the structure of the natural erosion structures and Koch curve (<i>I.A. Yashkov, A.V. Ivanov</i>).....	39
3. Fractal analysis of the river network	46
3.1. Application of the fractal analysis in the studies of the morphology of the river network (<i>A.V. Pozdnjakov, M.A. Melnik, S.A. Chupikova</i>).....	46
3.2. Some aspects of the reconstruction and the nonlinear modeling of the erosion network in the geological past (<i>I.A. Yashkov, A.V. Ivanov</i>).....	66
4. Regional research experience	75
4.1. River network of Sayan-Tuva Upland (<i>S.A. Chupikova</i>).....	75
4.2. River network of Tomsk region (<i>M.A. Melnik</i>).....	105
4.3. Integrated fractal analysis of the morphology and dynamics of the floodplain of the river Danube (<i>I.K. Andronake</i>).....	114
4.4. Ravine network of Saratov (<i>A.V. Ivanov, A.A. Koronovskii, I.A. Yashkov</i>).....	133
5. Properties of the binarity and the scale invariance of the geosystems (<i>A.V. Pozdnjakov</i>).....	147
Conclusion (<i>A.V. Ivanov, A.V. Pozdnjakov</i>).....	159
Bibliography	161
Photo materials	169

ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес к фрактальной методологии вызван новыми, еще недостаточно раскрытыми потенциальными возможностями в исследовании систем различной природы. Опыт исследования динамики геоморфосистем с применением фрактального анализа убеждает в том, что этот подход позволяет не только глубже взглянуть на известные (и, как кажется, достаточно изученные) явления в рельефообразовании, а также в эволюции геосистем в целом, но и обнаружить общие принципы и закономерности их сложной динамики, физической сущности геоморфологических процессов.

В основу книги положены результаты фрактального анализа конкретных, территориально не объединенных природных объектов (Саяно-Тувинское нагорье, Горный Алтай, Западно-Сибирская низменность, Саратовское Поволжье в России и пойма р. Дуная в Румынии). Исследования проводились параллельно несколькими группами специалистов на базе ряда организаций в разных городах. Авторский коллектив данной монографии формировался постепенно, по мере развития сотрудничества. Поэтому разделы книги, подготовленные представителями отдельных научных групп, связаны идейно и методологически в разной мере. Мы умышленно частично сохранили данную ситуацию, чтобы отразить разнообразие и особенности взглядов на методологию и подходов к объектам исследований и, тем самым, подчеркнуть проблематичность многих рассматриваемых нами аспектов.

Представленные исследования объединяются общей методологией фрактального анализа применительно конкретно к флювиальным процессам рельефообразования. При этом, что существенно важно для развития фрактальных методов исследования сложных природных систем, каждый исследователь (группа исследователей) представляет проблему с позиций своего видения особенностей строения и динамики объекта и индивидуальных подходов в отображении их фрактальных особенностей.

В книге впервые излагаются практические результаты применения фрактальной методологии к анализу конкретных природных объектов и, пока еще небогатая, история развития методов фрактального анализа, корнями уходящая в науку о рельефе, геометрия которого, пользуясь сравнениями Б. Мандельброта, имеет, несомненно, «фрактальное лицо».

Фрактальный анализ развивается на стыке современных методов исследования, включая использование новых математических моделей, компьютерной техники и новых инструментов получения информации. Следует обратить внимание на возможность с помощью фрактального подхода раскрывать закономерности сложной организации геосистем, не устанавливаемые традиционными методами морфометрического анализа, такими как исследование аномальных участков густоты и глубины эрозионного расчленения поверхности, выявление участков с аномальными уклонами, определение коэффициентов извилистости русел и др.

В настоящее время в России постоянно проводятся междисциплинарные научные мероприятия, тематика которых посвящена проблемам теории фракталов, синергетики и применению фрактальной методологии в анализе динамических самоорганизующихся процессов в природе. Среди них можно назвать постоянно действующий симпозиум «Фракталы и прикладная синергетика» (Москва), конференции «Фракталы и циклы развития систем» (Томск, 2001), «Фрактальность как универсальное свойство природы?» (Москва, 2002), Всероссийский научный симпозиум «Проблемы синергетики и коэволюции геосфер» (Саратов, 2008), Международную школу-конференцию «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов), Всероссийскую научную конференцию «Козволюция геосфер: от ядра до Космоса» (Саратов, 2012) и др. В Интернете, помимо обзорных статей и рефератов о фракталах, размещается много демонстрационных компьютерных программ, графических построений красивых фрактальных множеств.

В книгу вошли результаты исследований, выполнявшихся по плановым научно-исследовательским программам Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Программа 7.10.1. «Интегрированные исследования природно-климатических изменений и связанных с ними рисков природопользования в Сибири») и Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Проект 4.5.2.6 «Фундаментальные проблемы управления ресурсным потенциалом Тувы и сопредельных трансграничных регионов с использованием геоинформационных систем и технологий»).

В некоторые тематические разделы книги включены результаты фундаментальных исследований, выполнявшихся в лаборатории самоорганизации геосистем ИМКЭС СО РАН при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): проекты 94-05-16328-а – «Синергетика геоморфосистем»; 98-02-26091-г – «Порядок и хаос в развитии систем»; 01-05-65151-а – «Самоорганизация флювиогляциальных катастроф»; 01-06-85047-г – «Фракталы и циклы развития систем»; 08-05-08147-з – доклад «Geosystems as Self-organising Binary Structures» на Международной конференции «Studying, Modeling and Sense Making of Planet Earth» (Греция) и др.

В книге представлены результаты исследований, полученные научными сотрудниками по Программе стратегического развития СГТУ имени Ю.А. Гагарина на 2012-2016 годы, тема 2.1.6. «Развитие учебно-научной лаборатории инженерной геоэкологии»; проекту Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2012-2014 годы, проект 01201253988 «Исследование системы инженерно-геоэкологических опасностей сети городских поселений: закономерности развития, обеспечение устойчивого развития и предупреждение чрезвычайных ситуаций (на примере Среднего и Нижнего Поволжья)»; ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», проект 2007-5-1.5-00-01-157 «Эколого-геологические опасности городских территорий, их оценка и разработка на основе нелинейной динамики системы прогнозирования и предотвращения катастрофических ситуаций (на примере Среднего Поволжья)».

Данная работа не могла быть выполнена без поддержки и содействия со стороны коллег и руководителей научных учреждений.

Авторы выражают искреннюю признательность и благодарность член-корр. РАН, доктору физико-математических наук М.В. Кабанову, член-корр. РАН, доктору физико-математических наук, профессору Д.И. Трубецкову, член-корр. РАН, доктору геолого-минералогических наук, профессору Г.И. Худякову за консультации по ряду теоретических и практических вопросов; доктору физико-математических наук В.М. Логинову и кандидату физико-математических наук Ю.А. Калушу, доктору физико-математических наук, профессору кафедры электроники, колебаний и волн СГУ имени Н.Г. Чернышевского А.Е. Храмову и коллективу лаборатории «Хаотические автоколебания и образование структур» отделения физики нелинейных систем НИИ естественных наук СГУ имени Н.Г. Чернышевского за помощь в организации экспериментальных работ.

Выражаем признательность доктору географических наук, профессору Ю.Г. Пузаченко (Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва), доктору геолого-минералогических наук, профессору С.И. Шерману (Институт земной коры СО РАН, Иркутск) и Д.Н. Козлову (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва) за консультации и ценные рекомендации по формированию раздела 4.4, посвященного фрактальному анализу структуры овражно-балочной сети г. Саратова.

Авторы признательны научному сотруднику ИМКЭС СО РАН Ю.В. Лялину, ассистенту кафедры геоэкологии и инженерной геологии СГТУ имени Ю.А. Гагарина А.С. Шешневу и выпускнику факультета нелинейных процессов СГУ им. Н.Г. Чернышевского И.М. Минюхину за участие в подготовке отдельных разделов монографии, а также Т.Ю. Ефремовой (кафедра геоэкологии и инженерной геологии СГТУ имени Ю.А. Гагарина) за помощь при подготовке рукописи к печати.

Особую благодарность авторы выражают директору Института социального и производственного менеджмента СГТУ имени Ю.А. Гагарина Александру Сергеевичу Борщову и ректору СГТУ имени Ю.А. Гагарина, профессору Игорю Рудольфовичу Плевле за поддержку издания настоящей монографии.

1. ОСНОВЫ ФРАКТАЛЬНОЙ МЕТОДОЛОГИИ

1.1. Терминология и принципы

Фрактальная теория развивалась и получила наибольшую известность в основном при описании геометрических форм, похожих на природные объекты (горы, берега, облака и пр.), но ничего общего не имеющих с их естественным содержанием. Теперь в различных областях науки к существующим методам описания форм добавился еще один – фрактальная геометрия.

Бенуа Мандельбротом в 1975 г. было предложено словосочетанию «фрактальное множество» дать строгое математическое определение, сочетание же *естественный* или *природный фрактал* применять более свободно для естественных структур, которые с той или иной целью могут быть представлены фрактальными множествами.

Понятие фрактальности открыло принципиально новые возможности перед современными исследованиями не только в области математики и физики, но и в науках о природе и обществе, что объясняет неослабевающий интерес к теории фракталов. Во всем мире интенсивно растет число публикаций, посвященных свойствам фрактальных объектов, морфологическим, геометрическим фрактальным закономерностям, влиянию фрактальных структур среды на протекающие в ней процессы, в последнее время очень быстро развивается фрактальный анализ временной динамики процессов различного генезиса. Можно отметить несколько основных монографий (Божокин, Паршин, 2001 и др.; Кроновер, 2000; Мандельброт, 2002; Морозов, 2002; Пайтген, Рихтер, 1993; Федер, 1991; Шредер, 2001; *Fractals and chaos*, 1991), посвященных фрактальной геометрии, в которых описаны понятия, термины, методы построения и моделирования фрактальной теории.

Математическое, строгое определение фрактального множества основывается на понятии дробной размерности – *размерности Хаусдорфа – Безиковича* (Кроновер, 2000). Если правильный геометрический объект на прямой, в плоскости или в пространстве разбить на N мелких отрезков, клеток или кубиков со стороной f , то число N будет пропорционально $1/f^d$, где d – размерность объекта. Для классических геометрических объектов d является целым числом, а для фракталов оно дробное. Рассмотрим построение фрактала. Пусть N – число копий фрактального объекта, включенных внутрь исходного на первом шаге копирования, и f – коэффициент масштабирования. В общем случае можно записать, что если $N(f)$, то:

$$d = \log N / \log (1/r), \quad (1.1.1)$$

где d – размерность Хаусдорфа – Безиковича.

Одним из наиболее известных фрактальных объектов является снежинка Коха, на рис. 1.1.1 показаны этапы ее построения. Если взять копию изображения на одном из этапов построения, уменьшить ее в три раза ($r = 1/3$), то для построения копии следующего этапа необходимо 4 ($N = 4$) уменьшенных копии. Тогда $D_H = \ln 4 / \ln 3 = 1,2618$. Если рассмотреть периметр снежинки Коха, можно заметить, что после n итерации ее периметр становится в $(4/3)^n$ раз больше периметра исходного треугольника. Таким образом, при n , стремящемся к бесконечности, периметр снежинки становится бесконечно большим. Удивительным свойством является то, что она обладает периметром бесконечной длины, хотя ограничивает конечную площадь. Это свойство роднит снежинку Коха – математический фрактальный объект – с формами природных границ (очертания озер, островов и т.п.).

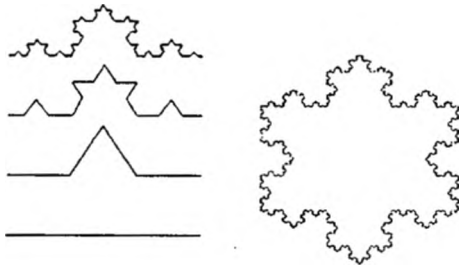


Рис. 1.1.1. Снежинка Коха и этапы её построения

Как для природных фракталов, так и для математических, длина перестает быть удобной величиной количественной характеристики периметра. Именно фрактальная размерность – мера, которая позволяет дифференцировать фракталы, полученные различными способами. Размерность Хаусдорфа – Безиковича является основной его характеристикой, будь то кривые, поверхности или объемные фигуры. Таким образом, можно сказать, что в арсенале современной науки появилась подходящая мера сложности, неидеальности, изломанности, извилистости, разветвленности, трещиноватости, изрезанности, морщинистости, пористости объектов.

В общем случае размерность Хаусдорфа – Безиковича определяется по формуле:

$$D_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N}{\ln(1/r)}, \quad (1.1.2)$$

где N – число уменьшенных копий k -го этапа построения фрактала, помещающихся в одной копии $k+1$ -го этапа построения, а $1/r$ – коэффициент подобия этих копий. При этом k может быть любым целым числом.

Применительно к идеальным объектам классической евклидовой геометрии фрактальная размерность дает те же численные значения, что и топологическая размерность. Но, совпадая со старой, топологической, размерностью на идеальных объектах, новая размерность обладает более тонкой чувствительностью ко всякого рода несовершенствам реальных объектов, позволяя различать и индивидуализировать то, что прежде было безлико и неразлично. Так, отрезок прямой, синусоиды и самых причудливых меандр неразличимы с точки зрения топологической размерности – все они имеют топологическую размерность, равную единице, тогда как их размерность Хаусдорфа – Безиковича различна и позволяет числом измерять степень извилистости (Данилов, 1993).

В 1975 г. Мандельброт определил *фрактал как множество, размерность Хаусдорфа-Безиковича которого строго больше его топологической размерности* (Мандельброт, 2002, с. 31).

Способ вычисления фрактальной размерности, рассмотренный нами для снежинки Коха, подходит лишь для регулярных, самоподобных фракталов, однако нахождение фрактальной размерности любого природного фрактала – очень сложная задача. В общем случае вычисление размерности Хаусдорфа – Безиковича для нерегулярных фракталов, алгоритмы построения которых неочевидны или случайны, сопряжено с огромными трудностями. Для того чтобы определить размерность таких, более сложных объектов, применяются разнообразные подходы, которые варьируются в зависимости от фрактального объекта (Кубрин, 2001). В этих случаях можно использовать более подходящие для каждого конкретного варианта определения размерности, например, массовая или корреляционная размерности (Федер, 1991).

Свойство природного объекта изменять свои метрические характеристики в зависимости от масштаба рассмотрения указывает на фрактальность его структуры. В этом случае фрактальную размерность можно ввести посредством зависимости размеров анализируемого объекта от масштаба его измерения:

$$L(r) = Cr^{1-D_H}, \quad (1.1.3)$$

где L – размеры объекта (длина кривой, грани или ребра формы, образующей конуса и пр.); r – коэффициент масштабирования; D_H – размерность Хаусдорфа – Безиковича; C – масштабный множитель, определенный для каждого конкретного геометрического объекта. Именно на основе этого

соотношения разрабатываются методы вычисления фрактальных показателей природных фракталов.

Объекты, имеющие фрактальную геометрию, обладают не только сложной, иррегулярной формой, но и особенными физическими свойствами: они иначе проводят тепло, ток, отражают свет и звук. Фрактальные структуры, благодаря своей нерегулярности и избыточности, хорошо противостоят повреждениям и легко восстанавливаются. Ограничивая конечный объем, фрактальные тела имеют бесконечную площадь поверхности, на которой особым образом активизируются и протекают процессы и реакции. Благодаря таким замечательным особенностям, фрактальные структуры в последнее время активно изучаются в различных областях науки и техники.

Наиболее широкое применение фрактальная теория нашла в физике (Золотухин, 1998; Смирнов, 1991; Пьетронеро, Тозатти, 1988); химии также активно используют фрактальный аппарат (Лахно, 2000; Шмидт, 2002; 2003). Медики и физиологи количественно анализируют хаотическую структуру энцефалограмм и кардиограмм методами фрактального анализа (Апищенко и др., 1997), а также исследуют анатомические и физиологические свойства фрактальных образований (нервная система, система кровеносных сосудов, желчных протоков, бронхиол, почек, легких и т.п. (Голдберг, 1990; Сандерс, 1987)). В основу новых методов сжатия информации также положено свойство самоподобия (Иванов, 2002; Ватолин, 1996).

1.2. История становления

Фрактальными являются процессы с обратной связью, в которых выходные характеристики функционально связаны с входными, причем эта связь является нелинейной. Такие процессы наблюдаются в системах совершенно различной природы, функционирующих на принципах «ресурс-потребитель» или «хищник-жертва», к этому же типу относятся и многие модели развития систем косной среды.

Н.А. Флоренсовым (1978) была предложена идея о литодинамических потоках, призванная объяснять процессы рельефообразования. Она сводится к тому, что в результате взаимодействия двух потоков происходит непрерывный обмен веществом и энергией между недрами и поверхностью земной коры. Эндогенный поток создает формы рельефа, а экзогенный разрушает их – такая схема является обобщенной моделью развития рельефа всей Земли. Однако если рассматривать формы рельефа низших генетических

рангов (долины рек, русла рек и пойму, береговые абразионные формы, овраги, формы рельефа, образованные силой ветра и пр.), то их динамику нельзя объяснить только взаимодействием эндогенных и экзогенных сил, так как связь динамики этих и многих других форм с эндогенным перемещением вещества является опосредованной и учитывать ее при их характеристике нет необходимости (Поздняков, 1988). Тем не менее, рельеф и составляющие его формы, независимо от размеров, являются результатом динамики самоорганизующихся бинарных структур, они создаются и развиваются вследствие одновременного действия двух типов энергомассобмена (Кузнецов, Поздняков, 2012; Поздняков, 2007; Pozdnyakov, 2008).

С позиции принципов самоорганизации бинарных геоморфосистем А.В. Поздняковым (1988-2007) были рассмотрены и описаны процессы выветривания пород и образования рыхлого чехла, эрозионного расчленения, развития склонов и нагорных террас, формирования поймы, закономерности образования излучин, перекатов и плесов и др. Таким образом, в общем смысле, все эти процессы и явления образуют бинарные структуры, функционирующие на принципах «ресурс-потребитель», и, следовательно, им свойствен фрактальный характер.

Можно со всей уверенностью сказать, что сама проблема фрактальности возникла из геоморфологии. Общеизвестно, что горы не являются конусами, пирамидами или треугольными призмами, береговую линию нельзя изобразить с помощью окружностей и гладких кривых. Структура реальных природных образований чаще принимает замысловатые формы, демонстрируя нам совершенно иной уровень сложности и оставив далеко позади ограничения, накладываемые евклидовой геометрией. На фиг. 2, 13, 22¹ изображены примеры проявления самоподобия в природе, так называемые *естественные фракталы*.

Идея объединить формы морских берегов, гор, речных русел, небесных объектов и противопоставить их евклидовым построениям возникла в умах людей очень давно. Некоторые фундаментальные понятия теории фракталов можно рассматривать как математическую реализацию идей, восходящих еще к воззрениям Аристотеля и Лейбница. Работы Георга Кантора, Карла Вейерштрасса, Джузеппе Пеано и других математиков XIX в. стали вехой в становлении фрактальной геометрии.

Другой импульс развития фрактальной теории был также дан геоморфологической наукой, и связан он с проблемой несоответствия длин береговых линий, границ между государствами и других природных объ-

¹ Рисунки см. в приложении «Фотографические материалы» в конце книги (с. 169-186).

ектов. Различные способы измерения длины природных границ всегда дают разные результаты. Например, в публикации Л. Ричардсона (Richardson, 1961) отмечается, что в испанских и португальских энциклопедиях приводится различная длина сухопутных границ между этими странами, причем разница составляет 20%; с точки зрения испанцев, эта длина составляет 987 км, а с точки зрения португальцев – 1214 км. Аналогичным способом «пострадала» и граница между Нидерландами и Бельгией (380 и 449 км) (Мандельброт, 2002, с. 58).

Длина обычной гладкой линии, измеренная не один раз, остается неизменной, однако многие природные объекты проявляют удивительное свойство: их длина зависит от масштаба. Таким образом, понятие длины ставит перед нами концептуальную задачу. Решение этой проблемы заключается в том, чтобы заменить понятие длины другой характеристикой протяженности природных границ. В поисках такого параметра эффективной оказалась фрактальная теория. Если рассматривать сухопутные границы, береговые линии, очертания рек не как обычные евклидовы кривые, а как фракталы, то в этом случае основной их характеристикой будет не длина, а фрактальная размерность.

Существование, с одной стороны, хаотических, изломанных, а с другой – детерминированных, самоподобных естественных форм, их количество и разнообразие позволяют говорить, по выражению Б. Мандельброта, о том, что «у геометрии природы фрактальное лицо» (Мандельброт, 2002, с. 16). Б. Мандельброту удалось открыть поистине удивительный природный мир, по-новому (или, по крайней мере, несколько иначе) взглянуть на многие, казалось бы, хорошо знакомые предметы и явления.

Несмотря на то, что изучение морфологии рельефа Земли сыграло роль побудительного мотива в становлении фрактальной теории, к сожалению, новая методология исследования формы природных объектов пока не нашла достойного применения в геоморфологии.

Хотя в последнее время и возрос интерес к фрактальной теории применительно к геоморфологическим структурам, системам, процессам (фиг. 7-11, 16-18, 21), однако еще не разработана теоретическая и методологическая основа, не раскрыта практическая значимость исследований, не выявлены фрактальные закономерности явлений.

Статьи Л. Ричардсона (Richardson, 1961) и Б. Мандельброта (Mandelbrot, 1967) представляют собой, по существу, первые работы, посвященные фрактальному анализу объектов косной среды. Луисом Ричардсоном впервые было замечено, что при увеличении масштаба и использовании различных методов измерения береговой линии Великобритании, неограни-

ченно увеличивается ее протяженность. Контуры побережья Англии «ведут себя» совсем не так, как полагается гладкой кривой.

Если измерять береговую линию или любую другую природную кривую циркулем с раствором определенной длины m (длина шага), то количество шагов, умноженное на m , будет соответствовать приближительной длине берега $L(m)$. При повторении этой процедуры несколько раз со все меньшим раствором циркуля можно ожидать, что величина $L(m)$ будет стремиться к определенному значению – истинной длине, – однако в действительности $L(m)$ будет неограниченно расти. Причина такого поведения заключается в том, что при увеличении масштаба в рассмотрение включаются все более мелкие детали исследуемой кривой. Линия берега имеет слишком неправильную форму, и поэтому ее длина не может быть непосредственно представлена как сумма длин простых геометрических кривых. Какой бы метод измерения ни был применен, результат всегда будет одинаков: длина типичного побережья всегда велика и настолько нечетко выражена, что удобнее всего считать ее бесконечной.

Основная заслуга Л. Ричардсона заключалась не столько в том, что он отметил такое поведение природных границ, сколько в обнаружении определенной зависимости их длины от масштаба измерения: для определения длины береговой линии посредством построения приближенной к ней ломаной необходимо примерно Fm^{-D_H} интервалов длины m , и, следовательно, справедлива формула $L(m) \sim Fm^{1-D_H}$. Значение показателя D_H зависит от формы и характера береговой линии (причем разные участки кривой могут давать разные значения D_H) и не зависит от выбранного способа измерения ее длины. Однако Л. Ричардсон не дал никакой теоретической интерпретации показателя D и, тем более, не связал его с понятием фрактала. Он просто рассматривал этот показатель как удобную характеристику изучаемых им природных границ.

Тем не менее, способ расчета показателя D и описанное Л. Ричардсоном поведение природных границ, т.е. закономерная зависимость их длины от масштаба измерения, дали основание Б. Мандельброту в своей статье (1967) считать подобные природные линии фрактальными объектами и рассматривать показатель D в качестве новой фрактальной меры – размерности Хаусдорфа – Безиковича.

Существует несколько принципиально разных определений размерности геометрических объектов. Топологическая размерность D_T любого множества всегда выражается целым числом: так, изолированные точки имеют нулевую размерность, прямые и кривые линии в пространстве имеют размерность 1, поверхности двумерны и т.д. Другая размерность – раз-

мерность Хаусдорфа – Безиковича – является дробной, и именно она лежит в основе фрактальной теории.

Б. Мандельброт привел свои оценки фрактальной размерности Хаусдорфа – Безиковича для нескольких береговых линий (Mandelbrot, 1967). Они изменяются в зависимости от извилистости и изрезанности контуров от почти единицы для сравнительно гладкого южного побережья Африки до 1,3 – для западного побережья Великобритании и рекордной отметки 1,52 – для изрезанного фьордами побережья Норвегии. Таким образом, фрактальная размерность заняла свое место в изучении иррегулярных природных границ.

Две эти статьи: Л. Ричардсона (1961) и Б. Мандельброта (1967) поистине являются пионерными работами в применении фрактальной геометрии к природным объектам, и именно в них было положено начало полного обновления геометрии Природы.

Помимо исследования природных границ, Бенуа Мандельброт свою новую (фрактальную) геометрию природы использовал также и для анализа, описания и моделирования природных поверхностей. Отправной точкой его исследований послужило утверждение о том, что поверхности гор представляют собой масштабно-инвариантные фигуры. Эта идея не была должным образом сформулирована и научно исследована, однако в общем смысле ее можно считать почти банальной. Б. Мандельброт в своей книге (2002) приводит цитату Эдварда Вимпера: «Достоинство упоминания и то, что форма... обломков скал... часто напоминает характерную форму тех утесов, с которых они осыпались... В этом, по всей видимости, нет ничего удивительного, если признать, что горы в своей массе более или менее однородны. И малые и большие формы образуются под воздействием одних и тех же процессов – один и тот же холод и одна и та же вода формируют и массу, и ее части».

В настоящее время, если известна фрактальная размерность, не составляет особого труда построить модель соответствующей поверхности. Этот результат является классической демонстрацией эффективности применения фрактальной теории, приводится практически во всех исследованиях по фракталам и входит в соответствующие пакеты демонстрационных программ. Однако моделировать в первом приближении любые горы с помощью должным образом подобранных фрактальных поверхностей, определяемой броуновской случайностью, впервые начал Мандельброт со своими учениками (Мандельброт, 2002).

При моделировании лесного ландшафта, горных хребтов, береговых линий, очертаний островов, флуктуаций уровня рек и других явлений ис-

пользуются случайные броуновские фракталы (Mandelbrot, 1975). Одномерная реализация броуновского движения имеет фрактальную размерность $D_H = 1,5$, а двумерная – $D_H = 2,5$. В левой части рис. 1.2.1 изображен обыкновенный броуновский рельеф из плоскости в прямую, $D_H = 5/2$. Определяющей характеристикой данного рельефа является то, что любой из его вертикальных срезов представляет собой обыкновенную броуновскую функцию из прямой в прямую. Такой рельеф не годится для моделирования поверхности Земли, так как его элементы слишком иррегулярны, что заметно невооруженным глазом.



Рис. 1.2.1. Броуновские озерные ландшафты (Мандельброт, 2002)

Модифицируя броуновские фракталы, можно получать более реалистичный горный ландшафт с меньшей размерностью. В правой части рис. 1.2.1 изображен пейзаж, представляющий собой пример дробного броуновского рельефа, размерность которого довольно близка к 2. Однако создание удачных картинок и построение фрактальных поверхностей с заданной размерностью недостаточно для моделирования реальных природных ландшафтов. Тем не менее, этот фрактальный способ демонстрирует широкие возможности моделирования и представляется весьма многообещающим. К сожалению, нам не известны работы других авторов в области применения броуновских фракталов к моделированию природных объектов.

1.3. Фрактальный анализ в геоморфологии

Несмотря на очевидную эффективность фрактальной методологии в изучении геоморфологических объектов, только спустя 20 лет после опубликования статьи Б. Мандельброта о фрактальности природных границ стали появляться работы других авторов, посвященные сходным проблемам. Фрактальный подход для анализа структуры речных и эрозийных сетей был применен некоторыми иностранными исследователями. Этим способом были изучены отдельные речные бассейны (Barbera, Rosso, 1989;

Berquist, Snow, 1985; Claps, Oliveto, 1996 и др.; McNamara, Kane, Larry, Hinzman, 1998; Snow, 1989).

Фрактальность речной сети проявляется двояко: с одной стороны, для однорукавного русла плановый рисунок может быть представлен сложной кривой, с фрактальными свойствами; а с другой стороны, много-рукавное русло, с характерной для него иерархической структурой разветвлений, также является фрактальным. Исследования свойств самоподобия проводились как для формы отдельных водотоков, так и для структуры речных сетей. По данным исследований, показатель фрактальной размерности речной и эрозионной сети варьирует между значениями 1 и 2, причем его величина зависит от геологических условий и особенностей ландшафта. В целом, исходя из анализа зарубежных литературных данных, можно сделать вывод, что существует некоторое среднее (типичное) значение фрактальной размерности для эрозионных сетей, равное 1,6-1,7 (Barbera, Rosso, 1989; McNamara, Kane, Larry, Hinzman, 1998), хотя некоторые авторы (Claps, Oliveto, 1996) при расчете фрактальных показателей речных сетей получали значения, равные ~ 1,4.

Фрактальный анализ отдельных водотоков морфологически однородных участков рек дает другие величины фрактальной размерности, которые варьируются в пределах 1,04-1,38 (Snow, 1989). Тем не менее, все зарубежные специалисты сходятся в одном: фрактальные характеристики географических объектов зависят от очень многих факторов, обуславливающих их фрактальную природу (геологические условия, тип почв, климатические особенности, степень извилистости, площадь водосборного бассейна, характер эрозионной сети).

Фрактальная природа речных и эрозионных сетей, а также разломов изучалась и в России; в частности, следует отметить работы Ю.Г. Пузаченко, Л.Н. Васильева (1992), В.И. Никора (1992), А.И. Иванова и др. (2006), И.Р. Стаховского, Т.П. Белоусова (1996, 1997), В.И. Уломова (1994), А.С. Гладкова и О.В. Луниной (2004), О.Ф. Лухневой и др. (2005), В.К. Балханова (2004), Ю.А. Калуща (2005), С.И. Шермана и др. (2001), С.А. Борнякова и др. (2003) и др.

В России развиваются несколько научных центров, в которых занимаются исследованием фрактальных закономерностей географических систем. Это – Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (г. Москва), Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск), Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Институт сейсмологии Объединенного института физики Земли имени

О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва), Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск), Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (г. Кызыл) и др.

Фрактальная методология успешно реализуется во главе с известным исследователем в области географических наук Ю.Г. Пузаченко. Его статья «Приложения теории фракталов к изучению структуры ландшафта» (1997), в которой рассматривается содержательное отношение фракталов к объектам географии и возможность использования связанных с ними представлений для исследования географических структур и их параметров, является наиболее значимой и важной в методологическом плане. На примере формирования структуры речной сети автором предлагается описание и объяснение географического содержания фрактальности. Нельзя не согласиться с автором в том, что «самоподобие объектов является фундаментальным свойством любого географического фрактала и имеет большое практическое значение, по которому определяются другие характерные особенности изучаемого объекта: 1) на соответствующем пространственно-временном интервале действуют единые физические механизмы и неизменны собственные параметры системы; 2) существует иерархическая структура, параметры которой точно определяются величиной фрактала; 3) результаты исследования процессов в одном масштабе можно простым изменением коэффициентов пропорциональности перенести на любой другой; 4) изменение типа самоподобия в пространстве – это следствие смены генетических факторов; 5) если самоподобие изменяется при изменении масштаба отображения объекта, это указывает на существование двух или большего числа независимо действующих факторов» (Пузаченко, 1997, с. 26).

Данная статья вызывает большой интерес также и тем, что в ней применяется отличная от других методика расчета параметров фрактальности реальных природных объектов. В силу своей доступности, наиболее распространенным методом получения фрактальных показателей является метод «ящичков» или квадратов, в основу которого положена методика, примененная Ричардсоном. Однако Ю.Г. Пузаченко основывается на применении метода исследования сложности (Пузаченко, 1995) и используемой в анализе временных рядов функции спектральной плотности. В данной методике широко используется математический и статистический аппарат моделирования, что, к сожалению, делает ее малодоступной для специалистов в области географии, но, с другой стороны, и это, несомненно, является основным плюсом используемой методики, она открывает большие возможности для анализа пространственной структуры с позиции фрактальной теории. Она позволяет пойти дальше в исследовании фрак-

тальной структуры объектов, чем это дает классический метод нахождения фрактальной размерности.

Получение фрактальных показателей и сопутствующих примененной методике других значений (показателей Харста, статистик Дарбина (Пузаченко, 1997)) позволило автору статьи охарактеризовать не только рельеф исследуемой территории, но и фрактальность некоторых переменных, отражающих пространственную структуру ландшафта (растительный покров по структуре сообществ, число видов, энтропию, сумму площадей сечений, выравненность и др.).

Еще одной важной особенностью предложенной методики является возможность выделения самоподобных генетически независимых структур. По результатам фрактального анализа исследуемых участков речной сети автор делает выводы о двухфакторном генезисе их структур. Размерность первого уровня имеет почти целочисленное значение, что, по мнению автора, индицирует тектоническую обусловленность структуры этого уровня (мезомасштаб). Структуры с малыми линейными размерами в основном имеют фрактальную размерность больше 1,5, что может индцировать их эрозионный или флювиогляциальный генезис (микромасштаб). В обоих случаях структуры самоподобны, и число выделяемых иерархических уровней определяется длиной ряда наблюдений и шагом опробования. При таком подходе каждый иерархический уровень связывается не с иерархией, порождаемой их фрактальностью, а с действием независимых разномасштабных факторов. Таким образом, «если использовать терминологию классического ландшафтоведения, в первом приближении можно допустить, что уровень урочищ скорее всего определяется структурой флювиогляциальных отложений, а уровень местности – тектоническими структурами» (Пузаченко, 1997, с. 40).

Методы фрактальной геометрии для географических исследований одним из первых в России применены Л.Н. Васильевым (1992). В своей работе он отмечает возможность изучения взаимного расположения компонентов геосистемы, их взаимодействия и оценки параметров пространственных структур, обладающих свойствами самоподобия, фрактальными показателями. Как пример, им приводятся данные о фрактальности структуры бассейна реки Сейм и фрактальности пространственных структур землепользования двух типов сельскохозяйственных геосистем на территории Курской области и юго-западе Польши.

В качестве фрактальных показателей структуры землепользования были вычислены фрактальная D и информационная D_i размерности. Величина фрактальной размерности является характеристикой осредненной ло-

кальной или глобальной пространственной структуры геосистемы, в то время как информационная размерность чувствительна к неоднородности. Значение D , характеризующее заполнение плоскости, возрастает в зависимости от общей площади угодий и амплитуды их размеров.

Элементы эрозионной сети часто развиваются по трещинам земной коры. Их взаимосвязь на качественном уровне очевидна: разрывные нарушения определяют сетку нарушенности земной коры на каком-либо участке, а речная сеть использует эту сетку, приспособляясь к ослабленным зонам конкретные водотоки. Однако количественное сравнение совпадения или несовпадения изучаемых сетей затруднительно, в связи с чем используется аппарат фрактальной геометрии (Гладков, Лунина, Шишкина, 2004). Объектом исследования фрактальности трещиноватой и эрозионной сети послужила речная система Прибайкалья. Данный анализ сводился к вычислению фрактальной размерности соответствующих разветвленных структур. Расчет выполнялся с помощью специально разработанной программы, в основу которой положен стандартный алгоритм (метод «ящиков» или квадратов).

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о существовании определенной иерархической зависимости рисунка трещиноватости и эрозионной сети, параметры которого точно определяются размерностью фрактала. Фрактальные размерности речных сетей укладываются в границы значений, полученных для трещиноватости, и соответствуют фрактальным размерностям трещинных сетей в крыльях разрывных нарушений. Для объяснения такого результата авторы выдвигают две гипотезы: 1) главная река приурочена к зоне крупного разлома, следовательно, большая часть ее притоков прорабатывают разрывы, определяющие зону влияния (крылья) разлома; 2) влияние некоторых экзогенных факторов приводит к некоторому усложнению пространственной структуры речной сети и, следовательно, к повышению ее фрактальной размерности.

Несомненно, данная работа представляет интерес в плане применения фрактального аппарата к исследованию разветвленных структур, находящихся в непосредственной зависимости друг с другом. Фрактальная теория здесь использована, во-первых, для описания пространственной организации трещинных рисунков в различных элементах разломно-блоковых структур разного генезиса и, во-вторых, для количественного сравнения соответствия пространственной организации экзогенной сети водотоков существующей сетке разрывов на конкретном участке земной поверхности.

Однако в исследовании Л.Н. Васильева затрагивается только геометрическая составляющая природных разветвленных структур и снова упускается из вида характер процессов, лежащих в основе их образования.

Применяя фрактальную методологию к анализу природных объектов, мы априори считаем их структуру статистически самоподобной. На наш взгляд, с помощью фрактального аппарата можно добиться желаемой полноты исследований только в том случае, если раскрыта суть явлений, в результате которых возникают самоподобные формы.

С помощью определения фрактальной размерности возможна количественная характеристика изрезанности береговой линии, служащей критерием при описании особенностей побережий, обусловленных тектоническими, морфологическими и геодинамическими факторами развития территории (Балханов, Башкуев, 2004; Лухнева и др., 2005). В ходе проведенного ими исследования установлено, что береговая линия байкальского побережья в целом характеризуется как слабоизвилистая; противоположные побережья озера имеют различные значения фрактальной размерности, при этом для восточного берега она выше, чем для западного. Однако такие выводы можно сделать на основе физической карты и без проведения фрактального анализа. Физическая суть показателей фрактальной размерности дельты р. Селенги и оз. Байкал в данных статьях не выявлена.

По мнению авторов (Иванов и др., 2006; Яшков, Иванов, 2005), аналитический метод вычисления емкостной размерности абстрактных математических фракталов непригоден для реальных фракталов. Использование классического метода нахождения фрактальной размерности природных объектов не позволяет однозначно определить ее значение с достаточной точностью, при этом можно только говорить о некотором интервале значений размерности, зависящем от выбора участков аппроксимации. Авторами предложен новый, более эффективный численный метод нахождения фрактальной размерности, который продемонстрирован как на модельных фракталах, с известным значением размерности, так и для природных фракталов, на примере овражно-балочной сети города Саратова (см. далее – параграф 4.4).

Особого внимания заслуживает работа В.И. Никоры (1992), в которой с позиции фрактального анализа проведено исследование морфологически однородных участков рек Молдовы. Автором изучены как многорукавные, так и однурукавные русла с различным типом меандрирования. В основу нахождения фрактальных характеристик планового рисунка русла положена классическая методика Л. Ричардсона (1961). Также с помощью предложенной методики были получены значения внутренних и внешних масштабов фрактальности.

На основании того, что фрактальное поведение руслового рисунка может быть обусловлено как фрактальностью собственно русла, так и фрак-

тальностью его долины, в данной работе впервые был проведен обобщенный фрактальный анализ русла, при котором исследовалась не только извилистость самого русла, но и извилистость его долины. Данная работа, на наш взгляд, является классическим примером применения фрактальной методологии к анализу пространственной структуры речных систем. Используемая автором методика эффективна и доступна; с привлечением современных численных методов она может быть усовершенствована и позволит давать достоверные показатели фрактальных характеристик.

В последние годы в ряде исследований успешно развиваются представления о нелинейности геологических процессов, о геологической среде как саморазвивающейся открытой системе (Садовский, Писаренко, 1989; Пушаровский, 1934; Рыскин, Иванов, 2003; Иванов, 2004, 2007, 2009 и др.) и о фрактальном характере многих геологических объектов (Мирлин, 2001, 2004 и др.). В частности, фрактальный анализ широко применяется для исследования самоподобия структуры сейсмичности и разрушения горных пород. Разломообразование, как и многие другие природные системы, относятся к категории открытых нелинейных систем, в исследовании которых, помимо фрактальной геометрии, применимы принципы неравновесной термодинамики, синергетики, мезомеханики. Экспериментально подтверждено, что фракталы являются информаторами процессов разломной тектоники (Борняков и др., 2003). С помощью фрактального анализа активно изучаются свойства самоподобия пространственных и временных структур в разломных системах (Аюнова и др., 2004; Борняков и др., 2003; Калуш и др., 2005; Стаховский, Белоусов, 1996; 1997; Шерман и др., 2001 и др.). Сейсмический и разломный скейлинги (масштабная инвариантность) характеризуют процесс разрушения материала земной коры как каскадный масштабно-инвариантный процесс. Кажущийся хаос в распределении неоднородностей (например, тектонических трещин) в земной коре оказывается детерминированным, т.е. подчиняется единому для широкого диапазона масштабов закону. В данных работах приведены результаты исследований характера связи сейсмичности с разломообразованием методами фрактального анализа.

Для Кавказа (Стаховский, Белоусов, 1997), Памира и Тянь-Шаня (Стаховский, Белоусов, 1996) была установлена корреляция между фрактальными размерностями разломных полей и сейсмической активностью этих регионов.

В ряде работ фрактальный анализ проводился для оценки связи сейсмичности с показателями фрактальной размерности разломов (Аюнова и др., 2004; Калуш и др., 2005). На примере анализа рельефа Алтае-

Саянской горной области и сопредельных территорий Монголии было установлено, что наибольшая сейсмическая активность приурочена к зонам с пониженной фрактальной размерностью. И.Р. Стаховским и Т.П. Белоусовым (1996) дана физическая интерпретация такой зависимости. «Сейсмичность отмечает факт накопления в среде упругой энергии, сейсмическая активность напрямую связана с энергонасыщенностью материала земной коры. В то же время энергоемкость среды лимитирована ее способностью к диссипации энергии за счет кинематической перестройки структуры путем перемещения по дизъюнктным границам, т.е. по уровням ее раздробленности или уровням разломообразования. При прочих равных условиях (например, уровне напряжения, скоростях современных движений) естественно предположить, что среда накапливает (и излучает в виде сейсмической эмиссии) тем больше упругой энергии, чем ниже значение монофрактальной размерности разломной конфигурации в данной области среды, что качественно объясняет характер соотношения сейсмической и разломной статистик» (Стаховской, Белоусов, 1996, с. 255).

В.Н. Вадковским и его коллегами (2002), по данным цифровых тектоно-геологических карт активных континентальных окраин Северной части обрамления Тихого океана, были определены фрактальные характеристики террейнов (ограниченных разломами геологических тел региональной протяженности) различного типа и возраста причленения.

Таким образом, анализ изученной литературы показал, что в настоящее время исследование в области применения фрактальной теории к геоморфологическим структурам, системам, процессам сводятся в основном к вычислению фрактальной размерности объектов и геометрической интерпретации их фрактальности.

Несмотря на то, что работа Ю.Г. Пузаченко 1997 г. является наиболее полной и содержательной в географическом плане, в ней все же не выявлены причины и не предложены механизмы формирования фрактальных структур, не сформулированы реалистичные гипотезы об их генезисе.

Предметом исследования, как правило, является геометрическая форма объектов, при этом совершенно выпадает из внимания физическая суть процессов, лежащих в основе образования фрактальных структур, не ясен механизм возникновения свойств самоподобия и масштабной инвариантности. На сегодняшний день трудно однозначно охарактеризовать геолого-геоморфологический смысл фрактальной размерности большинства исследуемых извилистых и разветвленных структур. Однако фрактальный анализ становится содержательным только в том случае, когда хотя бы на общем уровне понята его не математическая, а физическая сущность.

К настоящему времени накоплено совсем небольшое количество данных, и делать какие-либо обобщенные интерпретации возможно лишь на уровне предположений и гипотез. Изучение фрактальных закономерностей в географии находится на начальном этапе развития: происходит накопление фактурного материала, количественных данных, программного обеспечения, усовершенствование численных методов вычисления фрактальных показателей. Поскольку в основе фрактального подхода лежит новая геометрия, включающая в себя привычную нам Евклидову геометрию, то, несомненно, при исследовании геоморфологических систем такой подход очень прогрессивен, эффективен и информативен. Тем не менее, было бы ошибочно пытаться описать все структуры геоморфосистем и их компонентов фрактальными моделями множеств. Говоря словами Ю.Г. Пузаченко (1997), «фрактальные множества соответствуют классу непрерывных, нигде не дифференцируемых функций и отображают лишь один, хотя и важный класс процессов с бифуркационным характером преобразований и с выраженным стохастическим аттрактором. Однако этот класс множеств существенно шире, чем классы строго непрерывных и строго дискретных множеств, что, возможно, определяет более широкую представительность порождаемых им моделей в отображении явлений природы» (Пузаченко, 1997, с. 29).

Как справедливо было замечено Ю. Даниловым, «окружающий нас мир гораздо разнообразнее, и в нем оказалось немало объектов, допускающих фрактальное описание и не укладывающихся в жесткие рамки евклидовых линий и поверхностей. Но, тем не менее, не следует забывать о том, что и фракталы – не более чем упрощенная модель реальности, применимая к достаточно широкому, но все же ограниченному кругу предметов и явлений, и не может претендовать на роль своеобразного универсального ключа к описанию природы» (Данилов, 1993).

Вместе с тем анализ пространственной структуры рельефа земной поверхности с позиции фрактальной теории значительно расширяет возможности исследования. Изучение и количественное описание самоподобных структур позволяет не только определить иерархические уровни систем и строить модели, воспроизводящие их структуру, но и проводить анализ динамики процессов, лежащих в основе их образования, а также делать гипотезы о возможных механизмах генезиса исследуемых объектов.

2. ПРИРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ И МОДЕЛЬНЫЕ ФРАКТАЛЫ

2.1. Фрактальный анализ эрозионного рельефа¹

Физические основания фрактальных закономерностей в рельефообразовании. Фрактальные закономерности геометрии рельефа (фиг. 1) обуславливаются физическими свойствами горных пород; их устойчивостью к процессам выветривания; продуктами выветривания; денудацией. Весь рельеф поверхности Земли представляет собой сочетание склонов различной крутизны, образующихся в результате взаимодействия двух векторных сил: создающих вертикальное dy/dt , соответствующее направлению действия силы тяжести перемещение базисов (эрозии, абразии и пр.), и сил денудации (включая выветривание) dx/dt , направленной по нормали к плоскости склона (рис. 2.1.1).

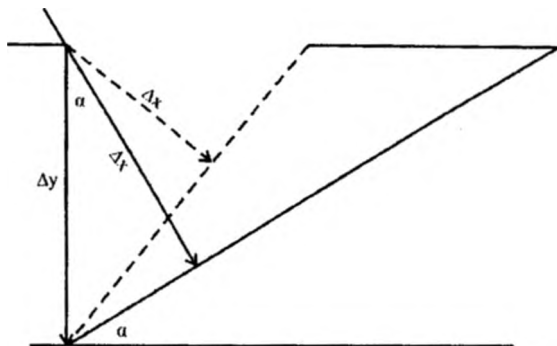


Рис. 2.1.1. Схема формирования склона в результате взаимодействия сил, определяющих вертикальное перемещение базиса денудации (y) и выветривания горных пород и денудации (x) (Мельник, Поздняков, 2007а, б)

Соотношением величин $\Delta y/\Delta t$ к $\Delta x/\Delta t$ определяется динамика рельефа. Вследствие этого длительное и более или менее равномерное снижение базисов денудации склонов (например, при врезании рек), с какой бы скоростью оно ни происходило, всегда вызывает формирование прямого склона соответствующей крутизны (Пенк, 1961; Поздняков, 1976). При этом мощность Δm денудированного слоя пород равна:

$$\Delta m = \Delta y \cdot \cos \alpha \quad (2.1.1)$$

для склона AB ;

¹ Параграф написан при участии Ю.В. Лялина.

$$\Delta m = \Delta y \cdot \cos \beta \quad (2.1.2)$$

для склона BB ,

$$\Delta m = \Delta y \cdot \cos \gamma \quad (2.1.3)$$

для склона $BГ$ (рис. 2.1.2).

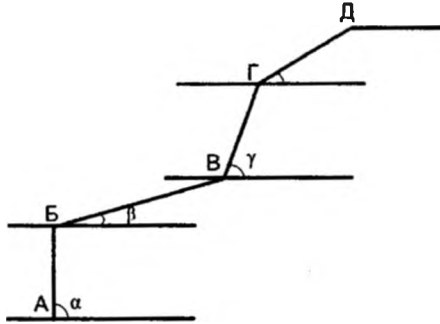


Рис. 2.1.2. Соотношение скоростей понижения базиса денудации, мощности денудируемого слоя и отступления склонов различной крутизны

Фундаментальное научно-теоретическое значение в этом взаимодействии сил состоит в том, что угол, образуемый векторами $\Delta \bar{y}(t)$ и $\Delta \bar{x}(t)$, определяет крутизну склона. Таким образом, соотношение $\cos \alpha = \Delta x / \Delta y$ характеризует зависимость крутизны склона от значений Δx и Δy . Если возрастает величина вертикального перемещения базисов (эрозии, абразии и пр.) $\Delta \bar{y}$, то и угол α тоже возрастает, а увеличение денудационных сил $\Delta \bar{x}$ приводит к уменьшению крутизны склона. Благодаря этой закономерности, по особенностям формы профиля склонов можно описывать историю изменения динамики процессов (Мельник, Поздняков, 2007а, б; Поздняков, 1976). Выпуклый профиль характеризует ускоряющееся понижение базиса склона; пологие склоны отражают медленное поднятие и преобладающее действие процессов выветривания и денудации.

Действие указанных сил проявляется в геологическом масштабе времени, поэтому динамику образуемых ими склонов невозможно адекватно определить непосредственным измерением скоростей их протекания. Профили склонов характеризуют усредненную за тысячелетия скорость развития процессов. Поэтому сохраняющееся некоторое время постоянство динамики тектонических движений и природных условий предполагает пространственную фрактализацию форм рельефа по морфометрическим признакам и по динамике – они в течение соответствующего времени находятся в *автомодельном режиме развития* (Поздняков, 1988). Процессы

рельефообразования измеряются временем, соответствующим скорости тектонических движений и скорости денудации, включая процессы выветривания (от сотых долей мм/год до нескольких мм/год). Рельефообразующие закономерности процессов денудации (включая процессы выветривания и образования слоя элювия) следуют из характерного времени t_c их развития. А оно определяется по периоду T полного оборота объема продуктов выветривания на склонах (в руслах рек и пр.), равного времени, в течение которого обломки горных пород, отделившись от коренного основания и перемещаясь на расстояние L , разрушаются до размеров псаммита и пыли (0,2 мм). Образование слоя $m(t)$ продуктов выветривания сопровождается нарастанием количества $N(t)$ обломочных частиц и суммарной площади $S(t)$ их поверхности по закону обратной положительной связи: $M(t), S(t) = f(N, S)$ (Поздняков, 1988).

Таким образом, образование элювиального слоя предполагает экспоненциальное увеличение скорости выветривания обломков. С этого момента качественно меняются физические свойства делювия – он приобретает реологические свойства, поскольку доля тонкодисперсной фракции и их суммарная площадь поверхности преобладают, в сравнении с вмещающей ими крупнообломочной фракцией. Скорость деления обломков T определяется следующим уравнением:

$$dN(t)/dt = k N(t), \quad (2.1.4)$$

где $N(t)$ – количество обломочных частиц в любое заданное время; k – коэффициент пропорциональности.

Количество обломков $N(t)$ возрастает в геометрической прогрессии, поэтому:

$$N(t) = N_0 n^{\omega t}, \quad (2.1.5)$$

где ω показывает, сколько раз обломок делится на части за время t ; n – количество частей однократного деления обломка. Суммарная площадь поверхности обломочного материала, образующегося в результате деления обломков:

$$S(t) = N(t) \cdot S_f, \quad (2.1.6)$$

где S_f – площадь поверхности одной обломочной частицы; если она имеет кубическую форму, то:

$$S_f = 6 R_f^2 \cdot 6 V_f^{2/3}, \quad (2.1.7)$$

где R – размер ребра обломка, а суммарная площадь $\sum S$ всех обломков:

$$\sum S = (V_0/n^{\omega t})^{2/3} \cdot 6 N_0 n^{\omega t}. \quad (2.1.8)$$

Отсюда можно определить характерную длину L_k , проходя которую, крупные обломки горных пород полностью дезинтегрируются.

Исследования процессов денудации показывают, что обычно $T = 50000$ лет. При этом гранулометрический состав почво-грунтов значительно изменяется – в нем увеличивается доля глинистой фракции (рис. 2.1.3, 2.1.4), следовательно, и физические свойства: влагоудерживающая способность, вязкость (внутреннее трение) и пр., определяющие подвижность материала. Поэтому скорость движения и в целом расход Q продуктов выветривания с увеличением длины L склона существенно возрастают: $Q(t) = f(L)$. Таким образом, $Q(t) = f(L)$ является важным регулирующим фактором в динамике склонов и рельефа в целом.

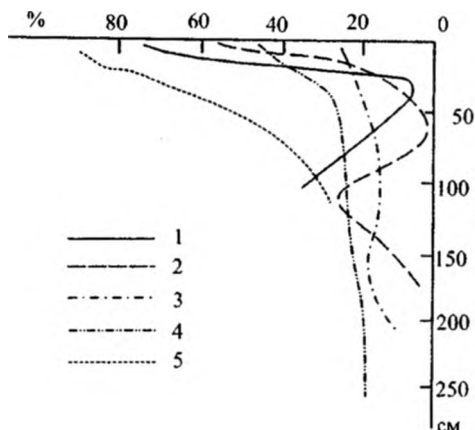


Рис. 2.1.3. Распределение мелкозема (фракция 1 мм) в толще рыхлых отложений в различных частях выпукло-вогнутого склона: 1 – верхняя; 2 – средняя; 3 – нижняя части крутого склона; 4 – верхняя; 5 – нижняя части пологого склона (составил А.Н. Махинов)

Другим регулирующим параметром в динамике склонов является мощность продуктов выветривания. С ростом толщины $m(t)$ и увеличением пористости изменяются показатели теплоемкости C и температуропроводности l , что является основной причиной уменьшения амплитуды колебания температур и существенного замедления скорости выветривания материнских горных пород. При изучении ледников установлено, например, что при увеличении мощности покрывающего ледник моренного материала до 0,5 м скорость абляции уменьшается на 80%. Другим показателем существенного ослабления сил температурного воздействия на горные породы является глубина сезонного промерзания, в умеренных широтах составляющая 1,5-2 м. По результатам исследования горных выработок, прежде всего штолен, установлено (Каякин, Комочко, Чечот и др., 1968).

что экзогенное трещинообразование прослеживается до глубин 15-20 м. В общем же оно практически прекращается на глубине 10 м, и эту величину можно считать предельной – M . И тогда нарастание мощности $m(t)$ коры выветривания будет определяться согласно уравнению (Поздняков, 1988):

$$dm/dt = M - q(t, m), \quad (2.1.9)$$

где q – расход элювия в $\text{м}^3/\text{год}$ на единицу площади (м^2).

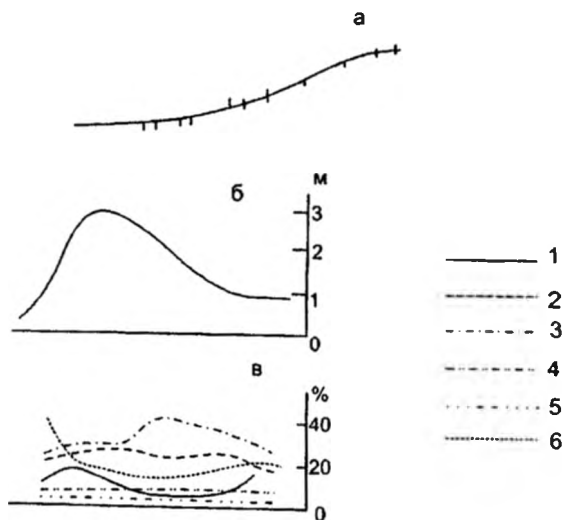


Рис. 2.1.4. Распределение мощности рыхлого чехла и его механический состав на склонах выпукло-вогнутого профиля: а – форма профиля; б – мощность чехла; в – механический состав фракции: 1 – >100; 2 – 100–50; 3 – 50–10; 4 – 10–2; 5 – 2–1; 6 – <1

Процессы выветривания в слое почво-грунтов не прекращаются, и их геоморфологические и инженерно-геологические эффекты особенно проявляются в приповерхностных горизонтах (десятьлетнем слое). По этим причинам верхние горизонты почво-грунтов до глубины 1 м представлены преимущественно мелкоземистым материалом, вязкость которого (угол внутреннего трения):

$$f(t) = f(w, q), \quad (2.1.10)$$

где w, q – влажность пород и гидравлическая крупность частиц (соответственно) при увлажнении уменьшается. В результате подвижность данного слоя существенно возрастает.

Закономерности эрозионного расчленения поверхности и изменение ее площади. Если ровная исходная поверхность расчленяется в ре-

зультате равномерного ($dy/dt = \text{const}$) врезания водотоков, то образуются склоны одинаковой крутизны α , характеризующие рельеф как поверхность равновесия (образовавшуюся вследствие того, что $\Delta\bar{y}(t)$ и $\Delta\bar{x}(t) = \text{const}$). Для процессов рельефообразования, как и формирования элювия, важной характеристикой является изменение площади поверхности, определяющей суммарную величину стока осадков и денудации. При одной и той же крутизне склонов, при условии $\Delta\bar{y}(t)$ и $\Delta\bar{x}(t) = \text{const}$, площадь S поверхности при любых морфометрических характеристиках форм рельефа (призмы, конусы, пирамиды любой высоты и размеров основания) определяется отношением:

$$S = S_0 / \cos \alpha , \quad (2.1.11)$$

где S_0 – проекция склонов на горизонтальную плоскость (рис. 2.1.5).

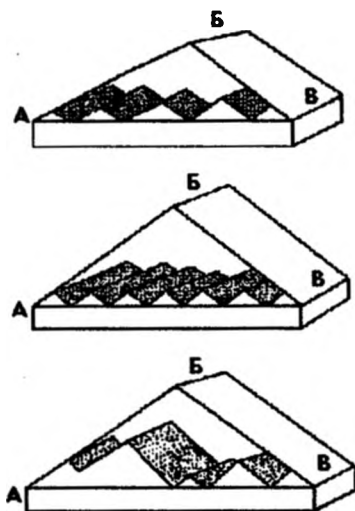


Рис. 2.1.5. Площадь расчлененной поверхности (заштрихованная) равна общей площади поверхности

Данная закономерность облегчает количественную оценку величины денудации. Учитывая, что склоны однопорядковых долин в одних и тех же тектонических и физико-географических условиях характеризуются одной и той же крутизной, имеют одинаковую форму профиля и мощность продуктов выветривания на одних и тех же элементах профиля (Поздняков, 1988; Симонов, 1972), то для определения площади поверхности рельефа достаточно измерить на карте площадь участков с равной средней крутизной.

Фрактальный анализ геометрии форм рельефа. Рассмотрим применение фрактального анализа для случая эрозионного расчленения поверхности. Пусть ровная исходная поверхность расчленяется водными потоками, врезающимися с равномерной скоростью. Выполнение данного условия приведет к образованию склонов долин одинаковой крутизны, а площадь поверхности, независимо от густоты и глубины расчленения, будет определяться соотношением:

$$S_0 / \cos^n \alpha, \quad (2.1.12)$$

где S_0 – площадь проекции рельефа на горизонтальную плоскость, а n – число генераций склонов (Поздняков и др., 1996).

Крутизна α склонов, образуемая линией, перпендикулярной тальвегу, и углом β , образуемым нормалью (линией, соответствующей направлению действия силы тяжести), не совпадает: угол $\beta > \alpha$. Нами впервые установлено, что для определения значения β необходимо знать угол α , образуемый линией, перпендикулярной тальвегу, и ее проекцией на горизонтальную плоскость, а также уклон i тальвега долины (рис. 2.1.6). Таким образом, крутизна β склона возрастает вместе с увеличением α и i согласно формуле:

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos(\cos^2 \alpha - \sqrt{\cos^4 \alpha - \cos 2\alpha + 4 \cos^2 \alpha \sin^2 i}), \quad (2.1.13)$$

где α – угол наклона склона по отношению к тальвегу; i – уклон тальвега; n – число генераций склонов.

Так, например, при i и α , равных 30° (районы высокогорья), крутизна склонов составит более 41° . Согласно этой установленной нами закономерности, истинная крутизна склонов, при постоянстве режима эрозионного расчленения поверхности (равномерном тектоническом поднятии или в условиях тектонического покоя, существенно не меняющейся во времени транспортирующей способности водотоков и эрозионной устойчивости пород), с увеличением густоты эрозионного расчленения возрастает. Связано это с тем, что уклоны продольных профилей тальвегов долин растут в направлении от долин высоких порядков (от низовьев) к долинам первого порядка, достигая в горах 20° и более. В нижних течениях рек, на равнинных участках формирования долин, уклоны тальвегов невелики и профили склонов, определяемые по линии, соответствующей направлению силы тяжести, практически совпадают с линией, перпендикулярной тальвегу (рис. 2.1.6).

Степень расчленения поверхности нарастает при движении от краев горных массивов к их центральным частям. В этом же направлении растет

число n поколений склонов, их крутизна и площадь поверхности. Причем нарастание числа форм, как и, следовательно, суммарной площади их поверхности, подчиняется фрактальной закономерности.

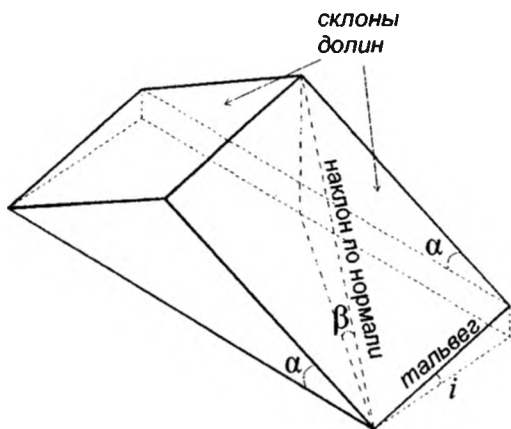


Рис. 2.1.6. Соотношение углов склонов долин. Истинная крутизна склона β – угол, образуемый нормалью (линией, соответствующей направлению действия силы тяжести) и ее проекцией на горизонтальную плоскость; α – угол, образуемый линией, перпендикулярной тальвегу, и ее проекцией на горизонтальную плоскость; i – уклон тальвега долины

Перечисленные закономерности формирования рельефа отражают его фрактальные свойства: формы рельефа, образующиеся в результате эрозионного расчленения исходной поверхности, уменьшаясь в размерах в строгой последовательности, сохраняют еще и подобие (вулканические конусы, склоны овражных систем и речных долин, барханы и дюны и пр.).

Размерность форм рельефа, образующихся в процессе роста поколений склонов, зависит от крутизны склонов (фиг. 3). Построение фрактальной поверхности рельефа основывается на том, что с ростом густоты расчленения и, следовательно, порядка долин, ширина основания форм рельефа (водоразделов долин) закономерно уменьшается. Например, расстояние между тальвегами главных долин рек Горного Алтая составляет 6–8 км, а долин первого порядка, в осевых частях хребтов, – менее 1 км.

Метод построения фрактала эрозионного рельефа сходен с методом построения самоподобных фракталов («снежинка» Коха, пыль Кантора и др.) и состоит в следующем (рис. 2.1.7). Из горизонтальной прямой $I-I$, характеризующей равнину, изымается отрезок $a-b$, характеризующий часть этой поверхности, уничтоженной эрозией. Отрезки $a-c$ и $b-c$ характеризу-

ют склоны долины первого порядка, а линия, проходящая через точку c , — ее тальвег с уклоном i . Как было описано выше, крутизна α склонов $a-c$ и $b-c$, измеряемая по линии, перпендикулярной тальвегу, меньше крутизны β этих склонов, измеряемой по нормали (см. формулу (2.1.13)). Врезающийся в склон $a-c$ водный поток образует новые долины с уклонами тальвегов $i_2 > i_1$ и, следовательно, большей крутизной ($\beta_1 > \beta$) склонов $a-d$ и $d-c$, при $\alpha = \text{const}$. С ростом порядка долин и генерации склонов, в конечном результате вся площадь будет покрыта упорядоченной сетью долин. Грани склонов, нанесенные на плоскость в порядке нарастания их генерации, образуют фрактальное множество, характеризующее изменение крутизны склонов в зависимости от порядка долин и уклонов тальвегов (рис. 2.1.8, фиг. 4).

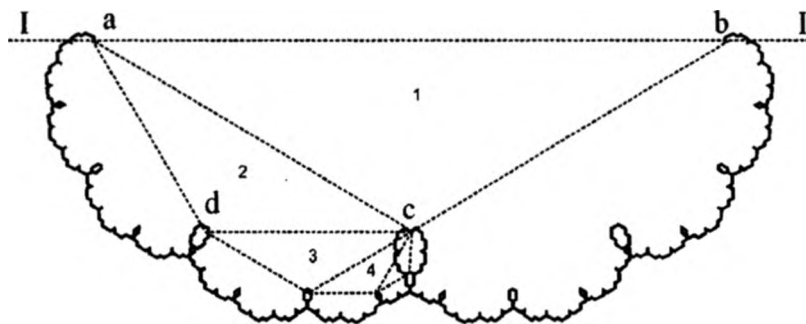


Рис. 2.1.7. Фрактальное множество форм рельефа, полученное вследствие эрозионного расчленения поверхности, с образованием склонов из 9 поколений.

Пунктиром показан алгоритм построения фрактального множества:

1, 2, 3, 4, ..., n — порядок нарастания генераций склонов

Естественно, что это отображение сочетания склонов является идеализированным, в нем допускается неизменность (по всем координатам, включая временную) физических свойств субстрата, в котором формируются долины. Тем не менее, это схематическое отображение свидетельствует о существовании фрактальной закономерности в формировании сложнорасчлененного эрозионного рельефа и о том, что крутизна склонов закономерно увеличивается по мере возрастания числа их генераций. Кроме того, такое отображение позволяет численно определить нарастание суммарной площади поверхности рельефа, а также дать объяснение объективной направленности развития планового рисунка сети эрозионных долин к спирали, с последовательным удвоением порядка водотоков.

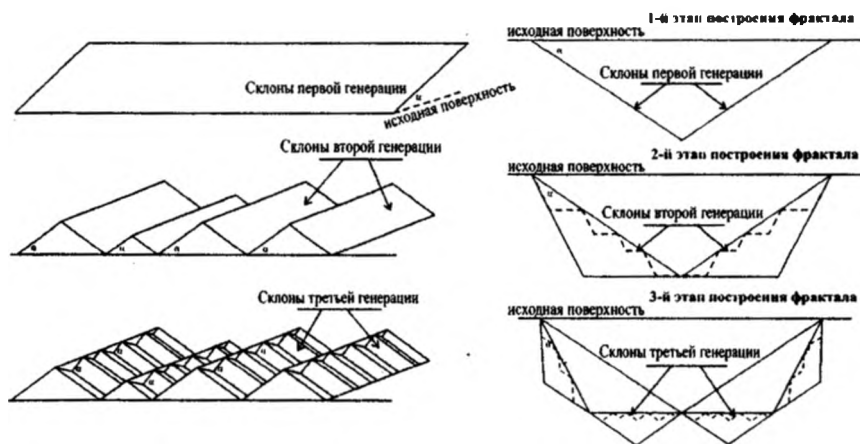


Рис. 2.1.8. Последовательность этапов построения фрактала эрозионного расчленения и его связь со склонами соответствующих генераций

Число водоразделов, с ростом густоты расчленения и образованием новых двух потоков первого порядка, увеличивается вдвое, и, таким образом, $N = 2$. А расстояние между тальвегами долин при крутизне склонов, например в 32° , уменьшается, по сравнению с исходной (той, в которую эти потоки врезаются), в $2 \cos \alpha$ раза, и, следовательно:

$$1/f = 2 \cos \alpha. \quad (2.1.14)$$

Отсюда фрактальная размерность построенного множества будет:

$$d = \log 2 / \log (2 \cos \alpha). \quad (2.1.15)$$

При расчленении поверхности с образованием склонов $\alpha=32^\circ$ фрактальная размерность составит $d = 1,3118$. Величина фрактальной размерности не только характеризует степень изломанности эрозионной поверхности, но и указывает на скорость увеличения площади поверхности рельефа и крутизны склонов.

Фрактал эрозионного расчленения и «золотое сечение». Фрактальная размерность, на наш взгляд, является достаточно удобной количественной характеристикой форм горного рельефа. Согласно современным предложениям по оценке формы геоморфологических структур, количественному описанию подвергается геометрия отдельных их макроформ, т.е. в основе подобного анализа лежит принцип дискретности. Такой подход не всегда достаточно эффективен, – морфологически однородный участок может включать в себя несколько макроформ, в том числе и разномасштабные структуры. В этом случае описание геометрии рельефа средними

величинами параметров макроформ на участке будет неоднозначным. Фрактальный же анализ позволяет достаточно полно отразить внутреннюю структуру рельефа на морфологически однородных участках.

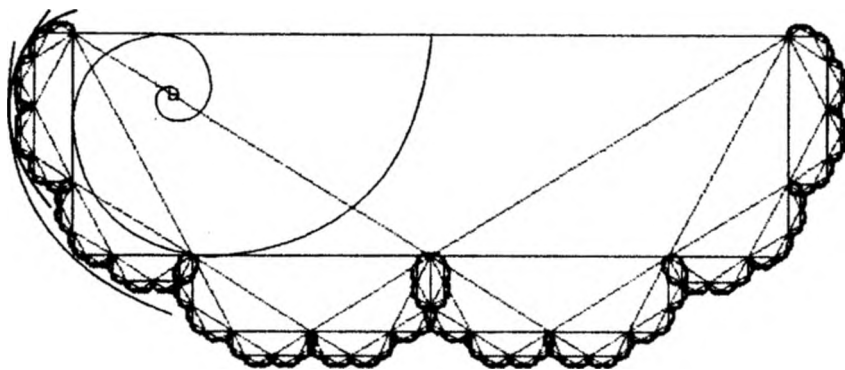


Рис. 2.1.9. Геометрическая связь фрактала эрозийного расчленения с «золотой спиралью»

Дробная величина размерности, видимо, – единственная закономерная величина, в соответствии с которой строится картина природы во всем ее многообразии. Благодаря синергетике и фрактальной геометрии стало известно, что кодом устойчивости (а значит, и симметрии) структур живой и неживой природы или универсальным алгоритмом организации системы является «золотая пропорция». Фракталы прямо связаны с «золотым сечением» и «золотой спиралью», повсеместно проявляющимися в природных процессах. Видимо, не случайным является соответствие угла естественного откоса, образуемого сыпучими веществами (мелкообломочным материалом и песком размером 2-20 мм) и равного 32° , с углом в так называемом «золотом» треугольнике, равным $31,7^\circ$: $\text{tg} = 0,618$, а $\text{ctg} = 1,618$. Построив детерминированный фрактал густо расчлененной эрозией поверхности, с образованием водоразделов с крутизной склонов $31,7^\circ$ (т.е. исходный треугольник, лежащий в основе построения нашего фрактала, будет иметь угол наклона $31,7^\circ$), получим поперечный профиль характеризуемой им поверхности, определенный «золотой спиралью». Поперечный профиль рассматриваемой поверхности представляет собой совокупность поколений склонов, каждый из которых соответствует этапу построения «золотой спирали» (рис. 2.1.9). Геоморфологический смысл «золотой спирали» заключается в увеличении крутизны склонов форм по мере увеличения их порядка (т.е. густоты расчленения), в соответствии с закономерностью:

$$\alpha_{n+1} = \arccos(\cos \alpha_n \cos \beta_n), \quad (2.1.16)$$

где α_{n+1} – крутизна склонов заданной генерации от n до $n = 1, 2, 3, \dots$; β – уклон тальвега.

Объекты, подобные фракталу со строгим геометрическим самоподобием, природе не свойственны. Рассмотренное нами фрактальное множество, естественно, является лишь базой при моделировании эрозионной поверхности. Оно выступает своего рода интегральной моделью, охватывающей и объединяющей возможные процессы рельефообразования. На этом этапе геоморфосистема рассмотрена нами как некая замкнутая система, изолированная от внешнего воздействия других природных явлений и процессов, а также без учета случайного фактора. На следующем этапе введение в алгоритм построения фрактала программы, включающей использование генератора случайных чисел, позволит учесть элементы случайности природного процесса. А после генерации случайных чисел должны последовать специфичные для каждого случая шаги, соответствующие целям и задачам данного конкретного построения. Завершающий этап представляет собой наиболее сложную, трудоемкую и ответственную задачу.

2.2. Качественные аналогии в строении природных эрозионных структур и кривой Коха¹

Самоподобие природных фракталов как фундаментальное свойство позволяет определить многие характерные особенности изучаемого объекта. Нами предпринята попытка сопоставления стадий развития эрозионной структуры с классическим фрактальным множеством – триадной кривой Коха на качественном уровне. Как классический пример эрозионной формы для анализа морфометрии рельефа выбран овраг.

Спектр возможных исследований оврага как самой распространенной формы рельефа весьма широк. В другом разделе монографии будут приведены результаты исследования фрактальных свойств овражно-балочной сети на примере территории урбосистемы Саратова (Иванов и др., 2006; Яшков, Иванов, 2005; Koronovskiy, Minyuhin, Yashkov, Ivanov, 2006).

Изучение подобия «строения ручейковой сети (наименьшего образующего элемента, «прародителя» эрозионной структуры) на склонах речной сети древовидного строения» (География овражной эрозии, 2006) дает возможность «результаты исследований процессов в одном масштабе... перенести на любой другой с помощью изменения коэффициентов про-

¹ Параграф написан при участии А.С. Шешнёва (Иванов, Шешнёв, Яшков, 2012).




порциональности» (Пузаченко, 1997). Иными словами, для понимания развития эрозионной структуры в целом достаточно изучить онтогенез какой-либо составляющей ее эрозионной формы и далее экстраполировать результаты исследований на эволюцию всей сети. Результаты детального изучения овражно-балочных сетей в полевых условиях и методами дистанционного зондирования позволяют нам предположить определенную аналогию элементов овражно-балочной сети с модельным фракталом – кривой Коха. Для качественного сравнения онтогенеза эрозионной формы и кривой Коха нами был выбран поперечный профиль овражно-балочной сети, отражающий динамику системы, морфология которой изменяется как в пространстве – по длине эрозионной структуры, так и во времени – на разных стадиях развития формы рельефа.

В современной геоморфологии детально разработана схема классического эрозионного цикла, согласно которой развитие всех эрозионных форм рельефа представляет последовательную смену одной формы другой (География овражной эрозии, 2006). На каждой стадии развития эрозионная форма приобретает принципиально новые качественные и количественные характеристики: изменяются морфология, линейные размеры, функциональные характеристики и др. В классическом варианте образование эрозионной формы можно рассматривать как последовательную смену трех основных переходящих друг в друга эрозионных элементов: овраг – балка – река. Характерной особенностью каждой стадии развития эрозионной формы является наличие множества переходных самоподобных форм. Фрактальность эрозионной структуры – классический пример самоорганизации геоморфологического пространства.

Нами рассматривается онтогенез эрозионной формы на примере оврага. Закономерности развития оврага от момента его зарождения до затухания процесса эрозии достаточно трудно проследить. Особенности внешнего строения эрозионной структуры зависят, прежде всего, от геологического возраста самой овражной системы, геологического строения территории, тектонических и климато-гидрологических особенностей территории (фиг. 12, 15, 16, 29). Поперечные профили, отражающие стадии развития эрозионной формы, изображены в табл. 2.2.1.

Построение кривой Коха начинается с единичного прямого отрезка (инициатора), который изменяется в предфрактал 1-го порядка – кривую из четырех прямолинейных звеньев, каждое из которых имеет длину $1/3$. Длина предфрактала 1-го порядка составляет $4/3$. Предфрактал 2-го порядка строится аналогично, заменой каждого звена на уменьшенный образующий элемент.

Стадии развития эрозионной формы

Эрозионная форма	Поперечный профиль	Основные морфометрические характеристики
Эрозионная борозда		Глубина до 0,5 м.
Промоина		Ширина – от 0,5 до 8 м, глубина – от 0,5 до 3 м.
Овраг		Ширина – 50 м и более, глубина – 30 м и более
Балка		См. овраг

Таким образом, «эволюция» кривой Коха состоит в пошаговой замене каждого звена предыдущего поколения на уменьшенный образующий элемент. Количество шагов-преобразований (итераций) бесконечно. При количестве итераций n , стремящемся к бесконечности, кривая Коха становится фрактальным объектом (Федер, 1991).

Процесс эрозионного расчленения создает все большее число малых эрозионных форм, которые сохраняют подобие первоначальной эрозионной формы, приобретая фрактальные свойства. При эволюции каждая последующая треугольная область ($N + 1$) поперечного профиля эрозионной формы, подобно кривой Коха, будет в $4\cos\alpha$ раз меньше площади предыдущей исходной формы (N) (Лялин, Поздняков, 2001).

Для качественного сопоставления в бассейне р. Медведицы в Лысогорском районе Саратовской области были выбраны модельные природные объекты: долины р. Жилой Рельни и оврага Ножницы. В результате детального изучения долин оврага и реки в полевых условиях и методами дистанционного зондирования построены их поперечные профили, отражающие основные стадии развития модельных геоморфологических объектов.






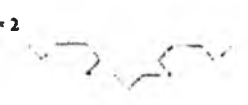

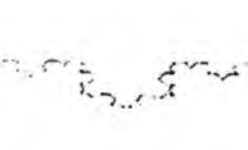
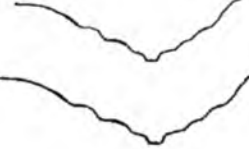

Последовательному увеличению длины кривой Коха подобен рост эрозионной долины р. Жилой Рельни в поперечном разрезе (табл. 2.2.2).

Поверхность, лишенная эрозионных элементов рельефа (повторяющая первичный рельеф), качественно подобна инициатору. Предфрактал 1-го порядка, усложненный V-образной формой, подобен зарождающейся на склоне эрозионной борозде. Эрозионная борозда представляет собой

микроформу рельефа, в которой присутствует слабая глубинная и отсутствует боковая эрозия (фиг. 15). Предфрактал 2-го порядка подобен промоине, которая увеличивает глубину и расширяется. Каждая следующая ступень эрозионного цикла соответствует увеличению порядка предфрактала. Наблюдается закономерность: при качественном изменении эрозионной формы происходит количественное изменение порядка предфрактала. При этом высшим стадиям развития эрозионной структуры – балочному рельефу (или речной сети) – будут соответствовать бесконечно сложные фракталы, что обусловлено огромным количеством очень динамичных во времени микро- и наноформ рельефа, осложняющих поперечный профиль эрозионной формы (фиг. 30, 31).

Таблица 2.2.2

Сопоставления форм поперечных профилей и «эволюции» кривой Коха

Поперечные профили долины левобережного притока р. Жилой Рельни	«Эволюция» кривой Коха
	$n = 0$ 
	$n = 1$ 
	$n = 2$ 
	$n = 3$ 
	$n = 4$ 

Поперечные профили оврага Ножницы являются природной иллюстрацией итераций, происходящих в модельном фрактале – кривой Коха (см. рис. 2.2.1). Построенные нами в результате полевых работ 14 поперечных профилей оврага Ножницы демонстрируют эволюцию оврага от

его истока (места зарождения) до устья (места впадения оврага в другую, более крупную эрозионную форму рельефа). Показательным в этой системе поперечных профилей является очевидная специалистам-геоморфологам и геологам закономерность, которая выражается в положительной динамике краевых участков эрозионной формы. Процесс донного углубления и интенсивного врезания оврага активизируется на всем его протяжении за счет «роста» самой геологической структуры. Овраг, подчиняясь деятельности глубинных процессов, динамично развивается, его поперечные профили заметно усложняются при переходе одного к другому.

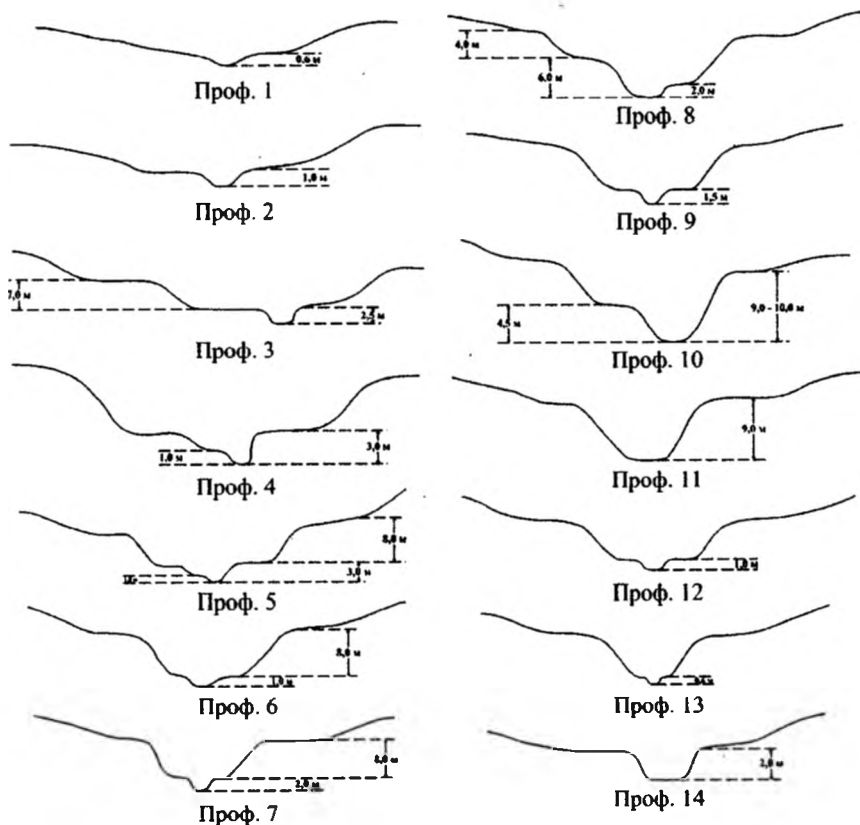


Рис. 2.2.1. Изменение поперечного профиля оврага Ножницы от устья к верховью, иллюстрирующее поведение поперечного профиля около крыльев геологических структур

При анализе рисунка поперечного профиля необходимо учитывать, что даже самые приближенные к действительности модели и картографические изображения не позволяют отобразить сложную структуру геоморфологических объектов. На фиг. 19, 20 изображен показательный геолого-геоморфологический объект, имеющий сложную фрактальную природу, – долина крупнейшего в Саратовской области Даниловского оврага (Красноармейский район). На иллюстрации видна разветвленная система притоков (промоин, оврагов разного размера и рисунка). Если все неровности, определяющие поперечный профиль Даниловской овражно-балочной сети, отобразить в виде схемы, получится изображение, качественно подобное кривой Коха. Центральной, наиболее пониженной части, будет соответствовать русло собственно Даниловского оврага, затем следуют небольшие «водоразделы» и новые понижения малых оврагов и промоин.

Сложный путь развития оврага может быть генерализирован до трех основных стадий. В течение первой преобладает глубинная эрозия, на второй она уступает по интенсивности боковой, на третьей развитие оврага затухает (см. табл. 2.2.1). На каждой следующей стадии повторяются элементы предыдущей и добавляются новые. Усложнения внутри отдельной эрозионной формы приближены качественно к фрактальным преобразованиям в математической модели кривой Коха.

Выше был рассмотрен случай классического эрозионного цикла. Рельеф земной поверхности зачастую осложняется действием линейных и площадных тектонических структур, изменяющих геоморфологический облик элементов эрозионной формы. Теоретически эрозионные формы могут прекратить свое развитие, перейти в стадию динамического равновесия, чтобы затем, в силу изменения баланса вещества в литопотоках, вновь «ожить» и продолжить развитие. В результате нередко возникают новые, более сложные эрозионные формы типа «овраг в овраге».

Близко расположенные геолого-геоморфологические структуры, устойчивые (локальные погребенные купола, интрузии) или подверженные усиленной эрозии (поперечное разрывное нарушение, оползни), вносят искажения в стандартную фрактальную картину серии поперечных профилей. Несоответствие эволюционной формы поперечных профилей для какого-либо из шагов-преобразований кривой Коха может фиксировать близость крыльев геологических структур, а также элементы разломно-трещинной сети.

Таким образом, анализ фрактальных свойств серии поперечных профилей позволяет решать при помощи аппарата нелинейной

динамики важные задачи структурной геологии и геоморфологии: посредством разработки и внедрения оригинальных методик поиска выявления и оконтуривание пространственных особенностей геологических структур и их отдельных элементов, элементов разломно-трещинной сети и др.

На современном этапе развития в пределах урбанизированных территорий многие овраги и балки, которые качественно представляли собой высокие порядки предфракталов, испытывают обратные изменения. Засыпка оврагов возвращает поверхность в положение инициатора, а высокий порядок предфрактала остается «погребенным». В геоэкологическом отношении истинная поверхность высокого порядка предфрактала представляет собой наиболее устойчивую систему, и антропогенные изменения неизбежно отражаются на экологической безопасности проживания населения и состоянии инженерных сооружений.

3. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЧНОЙ СЕТИ

3.1. Применение фрактального анализа в изучении морфологии речной сети

Общие закономерности меандрирования и бифуркаций речных русел. Речной поток и русло представляют собой один из наиболее показательных примеров саморегуляции в системах косной среды. Русловой поток – это типичный пример природного автомата, изучение динамики которого позволяет раскрыть механизмы самоорганизации, сопровождающиеся понижением энтропии.

В разное время исследователями предлагались различные гипотезы, объясняющие причины образования и существования меандрирования и бифуркации, которые до сих пор однозначно не выяснены. Самыми известными из них являются: поперечная циркуляция воды в реке; принцип минимума диссипации энергии; принцип минимизации вариации некоторого параметра случайного процесса блуждания реки; структурная турбулентность; неустойчивость прямолинейного движения потока к гармоническим возмущениям; блуждание динамической оси потока; концепция энтропии; неотектоника; геология; вращение Земли, Кориолисово ускорение; «свойство потока меандрировать»; наличие случайных препятствий; транспортирующая способность потока; расход наносов; общая денудация земной поверхности; относительная ширина поймы и другие.

Наиболее признанными гипотезами причин меандрирования являются: циркуляция потока в русле (Великанов, 1948); неустойчивость прямого русла (Замышляев, 1983; Кондратьев, 1954) и динамическая устойчивость извилистого русла (Маккавеев, 1955; Маккавеев, Чалов, 1986; Чалов, 1979).

На наш взгляд, причиной образования извилистого и разветвленного русла являются авторегуляция и направленные изменения морфологии русла и скоростного поля потока к динамически равновесному состоянию. Кратко изложим суть процесса формирования извилистого русла.

Связь скоростных характеристик водного потока, турбулентности гранулометрического состава, обломочного материала, слагающего русло. Формирование русла реки и в целом продольного профиля долины реки осуществляется под воздействием текущей воды и за счет перераспределения обломочного материала водным потоком. Транспортирующая способность реки пропорциональна ее влекущей силе, которая определяется уклоном дна, толщиной слоя воды, трением воды на стенках русла и турбулентной вязкостью потока.

Выявляется непосредственная связь между скоростными характеристиками и турбулентностью водного потока и гранулометрическим составом обломочного материала, поступающего в русло и слагающую его поверхность. При определенных значениях параметров потока, если скорость течения на дне и на стенках русла V_g больше неразмывающей скорости V_n , то есть скорости, необходимой для перемещения обломков данной крупности, нарушается устойчивость частиц грунта, слагающего русло. Происходит отрыв частиц, их перемещение потоком и в дальнейшем – переотложение. Обломки захватываются со дна и удаляются, дно понижается. При этом изменяются условия движения потока, то есть русловые деформации вызывают изменение параметров потока, скорость его убывает. Интенсивность русловых деформаций зависит от кинетичности потока и податливости материала дна и берегов размыву. Необходимым условием существования размыва будет неравенство $V_g > V_n$. При аккумуляции имеет место обратное неравенство $V_g < V_n$. Эти выражения применяются в качестве критериев размыва или накопления обломочного материала.

При этом все русло приобретает сложное морфологическое строение, которое оказывает обратное действие на общую структуру скоростного поля и турбулентность потока.

Допустим, имеется прямолинейный участок русла с равномерным уклоном и скоростью течения на дне русла, равной неразмывающей скорости V_n для обломков, сдвигающих русло, т.е. мы рассматриваем участок русла, на котором установилось равновесие между сдвигающим усилием, создаваемым лобовым давлением, касательным напряжением потока, и сцеплением (трением) частиц. Если теперь по каким-либо причинам произойдет увеличение скорости течения, то, вследствие нарушения равновесия ($V_g > V_n$), начнется размыв дна или бортов русла.

В первом случае размыв дна не может привести к образованию необходимого уклона в масштабе макроформ, существенного для свойств русла в целом, поскольку врезание реки ограничено ее общим базисом эрозии. Таким образом, значительное увеличение уклона реки невозможно. Однако даже небольшой, локальный размыв дна приводит к изменению структуры потока и формированию переката. Извлекаемый на данном участке со дна и бортов обломочный материал перемещается ниже, и уже только одно это приводит к изменению скорости течения, так как обломки, выходя на поверхность дна, уменьшают тем самым площадь сечения русла, как минимум, на величины диаметра, и в направлении течения увеличивают уклон дна. Поскольку скорость движения обломков на участке размыва дна больше, чем ниже по руслу, то мощность движущегося слоя обломков

возрастает до величины в несколько диаметров и начинается аккумуляция (еще не удалась предыдущая порция обломочного материала, как поступила новая). Следовательно, нарастает перепад высот дна, образуется обратный уклон и подпруживание воды (Поздняков и др., 1983).

Образование переката на участке размыва реки дает толчок к началу образования излучины и меандров, тем самым уменьшая средний уклон реки. Поскольку поток начинает формировать себе уклон в соответствии с крупностью обломков, то степень извилистости русла будет зависеть от разницы скорости потока на дне V_g и неразмывающей скорости V_n для обломков данной крупности.

Таким образом, для прямолинейного участка русла с равномерным течением соотношение расхода и уклона определяет скорость потока. Если скорость имеет значение выше той, что необходима для перемещения обломочного материала, слагающего русло, то возникшее несоответствие крупности обломочного материала и скорости течения приведет к тому, что река начнет увеличивать общую глубину врезания. Поскольку общий базис эрозии реки фиксирован (привязан), и она существенно врезаться не может, то, в силу стремления системы «русло-поток» к динамическому равновесию, река вынуждена понижать скорость потока. В связи с тем, что расход воды постоянен, скорость может снизиться только за счет уменьшения уклона, следовательно, река вынуждена меандрировать.

Извилистость – связь с уклоном. Надо особо отметить, что амплитуда колебания русла в горизонтальной плоскости зависит не только от скорости потока и неразмывающей скорости для обломков, слагающих русло, но и от угла отклонения струи от линии, соответствующей направлению действия силы тяжести. С возрастанием уклонов и скорости течения воды угол отклонения убывает. При больших скоростях (например, в истоках рек) поток практически не отклоняется от этого направления и колебание в горизонтальной плоскости исчезает.

Частота колебаний струи определяется ее длиной, а, следовательно, соотношением скорости в конце ее и неразмывающей скорости для обломков, поступающих с плеса. Длина струи зависит от расходов воды: с увеличением поперечного сечения и скорости течения увеличиваются размеры. Вниз по течению рек расход воды, как правило, возрастает, крупность же обломочных материалов, слагающих русло, уменьшается. В связи с этим амплитуда горизонтального колебания становится больше, а частота колебаний в обеих плоскостях уменьшается. Соответственно изменяются размеры пойменных массивов, заключенных между излучинами реки, общая глубина врезания увеличивается (Поздняков, 1988).

Физические основания фрактальности речных русел. Русловая сеть представляет собой сложный природный объект, обладающий иерархической структурой, в связи с этим для выявления ее структурных уровней и определения количественных характеристик может быть применена фрактальная теория. Все русловые образования по размеру и масштабу разделяют на три класса – микроформы, мезоформы, макроформы, – для которых роль морфологии участка русла принципиально различна (Кондратьев и др., 1982, Сидорчук, 1992 и др.). Так рифеля и бары сантиметрового размера относятся к микроформам и определяются исключительно гидравликой потока. Мезоформам соответствуют образования, соизмеримые с глубиной потока. К ним относятся ленточные гряды и побочни, образующие системы «плес-перекат». Здесь морфология русла задает размеры донных форм и примерное положение динамической оси потока. Масштаб макроформ соответствует участку русла с прилегающей к нему поймой, которая, как правило, образована деформацией именно этого участка русла. Образование макроформ отражает влияние большинства природных факторов, и для макроформ существенными становятся свойства русла как целостности.

Примером иерархии в русловом процессе служит различная степень организации транспорта наносов: движение отдельных частиц, микро- и мезоформ, развитие макроформ и формирование морфологически однородных участков русел и речных систем. Выделение иерархических уровней – весьма важная задача в связи с тем, что для русловых процессов справедлив принцип эмерджентности.

Эмерджентность русловых процессов как системы выражается в том, что каждый структурный уровень развивается по собственному закону, отличному от законов развития элементов системы (Знаменская, 1992; Русловой процесс, 1959). Действительно, если мезоформа, например побочень, развивается по своему закону развития, то следует искать этот закон, а не пытаться описать его поведение с помощью закона движения частиц, из которых он сложен и которые являются его простейшими элементами.

Для большинства рек характерно наличие достаточно протяженных участков с однородным рисунком русла. Основные параметры руслоформирования в пределах этих участков характеризуются: незначительным нарастанием стока воды и наносов по длине, малоизменяющимся уклоном дна долины и его ширины, а также однородными свойствами грунтов. Отмеченные особенности послужили основанием для того, чтобы морфологически однородные участки, где наблюдается множество однотипных

макроформ, играющих роль элементов, были выделены в особый структурный уровень (Кондратьев и др., 1982).

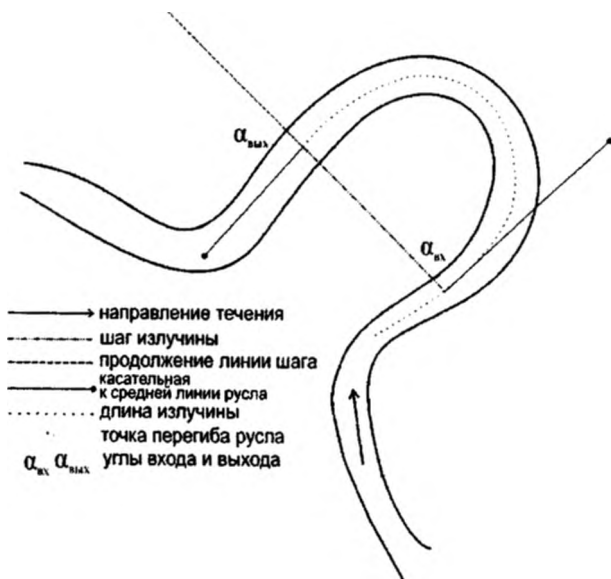


Рис. 3.1.1. Схема определения морфометрических показателей излучины русла (Каменсков, 1987)

Согласно современным представлениям, количественному описанию извилистости русла подвергается геометрия отдельных макроформ, т.е. в основе подобного анализа лежит принцип дискретности (Кондратьев, 1978). Так, для оценки свободно меандрирующего русла одна речная излучина с прилегающим пойменным массивом описывается следующими параметрами: радиус кривизны, стрела прогиба, длина русла на излучине, шаг излучины, ширина пояса меандрирования, угол входа и выхода, угол разворота и т.д. (рис. 3.1.1, Каменсков, 1987). Такой подход достаточно эффективен при анализе динамики речного русла на уровне макроформ, но, если рассматривать морфологически однородный участок реки, нередко охватывающий десятки макроформ, данное описание будет результативно только при предположении о том, что русло состоит из одинаковых, равномерно расположенных излучин. Таким образом, для адекватного описания морфологически однородного участка реки с различным расположением последовательности излучин, геометрии параметров макроформ становится недостаточно. Картина еще более усложняется, если на участке

присутствуют разномасштабные меандры. В такой ситуации описание геометрии русла средними величинами параметров излучин на участке будет неоднозначным. В связи с этим возникает необходимость во введении новых параметров, достаточно полно отражающих внутреннюю структуру руслового рисунка на морфологически однородных участках.

При решении задач поиска таких параметров эффективным оказалось понятие фракталов. Впервые фрактальный анализ для исследования речных систем был применен Б. Мандельбротом (1967) при распространении нового метода на изучение различных природных систем и объектов. Им было замечено несоблюдение размерностей в эмпирической зависимости длин рек от площадей их бассейнов, причиной этого он считал фрактальность планового рисунка русла. В дальнейшем с помощью фрактальной теории были исследованы некоторые структуры речных систем, что позволило ввести новую характеристику речной сети – фрактальную размерность.

Фрактальность планового рисунка речного русла проявляется двояко. С одной стороны, фрактальным является разветвленный рисунок речной сети, а с другой, – фрактальными свойствами обладает и рисунок отдельного водотока русла. Естественно, фрактальные свойства различных природных объектов, включая и речные системы, проявляются не во всей области масштабов, характерных для данных объектов, а лишь в определенном их диапазоне. Анализ карт различного масштаба определенного участка реки показывает, что логарифмическая зависимость длины русла от масштаба рассмотрения сохраняется не во всех масштабах, а только в интервале (m ; M). В других масштабах, не попавших в данный промежуток, свойство самоподобия исчезает. В соответствии с отмеченным, для природных фракталов разумно выделить такие параметры, как внутренний масштаб (m – наименьший, при котором сохраняются фрактальные свойства природного объекта) и внешний (M – наибольший) фрактальности. Только в этом диапазоне масштабов применение фрактального анализа правомерно и эффективно.

Н.С. Знаменская в своей работе «Гидравлическое моделирование речных процессов» (1992), применяя методологию системного подхода в изучении русловых процессов, отмечает проблему масштабного эффекта. Для идентичных систем разного размера не так просто установить их общие закономерности. Исследованная закономерность для системы одного масштаба непригодна для аналогичной системы другого масштаба, что приводит к существенным погрешностям расчета в связи с масштабным эффектом. Чтобы избежать этого, результаты увязывают, вводя некоторый

коэффициент. При моделировании это обычно масштабные коэффициенты геометрии объекта. Однако такой прием справедлив только при наличии линейных связей параметров рассматриваемого процесса. При нелинейных связях коэффициенты зависят от абсолютного размера системы. И, по мнению Н.С. Знаменской, избежать масштабного эффекта можно только посредством построения эмпирических связей изучаемых характеристик с абсолютным размером потока.

Однако, на наш взгляд, при решении подобных задач весьма эффективной может оказаться фрактальная методология. Исследование свойств самоподобия русловых процессов, получение показателей фрактальной размерности системы и определение масштабов фрактальности поможет выделить структурный уровень системы и диапазон масштабов, в котором произвольное изменение масштабов не приведет к искажению закономерностей исследуемого процесса даже при наличии нелинейных связей. Моделирование и экспериментальное исследование системы можно проводить на уровне внутреннего масштаба фрактальности и экстраполировать полученные результаты на весь диапазон фрактальных масштабов. При этом свойство самоподобия определяет логарифмическую зависимость характеристик системы, рассмотренную в разных масштабах.

Н.А. Ржаницын (1960) занимался исследованием структуры речной сети, ее морфологических и гидрологических закономерностей, в частности, им были получены зависимости основных гидрографических и гидрологических характеристик речной системы от порядка потока. Анализ полученных им результатов, совместно с исследованием свойств самоподобия структуры речной сети, позволяет раскрыть и выявить связь фрактальности с гидродинамикой русловых процессов.

Методологические подходы к фрактальному анализу речных русел. Для фрактальных кривых справедлива формула (Мандельброт, 2002), связывающая длину этой кривой с масштабом измерения:

$$L = \lambda m^{1-D_H}, \quad (3.1.1)$$

где L – длина кривой; m – масштаб измерения (цена деления измерителя); λ – масштабный множитель, определенный для каждой конкретной фрактальной линии; D_H – фрактальная размерность данной кривой.

Еще одно основное свойство фрактальных кривых – это самоподобие, т.е. любой участок кривой имеет ту же величину фрактальной размерности, что и вся кривая. С математической точки зрения, свойство самоподобия можно записать следующим образом (Мандельброт, 2002):

$$kL = \lambda (km)^{1-D_H}, \quad (3.1.2)$$

где k – коэффициент, количественно характеризующий цену деления измерителя (раствор циркуля). Из этого следует, что для измерения длины кривой в k раз длиннее изначального участка, достаточно раствора циркуля в k раз больше предыдущего.

Прологарифмировав (3.1.1), получим:

$$\lg(L) = \lg(\lambda) + (1 - D_H) \lg(m). \quad (3.1.3)$$

Примененная нами методика фрактального описания формы речных систем впервые была предложена Л. Ричардсоном (1961). Он определил, что логарифмический график зависимости длины береговых линий и других природных границ, характеризующихся извилистостью, от выбранной единицы длины аппроксимируется прямой линией с ограниченным уклоном. В дальнейшем, изучая и обобщая результаты исследований Л. Ричардсона, Б. Мандельброт (1967) связал их с понятием фракталов. Он указал на то, что этот результат выражает статистическое самоподобие, являющееся характеристикой фрактальной кривой. Тангенс угла наклона логарифмического графика этой кривой, равный $1 - D_H$, определяет фрактальную размерность данной изогнутой линии – D_H . Именно Мандельброт предложил использовать новые фрактальные характеристики для количественного описания речных систем и других изломанных естественных кривых, таких как береговые линии и границы между государствами. Вид уравнения (3.1.3), которое выражает зависимость длины кривой от масштаба измерения, объясняет описанную методику. График этой зависимости в двойном логарифмическом масштабе представляет собой линейную функцию, тангенс угла наклона которой и будет соответствовать значению $1 - D_H$. С помощью данной методики были получены фрактальные показатели некоторых однорукавных речных систем (Никора, 1992; Snow, 1989).

Фрактальный анализ однорукавного русла. Необходимо указать, что при исследовании планового рисунка однорукавного русла, фрактальный анализ проводится нами по осевой линии русла. Длина данной изогнутой линии измеряется циркулем с различной ценой деления (длиной раствора). Измерения повторяются столько раз, сколько меняется цена деления измерителя (длина раствора циркуля). Естественно, что длина измеренной линии становится тем больше, чем меньше цена деления раствора циркуля. По результатам повторных измерений исследуемого участка реки циркулем с возрастающей ценой деления строится логарифмический график зависимости (график в двойном логарифмическом масштабе) полученных значений длины от длины раствора циркуля. Каждой выбранной

цене деления измерителя (размеру раствора циркуля) соответствует определенная длина речного русла; логарифмируя значение раствора циркуля и соответствующую ему длину кривой, получаем на графике точку. Изменяя цену деления измерителя и вычисляя каждый раз длину кривой, на графике определяем множество точек. В первом приближении данный график может быть схематизирован в виде, представленном на рис. 3.1.2. Для морфологически однородных участков рек с однорукавным руслом такие логарифмические графики приобретают одну и ту же закономерную изогнутую (*S*-образную) форму, состоящую из трех частей: *a*, *b* и *c*.

Часть графика «*a*», характеризующаяся практически нулевым наклоном, соответствует измерениям длины кривой с малой ценой деления измерителя (раствора циркуля). Эта часть графика указывает, что при увеличении цены деления измерителя длина кривой почти не уменьшается, т.е. вся информация о длине сохраняется. В масштабах, соответствующих значениям раствора циркуля на этом участке графика, кривая является наиболее извилистой.

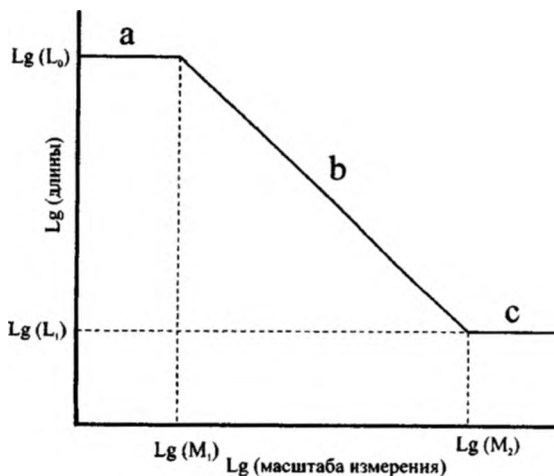


Рис. 3.1.2. Схематичное изображение графика Ричардсона

Часть графика «*b*» аппроксимирована прямой с отрицательным углом наклона. В данном случае увеличение цены деления измерителя приводит к уменьшению длины кривой, и информация о длине теряется. Тот факт, что все точки в этой части графика ложатся на прямую, свидетельствует о строгой закономерности уменьшения длины кривой с увеличением цены деления измерителя. Определение уравнения, описывающего прямую

«b» на графике, позволит сохранить теряющуюся информацию о длине. Общий вид этого уравнения следующий:

$$\lg(L) = k \lg(m) + d, \quad (3.1.4)$$

где L – длина кривой, измеренная циркулем с раствором m ; k и d – коэффициенты, определенные для каждой конкретной кривой. Уравнение (3.1.4) имеет тот же вид, что и уравнение (3.1.3), т.е. $k = (1 - D_H)$ и $d = \lg(\lambda)$. Таким образом, часть графика «b» определяет диапазон масштабов (цена деления измерителя), в которых кривую, характеризующую однорукавное русло, можно считать фрактальной, т.е. в этом диапазоне масштабов кривой присуще свойство самоподобия в среднем. Вычисление фрактальной размерности D_H кривой позволит сохранить неизменной информацию о длине и получить новую характеристику извилистости данной кривой.

Часть графика «с», как и часть «а», характеризуется прямой с малым, практически нулевым, углом наклона. Но она соответствует результатам измерения длины извилистой линии с существенно большей ценой деления измерителя. Здесь последовательное увеличение цены деления измерителя не приводит к существенному уменьшению длины кривой, поскольку измерения проводятся по слабоизогнутой ломаной или вообще по прямой. Данная часть графика указывает на то, что основная информация о длине потеряна.

Выявление регулярных компонент меандрирующих русел. Для лучшей интерпретации полученных логарифмических графиков естественных водотоков нами предлагается сначала провести подобный анализ идеализированных очертаний меандр. У графиков, построенных по методу Л. Ричардсона, для искусственно созданных русловых очертаний, представленных регулярными кривыми, выявляются некоторые закономерные характеристики (рис. 3.1.3). Это можно показать на примерах фрактального анализа различных форм излучин: омеговидных, ассиметричных, синусоидальных, заваленных и сложных. Всем логарифмическим графикам, полученным в процессе анализа различных форм излучин, присущи некоторые общие характеристики. Части «а» и «с» этих графиков имеют ту же форму, что и на рис. 3.1.2; они характеризуются очень малыми и существенно большими ценами деления измерителя. В этих диапазонах кривые, представленные сериями одинаковых излучин, ведут себя аналогично произвольной извилистой кривой.

Часть графика «b» для кривых, состоящих из одинаковых излучин, имеет некоторые особенности: существенные разрывы во множестве точек и положительный наклон аппроксимирующей прямой части графика. Сначала увеличение цены деления измерителя приводит к уменьшению длины

анализируемой кривой, как и в случае произвольной кривой. Но с определенного момента на графике наблюдается разрыв (скачок), и точки графика ложатся вдоль прямой с положительным углом наклона, т.е. увеличение цены деления измерителя сопровождается увеличением длины измеряемой кривой (поведение, противоположное рассмотренному ранее для произвольной извилистой кривой). Такая ситуация возникает, когда цена деления измерителя (длина раствора циркуля) попадает в интервал $L < m < B$, где L – длина шага излучины, а B – амплитуда (ширина пояса меандрирования). В этом случае измерения длины кривой, отображающей русло, будут проводиться по ломаным, представленным на рис. 3.1.4, и суммарная длина будет иметь низкое значение. Если цена деления измерителя превысит значение B , то на графике произойдет второй скачок, и опять будет верно правило: при увеличении масштаба измерения длина кривой уменьшается.

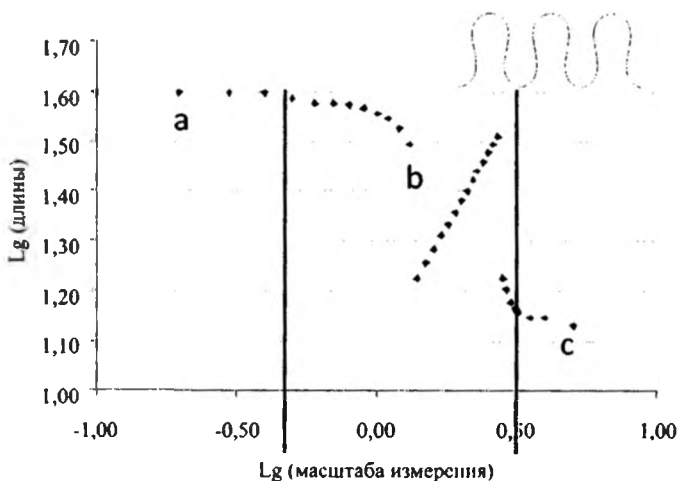


Рис. 3.1.3. Графики Ричардсона для серии регулярных омега-образных излучин

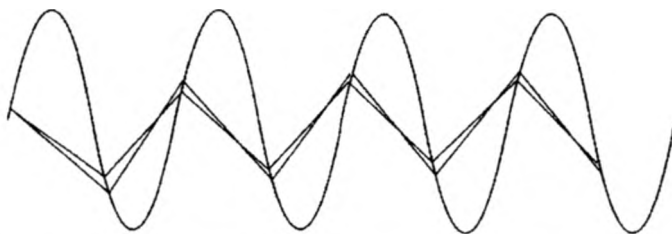


Рис. 3.1.4. Схема перемещения циркуля при измерении длины регулярной кривой

Регулярность, периодичность формы речных очертаний, наличие у них регулярных компонент может быть обнаружено посредством существенных разрывов на графике Ричардсона. Гладкость и непрерывность участка «b» графика Ричардсона указывает на то, что очертания речных форм имеют подобную степень иррегулярности в соответствующих этим участкам масштабах (ценах деления измерителя), т.е. форму русла можно считать самоподобной. Разрывы и раздробленность графика характеризуют нарушение фрактальности речной формы.

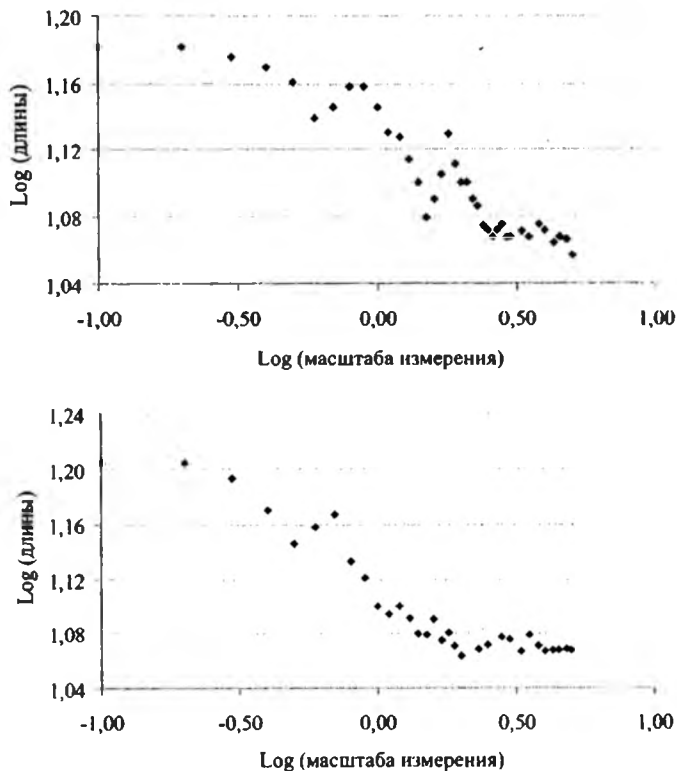


Рис. 3.1.5. Графики Ричардсона для серии регулярных излучин с параметрами, удовлетворяющими условию $L > B$. Вверху – для заваленных излучин, внизу – для синусоидальных

Интервал цен деления измерителя, которому соответствует положительный наклон тренда графика, говорит о величине шага излучины и ширине пояса меандрирования одинаковых компонент формы речных очер-

таний. По графику можно определить интервал $\lg(M_1) < \lg(m) < \lg(M_2)$, которому соответствует положительный наклон тренда, вычислить значения M_1 и M_2 , а следовательно, определить и шаг излучины, и ширину пояса меандрирования, т.е. $L = M_1$ и $B = M_2$.

Однако, если шаг излучины больше ширины пояса меандрирования, то, естественно, график Ричардсона будет иметь другой вид, по которому уже невозможно определить значения шага излучины и ширины пояса меандрирования (рис. 3.1.5).

Анализ логарифмических графиков позволяет выделить регулярные компоненты и определить некоторые параметры извилистости русла, но информацию о форме излучин с помощью данной методики получить нельзя. Графики на рис. 3.1.2 и 3.1.3 не выявляют существенных различий.

Применение данной методики по выявлению равновеликих излучин различного масштаба и определению их морфометрических характеристик для конкретного участка речного русла рассмотрено ниже, в параграфе, посвященном фрактальному анализу рек Томской области.

Фрактальное масштабирование. Величина фрактальной размерности извилистого речного русла D_p определяется с помощью формулы:

$$1 - D_H = \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.1.5)$$

где α – угол наклона тренда графика Ричардсона. Новая фрактальная характеристика русла не только определяет степень его извилистости, но и показывает, насколько сильно увеличивается длина речного участка с увеличением масштаба рассмотрения этого участка. Главная особенность сложных геометрических объектов, обладающих фрактальными свойствами, в том числе и геоморфологических структур, заключается в невозможности произвольного изменения масштаба их рассмотрения. Прямое и обратное изменение масштаба какой-либо сложной поверхности рельефа или кривой, например, характеризующей тектонические трещины, трещины в горных породах или границы побережья, линии водоразделов и государственных границ, ведет к безвозвратной потере информации о ее истинной форме и длине – длина будет уменьшаться с превращением формы в плавно изгибающуюся линию. Величина фрактальной размерности геоморфологических объектов (в частности, размерности однорукавных русел) прямо пропорционально указывает, насколько теряется информация об их размере (длине русла) при прямом и обратном изменении масштаба.

Вычисление фрактальной размерности геоморфологических объектов позволяет сохранить неизменной информацию об их морфометрии и морфологии при сколь угодно изменении масштаба рассмотрения. Соб-

ственно, в этом состоят преимущества фрактального масштабирования. В самом деле, если удастся создавать карты на основе требований фрактального анализа, то их можно будет издавать в любых масштабах без потери информации.

Продемонстрируем преимущества фрактального масштабирования на конкретном примере. Рассмотрим один и тот же участок реки Чуя на двух картах различных масштабов: 1:50 000 и 1:200 000. Как видно на рис. 3.1.6, форма русла на карте масштаба 1:50 000 представлена подробнее, а на карте масштаба 1:200 000 некоторые излучины выглядят более сглаженными, некоторые (мелкие) отсутствуют вовсе. Проанализируем степень потери информации о длине русла в случае обычного сопоставления масштабов и при использовании фрактальной методики. В первом случае длина кривой, отображающей русло на карте масштаба 1:50 000, будет иметь значение 94 см, а на карте масштаба 1:200 000 – 20 см. Соответственно, для 1:50 000 масштаба истинная длина реки будет составлять 47 км, а для масштаба 1:200 000 – 40 км. Следовательно, при переходе от одного масштаба к другому произойдет потеря информации о длине в 15%. Такую величину погрешности мы получили при увеличении масштаба всего в 4 раза, если же рассматривать карты в большем диапазоне масштабов, то потери информации о длине будут значительно выше.

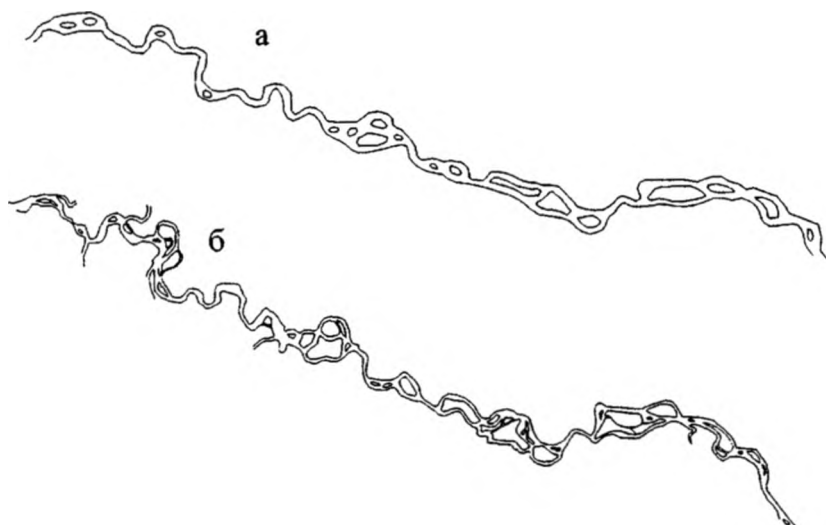


Рис. 3.1.6. Плановый рисунок участка русла р. Чуя (Горный Алтай):
а – на карте масштаба 1:200 000; б – на карте масштаба 1:50 000

Теперь применим к данному участку фрактальный анализ. Получим показатель фрактальной размерности исследуемого участка русла, на основе карты масштаба 1:50 000, равный $D_H = 1,2237$. Подставляя в (3.1.3) это значение и любую величину масштаба, найдем соответствующую этому масштабу длину. Таким образом, используя фрактальный анализ, можно получить не только длину кривой, отображающей русло реки на карте произвольного масштаба, но и решить обратную задачу. Зная длину реки на карте произвольного масштаба и значение фрактальной размерности этой кривой, можно вычислить истинную длину реки. В этом случае погрешность метода измерения и вычислений будет составлять 3%. При этом величину данной погрешности можно значительно уменьшить, если: 1) использовать электронные карты; 2) проводить измерения с использованием специально написанных программ; 3) применять усовершенствованные численные методы вычисления фрактальных показателей. Таким образом, налицо преимущество фрактального масштабирования.

Однако такие манипуляции с масштабом можно производить только в определенных пределах. Исследования естественных фракталов различного генезиса дают основания считать, что фрактальные свойства могут проявляться не во всей области масштабов, характерных для рассматриваемых объектов, а лишь в определенном их диапазоне. Следовательно, помимо фрактальной размерности, также не менее важно определить и диапазон масштабов, в которых объект остается фрактальным и сохраняет свойство самоподобия. Этот диапазон характеризуется ненулевым наклоном тренда графика и определяется неравенством: $M_1 < m < M_2$, где M_1 будем называть внутренним масштабом фрактальности, а M_2 – внешним. «Здесь M_1 – масштаб слагающих объекты элементов (в перколяционных кластерах, например, это размер молекулы) либо масштаб процессов, на котором проявляется гладкое поведение (примером являются вихри диссипативного масштаба в турбулентных течениях, где масштаб гладкости поведения определяется вязкостью жидкости). Величина M_2 соответствует длине (радиусу) корреляции. Если, например, построить объект, последовательно соединив множество идентичных отрезков фрактальной кривой с фиксированным $m = M_2$, вдоль прямой линии, то на масштабах $m > M_1$ свойство самоподобия исчезнет. Объекты, фрактальные свойства которых наблюдаются на малых масштабах и не проявляются на больших, часто называют однородными фракталами» (Никора, 1992).

В.И. Никора в своей работе «Русловые процессы и гидравлика малых рек» отмечал, что, переходя к анализу планового рисунка однорукавного русла, значения внутреннего масштаба фрактальности можно связать с ши-

риной русла B_r , а значение внешнего масштаба – с шириной днища долины реки B . Для морфологически однородных участков рек с узкой извилистой долиной, однорукавным руслом, слабо выраженной и не имеющей террас поймой, ширина дна долины реки может рассматриваться как внутренний фрактальный масштаб руслового рисунка. В качестве внешнего фрактального масштаба служит ширина полосы, покрывающей извилины долины, B_d (рис. 3.1.7). В такой ситуации, с одной стороны, величина B в первом приближении может рассматриваться как внешний фрактальный масштаб русла, а с другой, – как внутренний фрактальный масштаб долины.

Комплексный фрактальный анализ русла и долины реки дает два разных значения фрактальных размерностей: фрактальную размерность собственно русла и фрактальную размерность долины. Оба этих показателя используются для характеристики руслового рисунка.

В общем случае фрактальное поведение руслового рисунка может быть обусловлено как фрактальностью собственно русла, так и фрактальностью его долины. В этом случае к уже введенным двум масштабам русла добавляется еще один – внешний фрактальный масштаб долины.

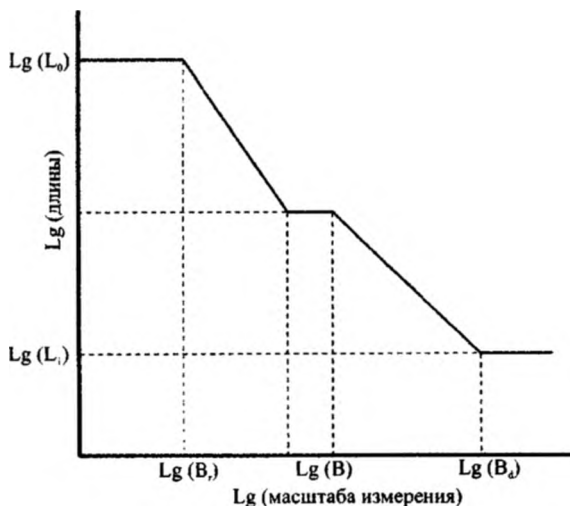


Рис. 3.1.7. Обобщенная схема фрактального анализа однорукавного русла (Никора, 1992)

Очевидно, что фрактальная размерность может рассматриваться как хороший показатель сложности объекта. Но более важно, что для системы, сохраняющей на некотором интервале масштабов одну фрактальную раз-

мерность, естественна простая связь параметров всех процессов: расходов, количества влекомых наносов, химической денудации, ширины, глубины, угла наклона, крутизны склонов и т.п.

Показатель фрактальной извилистости русла. С помощью предложенной фрактальной методики, помимо показателей фрактальной размерности и значений внутреннего и внешнего масштабов, можно получить еще один фрактальный показатель степени блуждания речного русла. Обычно используемой мерой блуждания русла является извилистость P , которая определяется отношением действительной длины русла к длине некоторого основного направления реки. Однако в данном определении длина основного направления реки используется не совсем корректно, очень широко. Обычно в исследованиях в качестве этого направления рассматривают длину прямолинейного отрезка между конечными точками русла. При этом коэффициент P считают показателем извилистости русла, которая является результатом действия потока (результатом степеней свободы речной системы). Но в этом случае учитывается также и результат основных изменений в направлении русла, обусловленных таким фактором, как внешнее ограничение в речной системе. Трудность использования и определения P заключается также и в том, что универсально применяется метод, не объективно определяющий длину речного русла.

Считается, что извилистость русла в масштабах, на один или два порядка превосходящих ширину русла, качественно отличается от извилистости, наблюдаемой в больших масштабах. Поскольку в крупномасштабных картах извилистость очертаний речных форм гораздо выше, чем извилистость этого же участка на мелкомасштабной карте, то мы предлагаем считать русловые формы фрактальными кривыми с соответствующей размерностью, характерной для определенного диапазона масштабов.

Масштабная область возрастания извилистости является общей характеристикой всех изученных нами русловых отрезков, включая отрезки с иррегулярными участками и прямолинейные отрезки. Изменение угла наклона графика Ричардсона, которое рассматривалось нами как граница между фрактальными и большими масштабами, также соответствует длине направления реки L_1 , которая учитывает излучины больших масштабов, но не учитывает возрастание блуждания, обусловленного внешним ограничением речной системы. Действительная длина русла реки L , взятая как мелкомасштабная асимптота графика Ричардсона L_0 , делится на L_1 , для получения величины *фрактальной извилистости* P_f :

$$P_f = L_0 / L_1 \quad (3.1.6)$$

(Snow, 1989). Этот метод универсально применим для однорукавных русел, он довольно объективен, но очень трудоемок. Например, трудно точно определить местонахождение точки на графике, в которой нижняя область графика сильно отклоняется от среднемасштабного (фрактального) тренда, т.е. ту точку, в которой часть графика «*b*» переходит в часть «*c*», тем не менее выбранные величины L_1 будут в незначительной степени влиять на значения фрактальной извилистости.

Фрактальный анализ речной сети. Рисунок речной сети представляет собой классический пример фрактального множества: с одной стороны, он характеризуется самоподобным разветвлением русла, а с другой, – в целом представляет сложную хаотическую, неупорядоченную структуру. Важным и объективно необходимым шагом в изучении закономерностей строения речной сети является определение фрактальной размерности, которая служит не только показателем степени ветвления русла, но и характеристикой плотности заполнения им пространства.

Авторами фрактальный анализ речной сети проведен несколькими методами.

Метод Федера. Согласно исследованиям, изложенным в монографии Федера (Федер, 1991), между длиной русла и площадью водосбора существует линейная зависимость, если эти величины отложить в логарифмическом масштабе. Угловым коэффициентом полученной прямой определяет фрактальный показатель геометрии речной сети. Эта линейная зависимость эквивалентна следующему выражению между длиной реки L и площадью ее бассейна S :

$$L = aS^{D/2}, \quad (3.1.7)$$

где a – некоторый числовой параметр, а D – показатель фрактальной размерности речной сети. Для рек северо-востока США Хэк (Федер, 1991) установил, что $a = 1,4$, а показатель фрактальной размерности $D = 1,2$. Коэффициенты, входящие в зависимость (3.1.7), не являются универсальными, и для разных речных систем они отличаются друг от друга. Формула (3.1.5) может быть переписана в виде:

$$\log_{10} L = A + B \log_{10} S, \quad (3.1.8)$$

где $A = \log_{10} a$ и $B = D/2$. Полученное уравнение представляет собой линию регрессии, отображающую связь между величинами L и S .

Метод квадратов. Другой способ подсчета показателя фрактальной размерности основывается на методе квадратов. Суть метода состоит в том, что площадь речного бассейна покрывается множеством квадратов со стороной δ ; затем подсчитывается число квадратов, покрывающих кри-

вую – $N(\delta)$, потом процесс повторяется для меньшего δ . При δ , асимптотически стремящемся к пределу $\delta \rightarrow 0$ (Федер, 1991):

$$N(\delta) = \frac{1}{\delta^D}. \quad (3.1.9)$$

В таком случае фрактальная размерность D кривой определяется как угловой коэффициент графика, $\log N(\delta)$ – как функции от $\log \delta$. Для построения графика нужно произвести подсчёт количества клеток $N(\delta)$ хотя бы для двух различных значений δ . Фрактальная размерность имеет локальный характер и определена для достаточно малых значений δ (Федер, 1991).

Мы используем модифицированный подход этого метода. Расчет фрактального показателя производился с помощью оригинального алгоритма, разработанного и апробированного авторами. Полигон для расчета определяется с помощью опорных точек, задающих его левый нижний и правый верхний углы. Опорные точки, координаты линий, координаты административных границ задаются в географической системе координат. При расчете используется метрическая система, поэтому указывается коэффициент пересчета из градусной меры по долготе и широте в метрическую. Для данных речной сети используется текстовый формат или форматы задания данных в геоинформационных системах MapInfo, ArcView. Допускается визуализация речной сети и результатов вычислений.

Метод определения размерности Хака. Расчёт фрактальной размерности речной сети с использованием теории порядка рек основывается на модели системы рек, построенной Хаком, с учётом анализа структуры речных систем, предложенного Хортоном (Поздняков, Черванев, 1990). Согласно классификации Хортонa, каждому руслу приписывается некоторый порядок, так что для рек, не имеющих притоков, порядок русла равен $i = 0$. Реки порядка i имеют притоки порядка $(i-1)$, $(i-2)$. Таким образом можно построить классификацию всех рек бассейна. Главная река имеет наибольший порядок s . Показатель длины r_i определяется как отношение средней длины рек одного порядка к средней длине реки ближайшего меньшего порядка. Это отношение приблизительно постоянно и не зависит от порядка русла.

Средняя длина реки порядка i определяется по формуле:

$$L_i = r_i L_{i-1} = r_i^i L_0, \quad (3.1.10)$$

где L_0 – средняя длина самых коротких потоков.

Показатель ветвления r_b равен отношению числа рек одного порядка к числу рек ближайшего большего порядка:

$$N_i = r_b N_{i-1} = r_b^{i-1} N_s, \quad r_b = \frac{N_i}{N_{i-1}}, \quad (3.1.11)$$

где N_i – порядок русла.

Показатель ветвления почти не зависит от порядка русла $N_s = 1$, так как имеется только одна река наивысшего порядка.

Согласно предположению Хака (Федер, 1991) для рек, текущих в выбранном русле и питающихся за счет стока с их водосбора, можно выделить область, с которой сток идет непосредственно, например, в реки второго порядка, и которая должна иметь ту же среднюю ширину d , что и область прямого стока потоков первого порядка.

Площадь растет пропорционально длине и для бассейна с порядком s будет:

$$S = \sum_{i=1}^s L_i d N_i = S_0 r_b^s \sum_{i=1}^s \left(\frac{r_i}{r_b} \right)^i \equiv S_0^{(ef)} r_b^s, \quad (3.1.12)$$

где $S_0^{(ef)}$ – эффективная площадь водосбора, относящаяся к потокам самого низшего порядка.

Отсюда нетрудно записать выражение для порядка реки s :

$$s = \frac{1}{\ln r_b} \ln \frac{S}{S_0^{(ef)}}, \quad (3.1.13)$$

Полагая в (3.1.8), что $i = s$, имеем:

$$L_s = r_i^s L_0. \quad (3.1.14)$$

Заменяя здесь s выражением (3.1.13), получаем зависимость вида (3.1.7), где:

$$D = D_s \equiv \frac{2 \ln r_i}{\ln r_b}. \quad (3.1.15)$$

По этой формуле производилось вычисление показателя D .

Методы вычисления фрактальных показателей как для однорукавных, так и для многорукавных русел находятся в стадии доработки. Использование описанных методов часто приводит к неоднозначным значениям количественных фрактальных характеристик. Строгое определение фрактальной размерности применимо для абстрактных математических множеств, демонстрирующих фрактальные свойства на бесконечном интервале характерных масштабов, в то время как природные объекты, являясь естественными фракталами, демонстрируют свойство самоподобия на ограниченном интервале пространственных масштабов (Иванов и др.,

2006). Соответственно, методы расчета фрактальной размерности, которые дают корректные результаты для абстрактных математических фракталов, могут приводить к неточным (а порой и ошибочным) результатам для естественных фрактальных объектов, встречающихся в природе. В настоящее время многие вычислители занимаются усовершенствованием методов фрактального анализа посредством применения различных численных алгоритмов, нахождением и разработкой новых методик получения фрактальных показателей для естественных фрактальных объектов.

3.2. Некоторые аспекты реконструирования и нелинейного моделирования эрозионной сети в геологическом прошлом

В геологии и геоморфологии сегодня доминирует представление о глубокой конформной взаимосвязи внутренних (эндогенных) и внешних (экзогенных) процессов на Земле (Худяков, 1977). Результатом их сложного взаимодействия и коэволюции в геологическом времени являются разнообразные по своему строению и размерам формы рельефа земной поверхности. К связанным с погребенными формами рельефа геологическим структурам и отложениям приурочены месторождения различных полезных ископаемых, что обуславливает повышенную актуальность исследования в этой области. Согласно сегодняшним представлениям, многие месторождения нефти располагаются в местах распространения локальных антиклинальных складок, которые расположены либо в пределах новейших тектонических региональных впадин, либо на их периферии. Известны также нефтяные резервуары, приуроченные к отложениям аллювиального (речного) генезиса. В геоморфологическом отношении такие отложения формируются вдоль русел (долин) речных потоков.

В последние годы все чаще появляются новаторские работы (например, Сидоренко и др., 2007 и др.), в которых для исследования свойств палеоречного рельефа применяется физико-математическое моделирование, объединяя возможности математической статистики и компьютерной обработки геологической и геоморфологической информации. В последнее время такие исследования становятся все более распространенными, и их актуальность очевидна. Попытка связать коллекторские свойства речных отложений с гидрологической моделью самой речной системы, безусловно, интересная научно-практическая задача. Возможности применения математических и физических моделей для объяснения природы геолого-геоморфологических объектов приводят к открытию их новых свойств и особенностей эволюции. В частности, применение фрактального анализа к

изучению овражно-балочных и речных систем позволяет оценить степень сложности рисунка сети, энергоопасности контрастных сочленений форм рельефа с разным рисунком сети и т.д. (Иванов и др., 2006).

Необходима оценка возможности полезных приложений теоретических и практических разработок, представленных, в частности, в работе (Сидоренко и др., 2007), в том числе: а) для дальнейшего развития и совершенствования предложенной авторами модели, путем учета в ней более широкого комплекса особенностей строения и развития геологического субстрата и рельефа; б) для объективной оценки границ применимости разрабатываемой модели; в) для адаптирования модели к изучению конкретного района, конкретного геолого-геоморфологического объекта непосредственно при решении практических геолого-разведочных задач; г) для оптимизации комплексирования методов в практике поисковых работ (Яшков, Иванов, 2007).

При описании геометрии речного бассейна важное значение приобретает надлежащая информационная база морфометрических данных. По этому вопросу существует обширная научная литература отечественных геологов и геоморфологов. Одной из классических работ по данной проблеме является монография профессора Саратовского госуниверситета В.П. Философова «Основы морфометрического метода поисков тектонических структур» (Философов, 1975), в которой он описывает применение нового подхода в изучении локальных тектонических структур – морфометрический анализ. Не углубляясь в детали методики, отметим, что с помощью морфометрического анализа по данным отрисовки порядков речных систем и их водоразделов можно выявить локальные тектонические структуры под рельефом территории, в том числе и участки погребенного рельефа для целей поисков месторождений нефти и газа.

В связи с этим разумно остановиться на отражении особенностей рисунка речной палеосети (на это сделан акцент в работе В.В. Сидоренко с соавторами, 2007) в геометрии нефтяного резервуара. Делая попытку описать новым LN-алгоритмом эволюцию речной палеосистемы от начала ее зарождения до формирования в аллювиальных толщах нефтяных резервуаров, авторы решают задачу – проследить особенности всех этапов развития речного бассейна, которые привели к возможности при имеющихся в итоге геолого-геоморфологических условиях сформироваться нефтяным ловушкам. Учитывая, что речь идет о нефтяных резервуарах руслового типа (залежи нефти формируются в погребенных речных долинах в виде «шнурковых сетей», насыщая аллювиальные отложения), необходимо учитывать историко-геологические и палеогеоморфологические закономерности

формирования осадочных толщ на поверхности речного бассейна, которые могут привести к изменению конфигурации речной сети. При дальнейшем развитии модели нам представляется целесообразным учитывать ряд аспектов, серьезно осложняющих ситуацию. Рассмотрим их подробнее:

1. *Временной аспект.* Как известно, любые палеогеографические и палеогеологические реконструкции выполняются на определенном, заранее очерченный для конкретной задачи интервал времени (период, эпоху, век, хрон). В зависимости от длительности этого интервала определяется подробность выполняемой реконструкции, достаточность исходных данных, возможность, необходимость и степень генерализации. Для рассматриваемой модели это особенно актуально в связи с темпоральностью развития речной сети и возможными значительными изменениями рисунка за историю ее существования. Подобные изменения зависят от геолого-геоморфологических условий, в которых развивается сеть. Морфологические параметры речной сети являются результатом деятельности не только современных экзо-эндогенных процессов, они фиксируются ранее существовавшими геолого-геоморфологическими условиями.

В этом контексте говорят о унаследованности, о «памяти» природной системы (Торнес, Брунден, 1981). Длительность перехода системы из одного состояния в другое контролируется одним из ее главных свойств – устойчивостью к влиянию внешних и внутренних условий во времени. В результате изменения геолого-геоморфологической обстановки на территории, речная сеть переходит в состояние релаксации – приспособления к новым, более устойчивым состояниям среды. Это означает, что новые элементы формирующейся гидрографической сети могут иметь иные, несколько отличные от древней сети, рисунок, размеры, ориентировку. Но общая унаследованность в характере и свойствах сохраняется благодаря «памяти» гидрографической сети. Такие метаморфозы обычны для всех речных систем. Возможности применения модели, видимо, пока ограничиваются временными интервалами «между соседними метаморфизирующими событиями».

2. *Морфометрический аспект.* Главные факторы формирования речных долин – тектонические и геологические особенности территории. Возможно, механизм деятельности тектонических факторов, свойства вмещающих горных пород и особенности их залегания являются сложными параметрами для использования их в расчетах LN-алгоритма, но пренебрегать ими хотя бы в теоретическом описании сущности самого процесса образования речной системы нельзя. По выражению А.В. Вострякова (цит. по В.П. Философову, 1975), изменение геологической структуры,

возникающее в результате тектонических движений, «сразу же сказывается на характере русловых процессов и вызывает изменение конфигурации гидрографической сети. План речной сети ... является своего рода индикатором или зеркалом, отражающим геологическое строение, интенсивность и направленность неотектонических движений».

В.В. Сидоренко с соавторами (2007) основное внимание в моделировании эволюции речных потоков сосредотачивают на действии «капель контрольного дождя», однако, при формировании элементов речной сети имеет место также деятельность подземных вод. Согласно их расчетам, «капля», попадая на поверхность неразмытого или частично размытого (затронутого эрозией) склона, начинает «блуждать» в поисках своего места в общем водном потоке, который, упорядочиваясь, приобретает по истечению некоторого времени черты речного потока в русле. Весь этот процесс хаотичного поведения «капель», подчиненного только случайности, называется «шагом LN-алгоритма». После нескольких таких «шагов» можно выделить речную сеть, которая именуется «синтезированной речной сетью» (Сидоренко и др., 2007).

Опуская все сложности моделирования рисунка и расчета параметров гидрографической сети, необходимо помнить, что формирование речных долин происходит с учетом определенных геолого-геоморфологических закономерностей: «долины возникают только по тем линейным разрывным нарушениям, по которым происходят подвижки и которые совпадают с векторами градиентов геопотенциалов. Вода всегда течет по направлению к большему значению силы тяжести, а поэтому и уклоны долин направлены в ту же сторону» (Философов, 1975). Для заложения русла реки необходимо определенное геологическое время, сочетание особенностей залегания пластов горных пород, направления подземных вод и ориентировки сети трещиноватости. Все это в совокупности с физико-географическими и климатическими условиями предопределяет место заложения долины реки и ее эволюцию в будущем.

В формировании рисунка речной сети, в «конкурентной борьбе» русел, выживании одних эрозионных долин и отмирании других большую роль играют особенности движений, знак и направления колебаний земной коры на данной территории. Четко формулирует эту закономерность В.П. Философов: «Одновременно со сменой направления колебаний и преобладания опусканий над поднятиями происходит перестройка долин и речных систем или их частей. Часть долин низших порядков, неглубоко врезанных в геологические напластования и получающих небольшое поверхностное и грунтовое питание, постепенно замирает, заполняясь осад-

ками, и наконец, отмирает. Наоборот, долины высших порядков, более глубоко врезаемые в пласты горных пород и получающие больше поверхностного и подземного питания, сохраняются, но порядок их уменьшаются» (Философов, 1975).

3. *Актуалистический аспект.* В науках о Земле вопрос степени аналогии современных геолого-географических процессов и явлений таковым в прошлом всегда был одним из главнейших. Его решение по мере развития геонаучных знаний претерпело кардинальные изменения: от принципа униформизма («сегодня – как всегда, значит, вчера было как сегодня») до концепции эволюции геолого-географических процессов («Эволюция геологических процессов в истории Земли», 1993). В настоящее время в науках о Земле пользуются так называемой «презумпцией актуализма», означающей, что в процессе исследований все геолого-географические процессы, явления, объекты в прошлом считаются сходными с современными, пока не доказано обратное. Формулируется также «принцип актуализма», реализуемый на практике посредством актуалистического метода с определенными ограничениями (см., например: Салтыков, Иванов, 2004).

Применительно к рассматриваемой проблематике можно констатировать, что на сегодняшний день в обширной литературе описаны существенные различия речных объектов, развивавшихся в разные временные интервалы истории Земли, и их отличия от современных рек. Так, например, для средней юры В.Ф. Салтыковым (Салтыков, 2004) на территории Нижнего Поволжья описаны реки с медленным течением, широкими плоскими долинами, блуждающими руслами и обилием мелких озер и заболоченных участков на территории бассейна. Видимо, имел место режим, отличный от такового современных рек, – реки разливались, имели иной эрозионный потенциал. Условием для такого характера рисунка послужили скорее всего климат, особенности залегания и гидрогеологические свойства известняков карбона, вмещающих речные долины.

В связи с этим и сама речная сеть в целом в разные геологические эпохи явно не может быть принята как прямой аналог современной (рис. 3.2.1). В качестве одного из ярких примеров приведем описание истории развития Волги. В течение долгого геологического развития Восточно-Европейской платформы речной сток с ее территории происходил в разных направлениях: от западного до юго-восточного. Возникновение верховий Волги относится к карбону (Морфоструктурный анализ речной сети СССР, 1979). В этот период сток речных вод из центра России в юго-восточном направлении не осуществлялся из-за возникшей в конце девона – начале карбона антиклинальной структуры. С заложением Восточно-

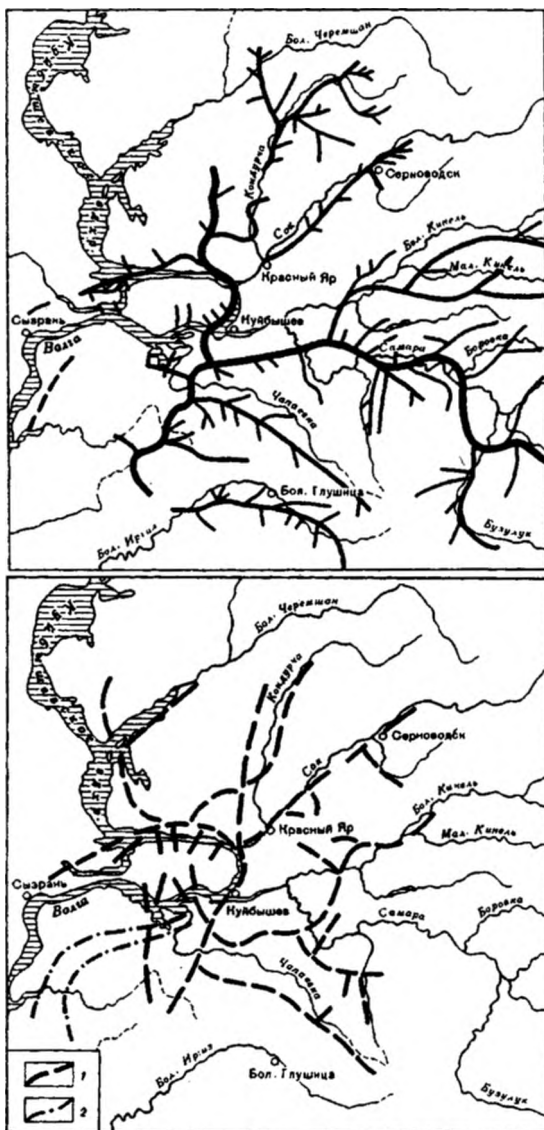


Рис. 3.2.1. Схема соотношения плиоценовой и современной речной сети Самарской и западной части Оренбургской областей: вверху – по Н.И. Беликову и данным геолого-разведочной конторы; внизу – по Г.В. Обедиянтовой, 1977; 1 – плиоценовые палеодолины по публикациям с 1949 по 1964 гг.; 2 – апшеронские палеодолины, по З.С. Чернышевой, 1960, 1962 (Коноваленко и др., 1984)

Русского прогиба в карбоне и формированием основы водораздельной зоны на широте современной Валдайской возвышенности речной сток нашел выход в восточном направлении, устремляясь в уральские бассейны и бассейны северных морей. Заложение долины самой крупной реки Европейской России было определено устойчивым однонаправленным отрицательным движением Прикаспийского бассейна. В раннем палеозое ось одной из крупнейших тектонических структур Русской платформы – Московской синеклизы была ориентирована в юго-восточном направлении, что определило речной сток из центра в сторону Прикаспия. По данным работы (Морфоструктурный анализ речной сети СССР, 1979), воды Пра-Волги и Пра-Камы сливались в раннем карбоне южнее современного устья Камы.

А.В. Ступишин при изучении палеогеоморфологии Приказанского левобережья Волги реконструировал рисунок погребенной долины Пра-Волги: «Древняя доакчагыльская извилистая Волга образовала три крупных меандры – Казанскую, Столбищенскую, Камско-Устьинскую, которые сменялись изгибами реки в сторону запада...» (Ступишин, 1948). Длина погребенной меандры на Столбищенском участке достигала более 50 км, поверхность ее была покрыта старицами, озерами и древними береговыми валами. Таким образом, Волга в зоне левобережья в местах отсутствия трудноразмываемых горных пород создавала широкие озеровидные участки.

Трансгрессии мезозойских морей привели к изменению структурно-географического плана волжского бассейна. В это время происходит соединение верхней и нижней Волги, которому способствовала тектоническая перестройка в области юго-восточного крыла Московской синеклизы. Этот процесс отличался особенной сложностью. В последующие этапы своего геологического развития долина Волги испытывала на себе влияние чередующихся трансгрессий и регрессий мезозойских и палеогеновых морей, заставлявших постоянно мигрировать русло Пра-Волги вслед за смещениями оси Волжского прогиба. Устье этой древней реки располагалось тогда на широте Баку. Именно дельтовые осадки этой Пра-Волги сформировали материнские породы нефтеносных толщ «Второго Баку». Окончательное положение русла Волги в своем среднем и нижнем течении приобрело в послехвалынское время. В начале четвертичного периода после трансгрессий акчагыльского и апшеронского морей начинается новый эрозионный цикл у рек бассейна Волги. Повторный эрозионный цикл волжские реки прошли после трансгрессии хвалынского моря. Таким образом, каждый этап морских ингрессий в волжском бассейне сменялся эрозионными циклами, в течение которых река вновь выработывала сnivelированное морскими водами русло. Сток возобновлялся в прежнем направлении. По данным рабо-

ты (Морфоструктурный анализ речной сети СССР, 1979): «современное русло Волги сдвинуто вправо на 80-100 км относительно доакчагыльского и на несколько километров относительно раннечетвертичного русла». Данный пример подтверждает имеющееся несоответствие в расположении палеодолин Волги и ее притоков с аналогичными им современными речными долинами.

Следовательно, при моделировании необходим учет выявленных различий и потенциальные допущения для различий, не выявленных на сегодняшний день для конкретной речной палеосистемы, развивавшейся в конкретный интервал геологического времени. В частности, при анализе реконструированной эрозионной сети территории Саратова (см. параграф 4.4), авторами применяются возможности фрактального анализа, позволяющие оценить значение фрактальной размерности древней эрозионной сети и ее современного аналога. Такой подход позволяет констатировать серьезные изменения в характере развития и морфометрических особенностях существующей городской эрозионной сети.

4. Морфотектонический аспект. Именно к морфотектоническим можно отнести, на наш взгляд, основные факторы, способные наиболее серьезно исказить модельную («идеальную») картину эволюции речных систем при приложении нелинейной модели к реальным территориям и конкретным геолого-географическим объектам. В качестве наиболее серьезных искажающих процессов, способных потенциально проявляться во время развития изучаемой реальной конкретной эрозионной палеосистемы, назовем следующие:

а) развитие разломно-трещинной сети, отражающей как эндотектонические особенности территории, так и экзотектонические явления;

б) осложняющие строение геологического субстрата локальные процессы и явления – развитие соляных куполов, глинистых диапиров, экзогенных мульд, овалов и блоков проседания, карстово-суффозионных форм и т.п.

Эти и другие факторы могут проявляться достаточно масштабно и исказить элементы эрозионной сети вплоть до высоких порядков. Видимо, нелинейная модель должна быть потенциально трансформируемой с учетом возможности серьезного искажения модельной картины, что определяет важную задачу для дальнейших исследований.

Учитывая сказанное, заострим внимание на сложности механизма формирования гидрографической сети, которая В.В. Сидоренко с соавторами (2007) представлена в виде сильно генерализованной гидрологической модели. Для объяснения механизма LN-алгоритма, как упрощенной

последовательной схемы отрисовки «синтезированной речной системы», потребуется раскрытие и серьезный учет в дальнейшем основных закономерностей формирования природной речной системы. При этом нельзя пренебрегать существенной ролью эндогенных факторов. В противном случае применение модели значительно ограничивается. Совместные палеогеоморфологические реконструкции речных бассейнов и оценка коллекторских свойств их отложений специалистами из разных естественнонаучных направлений – геологов, географов, физиков – способствовали бы созданию обобщенной синтетической нелинейной модели эволюции речных систем с учетом широкого комплекса известных факторов рельефообразования: особенностей геологического строения, системы трещиноватости, физико-географических, климатических и историко-геологических условий и др.

Представляется целесообразным совместное изучение междисциплинарных вопросов представителями физико-математического и геолого-географического направлений. Опыт такого взаимодействия специалистов, научных групп, кафедр получен, например, в Саратовском государственном техническом университете при изучении фрактальных свойств овражно-балочной сети территории г. Саратова (Иванов и др., 2006), проявлений самоорганизованной критичности и триггерного эффекта в эволюции эколого-геологических процессов. В настоящее время предпринимаются попытки совместного исследования физиками, геологами и географами синергетических эффектов в эволюции глобальных природных систем и общества (Иванов и др., 2007; Моделирование..., 2010).

4. РЕГИОНАЛЬНЫЙ ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Речная сеть Саяно-Тувинского нагорья

Расположение Тувы в самом центре Азиатского материка предопределило контрастность её природных особенностей, представляющих тесное переплетение ландшафтных элементов Сибири и Центральной Азии. Новейшие тектонические движения создали систему глыбовых хребтов и крупных котловин, являющихся характерными признаками для Тувы.

Тува входит в пределы обширного Саяно-Тувинского структурно-геоморфологического комплекса. Основные зоны глубинных разломов предопределили развитие современных структур Тувы. Выделены следующие типы морфоструктур: 1) межгорные впадины с унаследованным развитием, приуроченные к синклиналям и мульдам, образованные наложенным аккумулятивным рельефом, с мелкосопочными останцовыми возвышенностями (Хемчикская, Кызыльская, Убсунурская); 2) межгорные впадины с инверсионным развитием, образованные на месте опустившихся в новейший период тектонических блоков в пределах антиклинальных структур и древних массивов, с преобладанием восходящих движений (Улутхемская, Тоджинская); 3) межгорные впадины с инверсионным развитием (Зятыкова, 1977), образованные на месте опустившихся тектонических блоков, с устойчивым преобладанием нисходящих движений (Турано-Уюкская, Элегестовская, Серлигхемская, Каргинская).

В рамках проведенного нами фрактального анализа речной сети Саяно-Тувинского нагорья были рассчитаны различными методами (бассейновым методом, методом квадратов и методом, учитывающим теорию порядка рек) показатели фрактальной размерности основных речных бассейнов. Также с использованием авторской программы «Фрактальная размерность речной сети» и электронных карт исследованы фрактальные характеристики речной сети с учётом высотной стратификации, рассчитаны показатели для основных орографических элементов Саяно-Тувинского нагорья и проведен сравнительный фрактальный анализ речных систем и систем тектонических разломов.

Фрактально-морфометрический анализ рек по бассейнам. *Бассейн Большого Енисея (Бий-Хема).* Бассейн Большого Енисея (Бий-Хема) располагается в наиболее влажной, избыточной озерами и болотами части Тувы, заболоченность – 1-2%, озёрность до 22%, залесённость от 51 до 88%. В центре его лежит обширная Тоджинская котловина. В верхней трети течения Большой Енисей представляет собой типичную горную реку,

широкие участки долины сменяются узкими коридорами, в русле реки появляются перекаты и водопады.

Водосборный бассейн Большого Енисея резко асимметричен. Все крупные притоки: Тоора-Хем, Хам-Сыраа, Сыстыг-Хем, Хут и другие впадают в Бол. Енисей справа (табл. 4.1.1). Левые притоки (Улут-О, О-Хем, Тапса) значительно короче и менее водоносны. Некоторые из левых притоков в верховьях имеют широкие корытообразные долины, сохранившие следы оледенения, их русла изобилуют валунами, сильно порожисты, текут они часто в глубоких ущелистых долинах. К низовьям долины резко сужаются, что является результатом блокового поднятия, по краям которого образуется сильный врез, перепад уклонов. Верхняя часть бассейна Большого Енисея и его притока Хам-Сыраа отличаются большой озерностью. Наиболее крупные озера расположены в бассейнах Хам-Сыраа, Ия и Тора-Хем, площади зеркал некоторых из них (Тоджа, Ушпе-Холь, Манны-Холь и др.) достигают 30-50 км². Реки, принадлежащие бассейну Большого Енисея, имеют смешанное питание с преобладанием снегового.

Их водные режимы в основном соответствуют горным рекам: имеют затяжное весеннее половодье, которое обусловлено неоднородным таянием снега на разных высотах и выпадением дождей в этот период.

Таблица 4.1.1

Характеристика основных притоков р. Б. Енисей¹

Приток	Расстояние от устья Бий-Хема, км	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Расход воды определен с использованием ГИС, м ³ /с
Серлиг-Хем (левый)	382,2	108,9	2954	26,7
Баш-Хем (правый)	361,9	95,83	1417	17,2
Харал (левый)	351,5	66,7	1104	7,4
О-Хем (левый)	319,7	68,4	1376	11,7
Тора-Хем (правый)	265,7	161,4	2768	33,9
Ий (правый)	253,6	78,9	1031	11,7
Хамсара (правый)	223,6	224,3	4754	58,7
Систиг-Хем (правый)	196,3	122	4337	35,4
Сейба (правый)	140,7	52,4	898,1	27,5
Хут (правый)	129,4	66	1604	46,7
Улут-О (левый)	111,2	101,1	1821	65,5
Оджа (правый)	82,4	72	1352	9,4
Уюк (правый)	57,4	112	2978	16,9
Тапса (левый)	22,2	74,8	1114	10,4

¹ Морфометрические сведения получены с применением геоинформационных технологий, ГИС «Гидроэнергетические ресурсы Республики Тува» (Чупикова и др., 2004).

Весеннее половодье сливается с летне-осенними паводками дождевого происхождения. Начало половодья – в мае, а окончание – в июне. Средняя продолжительность 66 дней, наибольшая 75 дней, минимальная 46 дней. Фаза подъема уровня воды в реках составляет 36 дней, а фаза спада в среднем на 6 дней короче (30 дней). Продолжительность половодья год от года сильно колеблется в зависимости от климатических факторов, а также увеличивается с увеличением площади водосбора и его высоты.

Используя теоретические основы фрактальных исследований, приведем результаты фрактального анализа реки Большой Енисей.

На основе электронной карты Тувы (масштаб 1:1 000 000) и инструментария геоинформационных систем «ArcInfo» и «ArcView», были определены длины рек и площади бассейнов, составляющих Большой Енисей. Для расчета фрактальной размерности рассматривалась площадь бассейна водной системы от точки впадения притока в основное русло реки и вверх по течению вплоть до его истока. Длина реки и площадь водосбора определялись по электронной карте. Использование последней существенно упрощает (в сравнении с традиционно применяемыми в гидрологии методами измерений, с помощью циркуля-измерителя, курвиметра и палеток при измерении площадей) определение числа рек, суммарной длины их водотоков и площадей бассейнов. Расчет проводился описанным выше методом Федера (Федер, 1991). Результаты расчётов представлены на рисунках точками. По оси абсцисс отложены значения логарифма площади, по оси ординат логарифма длины водотоков. Из рис. 4.1.1 видно, что точки с высокой точностью ложатся на прямые вида (2). Определяя тангенс угла наклона прямой, находим величину фрактального показателя D .

На рис. 4.1.1 представлен график зависимости площади бассейна Большого Енисея (Бий-Хема) от длины реки в логарифмическом масштабе. Расчет коэффициентов линейной функции дает: $A = -0,37$, $B = 0,61$ и, соответственно, $D = 1,22$ и $a = 0,43$. Коэффициент детерминации R^2 равен $R^2 = 0,994$, т.е. практически совпадает с 1. Разброс точек относительно прямой линейной регрессии невелик и определяется дисперсией, равной 0,04.

Для расчёта фрактальных показателей речной сети модифицированным клеточным методом была создана программа «Фрактальная размерность речной сети», написанная нами на языке FOXPRO-6.0. Программа использует данные электронных карт речной сети, оцифрованные с топографических карт и содержащие координаты кривых, преобразованные в текстовый формат. Изображение экрана программы с результатами подсчётов показано на рис. 4.1.2.

Значение показателя фрактальной размерности Большой Енисей составляет $D = 1,25$.

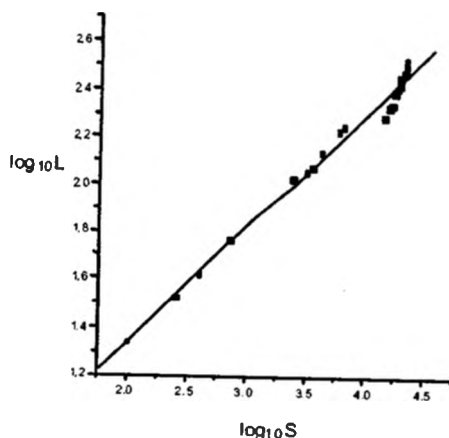


Рис. 4.1.1. Зависимость длины реки (L) Большой Енисей от площади бассейна (S)

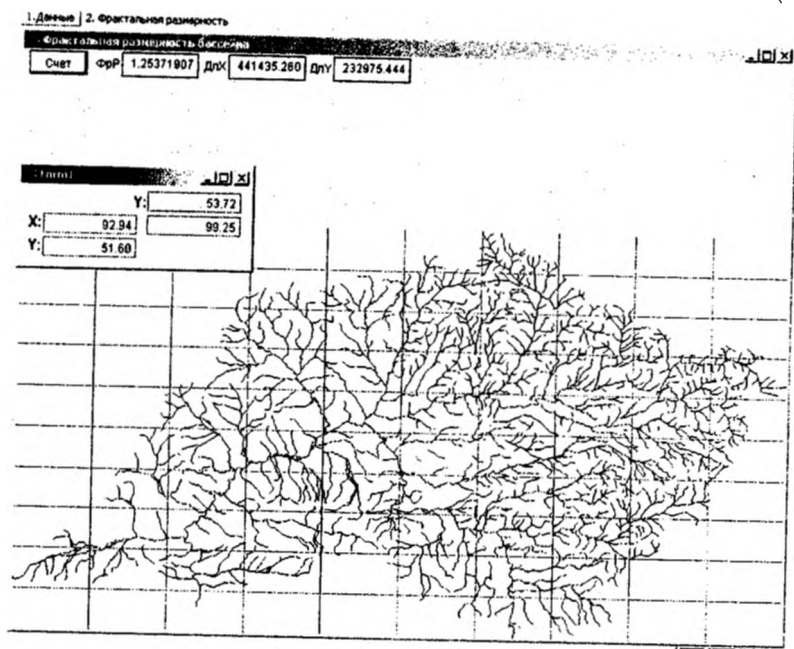


Рис. 4.1.2. Изображение экрана программы «Фрактальная размерность речной сети» для бассейна Большой Енисей (Бий-Хем)

Бассейн Малого Енисея (Каа-Хема). *Малый Енисей* – левая составляющая Верхнего Енисея – образуется при слиянии рек Кызыл-Хем и Балыктыг-Хем. Бассейн Малого Енисея вытянут в широтном направлении и асимметричен, треть площади его водосборного бассейна лежит за пределами Тувы в Монголии. Заболоченность бассейна в пределах Тувы составляет от 0 до 1%, залесённость – от 13 до 70%, озерность – от 0 до 1%.

Кызыл-Хем – берет свое начало в Монголии, где носит название Гунанн-Гол. Река быстрая стремительная, почти на всем протяжении течет в глубоком ущелье, прорезая гранитные скалы, образует большое количество порогов и шиверов.

Балыктыг-Хем – в верховьях долина реки несет следы деятельности ледников. Балыктыг-Хем пересекает Тере-Хольскую котловину, принимая многочисленные мелкие притоки. Исток Балыктыг-Хема находится в южных отрогах восточной части хребта Остроконечный Танну-Ола, в 12 км к северо-западу от горы Биче-Ингилик (2796 м). Здесь водораздел проходит по хребту нагорья Сангилен (3200 м). Река имеет смешанный тип питания с преобладанием дождевого: снеговое 30%, дождевое 50%, подземное 20%. Конец весеннего половодья смыкается с началом дождевого паводочного периода. Летне-осенняя межень наблюдается в сентябре-октябре, её продолжительность составляет 25-60 дней. Характерна длительная и устойчивая зимняя межень, составляющая 140-150 дней, а также образование наледей. Характеристика основных притоков р. Каа-Хем приведена в табл. 4.1.2.

Таблица 4.1.2

Характеристика основных притоков р. Малый Енисей

Приток	Расстояние от устья, км	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Расход воды определен с использованием ГИС, м ³ /с
Билин (правый)	305,75	116,1	3096	64,6
Балыктыг-Хем (левый)	219,7	285,2	12020	256,2
Унжей (правый)	203	44,91	533,5	3,02
Ханга (правый)	186,6	48,29	594,4	13,5
Улуг-Шивей (правый)	165,4	90,4	1410	7,0
Ужеп (правый)	164,8	62,77	1047	5,5
Мизим (левый)	132,7	68,7	843,4	4,6
Бурен (левый)	104,4	129	5819	29,6
Дерзик (правый)	96,8	87	1620	9,4
Копто (правый)	76,3	52,3	582	12,8
Эми (правый)	431,1	52,8	568,3	9,5
Каргы (левый)	332,9	100,5	3728	17,9

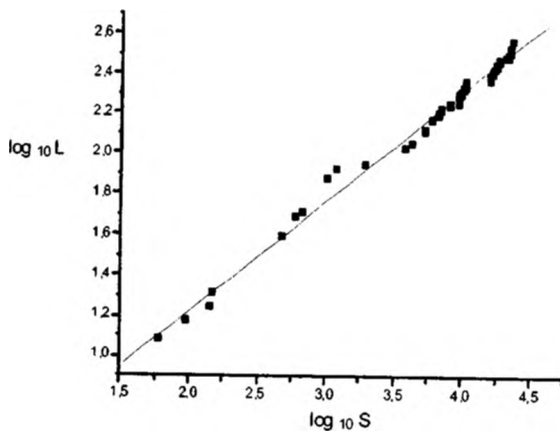


Рис. 4.1.3. Зависимость длины р. Малый Енисей (Каа-Хем по Гунаин-Гол) от площади бассейна

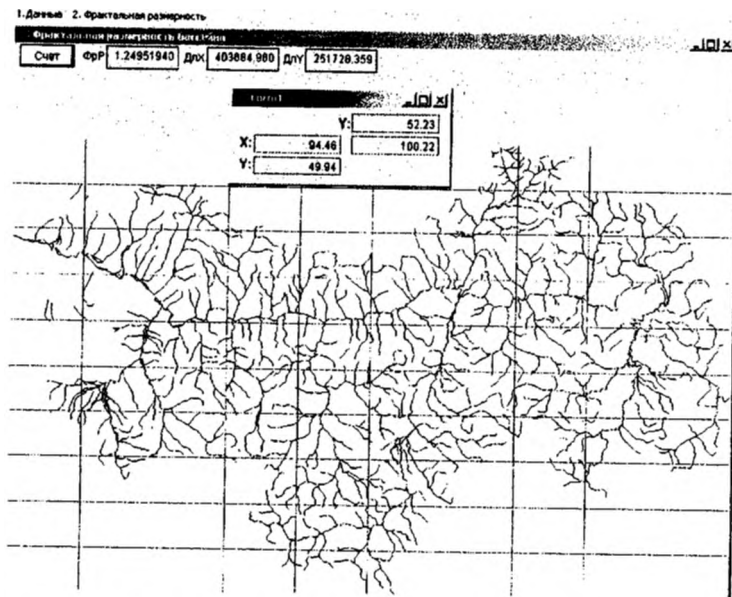


Рис. 4.1.4. Вид экрана программы «Фрактальная размерность речной сети» для бассейна Малый Енисей (Каа-Хем)

Малый Енисей отличается вдвое меньшей относительной водоносностью по сравнению с Большим Енисеем, а также менее равномерным режимом стока, что выражается высокими паводками Малого Енисея. Причиной,

по-видимому, является размещение его водосборного бассейна в непосредственной близости к пустынным ландшафтам Северной Монголии и меньшая, чем у Большого Енисея, залесённость и заозеренность бассейна.

На рис. 4.1.3 показан график зависимости площади бассейна Малого Енисея (Каа-Хема) от длины реки в том же логарифмическом масштабе. Для бассейна Малого Енисея параметры уравнения таковы: $A = 0,131$, $B = 0,57$, $D = 1,14$, $a = 1,35$, при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,995$, а дисперсия 0,033. Значение показателя фрактальной размерности реки Каа-Хем, определённое модифицированным клеточным методом, составляет $D = 1,24$ (рис. 4.1.4).

Бассейн реки Хемчик. Река Хемчик – один из наиболее крупных левых притоков Верхнего Енисея (табл. 4.1.3). Водосборный бассейн Хемчика, несколько вытянутый в направлении с юго-запада на северо-восток, вполне симметричен. Хемчик берет свое начало на северо-восточном склоне Шапшальского хребта. Его длина составляет 310 км, площадь водосбора 27300 км², перепад 1748 м, расход 70 м³/сек (Клопова, 1957; Шахунова, Лиханов, 1955). Верховья сохранили следы оледенения в виде троговой формы долины с множеством озер. Река горно-таежного типа, но имеет большие участки, где течет по равнине. Первые 70 км Хемчик имеет большие скорости течения, скалистые крутые берега, покрытые хвойными лесами. В районе Бай-Тал р. Хемчик выходит в расширенную малолесную Хемчикскую котловину, со сглаженными формами окружающих гор, и приобретает характер равнинной степной реки. Основное русло имеет ширину 60-100 м.

Таблица 4.1.3

Характеристика основных притоков реки Хемчик

Приток	Расстояние от устья, км	Длина, км	Площадь бассейна, км ²
Улу-Оруг (левый)	259,7	44,5	373,6
Барлык (правый)	232,8	109,8	4042
Алаш (левый)	180,5	184,57	4295
Чиргакы (правый)	167,4	85,4	17,86
Чадана (правый)	90,6	81,2	2733
Ак-Суг (левый)	83,8	135,1	3168
Устью-Ишкин (левый)	74,1	67,01	1206
Алды-Ишкин (левый)	71,8	59,2	1044
Шом-Шум (левый)	34,6	37,3	502,7

На рис. 4.1.5 приведены данные расчета для бассейна реки Хемчик. Для этого бассейна: $A = 0,081$, $B = 0,56$ и, соответственно, $D = 1,13$,

$a = 1,21$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,993$, а дисперсия 0,05. Значение показателя фрактальной размерности реки Хемчик, определенное модифицированным клеточным методом, $D = 1,23$ (рис. 4.1.6).

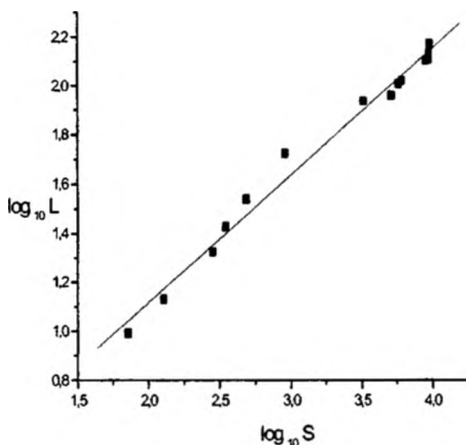


Рис. 4.1.5. Зависимость длины р. Хемчик от площади бассейна

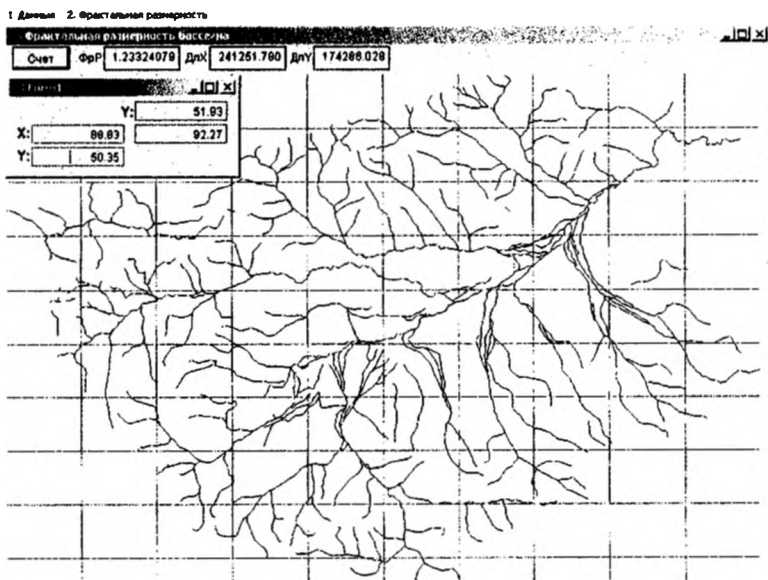


Рис. 4.1.6. Изображение экрана программы «Фрактальная размерность речной сети» для бассейна реки Хемчик

Показатели фрактальной размерности для речных систем Большой Енисей, Малый Енисей и Хемчик, полученные с использованием программы «Фрактальная размерность речной сети», имеют следующие значения: Большой Енисей $D = 1,25$; Малый Енисей (по Гуаинн-Гол), $D = 1,24$; для реки Хемчик $D = 1,23$. Оценка точности вычисления составляет $\pm 0,01$.

Бассейн реки Тес-Хем (бассейн Убсу-Нурской котловины). Убсу-Нурская котловина расположена в аридной зоне центральной части азиатского материка, на границе Тувы и Монголии, между 48 и 50 с.ш. и 91 и 99 в.д. Котловина находится в большой и глубокой депрессии между горными хребтами Центральной Азии. Депрессия представляет собой грабен, относящийся к горной области Западной Монголии, с абсолютными отметками 750-1500 м; оз. Убсу-Нур располагается в самой низкой её части. Протяжённость котловины с запада на восток – 600 км, с севера на юг – 160 км. В пределах Тувы находится небольшой участок северо-восточного побережья озера.

Наиболее крупная водная артерия, питающая озеро, – *р. Тес-Хем* (монгольское название – Тэсийн-Гол). Тес-Хем собирает воды с нагорья Сангилен, хребтов Булнай-Нуру и Восточный Танну-Ола, расположенных в северной и восточной частях котловины (табл. 4.1.4). Река берёт начало в Монголии на северных склонах хребта Булнай. При впадении в озеро она образует дельту в виде слабонаклонной равнины, обводнённой многочисленными меандрирующими потоками и ответвлением Тесийн-Гола, а также её правыми притоками – реками Ирбитей, Холу, Серлиг, Деспен.

Таблица 4.1.4

Характеристика притоков р. Тес-Хем в пределах Тувы

Приток	Расстояние от устья Тес-Хема, км	Длина, км	Площадь бассейна, км ²
Эрзин (правый)	284	135	4353
Нарын (приток Эрзина)	298	118	1260
Тарлашкын-Хем (правый)	265	40,2	833
Ужарлыг-Хем (правый)	240	72,4	593

Вторая по величине река, впадающая в озеро, – *Нарийн-Гол*. С севера и запада к озеру стекаются многочисленные, но непротяжённые горные реки (Торгалыг, Улааатай, Мугур, Оораш, Бора-Шай). Долины этих рек имеют преимущественно меридиональное направление.

Сток реки Тес-Хем изучен недостаточно. Формирование стока происходит за счёт талых снеговых вод и летних ливней, вследствие чего на реке Тес-Хем наблюдаются три волны паводков.

Первый из них, менее водоносный, образующийся в результате снеготаяния в низких частях бассейна, проходит ранней весной (в апреле - мае). Второй – наиболее длительный и мощный, вызываемый таянием снега в горах и определяющий водность реки, идёт в мае - июне. Третий – ливневой, наиболее высокий, но кратковременный паводок, проходит в июле - августе во время выпадения ливневых осадков в горах. Низкие горизонты воды наблюдаются в октябре. До середины ноября поверхность реки бывает покрыта шугой, после чего устанавливается ледостав. В июле - августе отмечается большая мутность воды.

К водосборному бассейну бессточной впадины – оз. Убсу-Нур относятся также верховья малых рек, стекающих с обнажённых южных склонов хр. Западный Тану-Ола, нижние участки которых расположены за пределами Тувы на территории Монголии. Воды большинства из них теряются в заболоченных пространствах, окружающих оз. Убсу-Нур с северо-запада и запада.

На рис. 4.1.7 приведены данные расчета показателя фрактальной размерности для бассейна реки Тес-Хем (Тесийн-Гол): $A = -0,63$, $B = 0,73$ и, соответственно, $D = 1,46$, $a = 0,23$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,995$, а дисперсия 0,04. Значение показателя фрактальной размерности определено модифицированным клеточным методом для бассейна реки Тес-Хем: $D = 1,18$ (рис. 4.1.8), для Убсунурской котловины (рис. 4.1.9) $D = 1,19$.

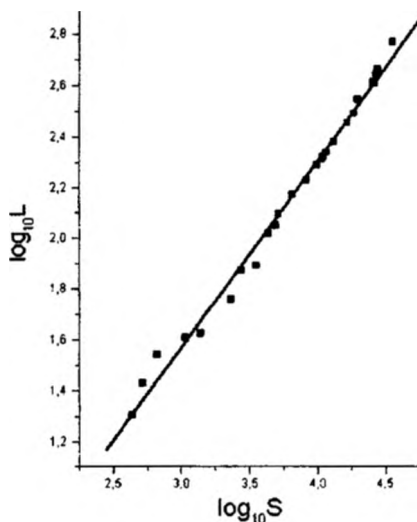


Рис. 4.1.7. Зависимость длины р. Тес-Хем (Тесийн-Гол) от площади бассейна

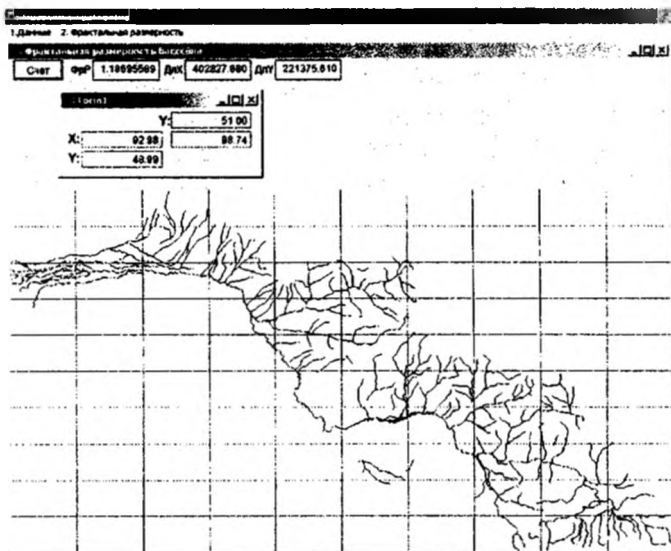


Рис. 4.1.8. Изображение экрана программы «Фрактальная размерность речной сети» для бассейна реки Тес-Хем

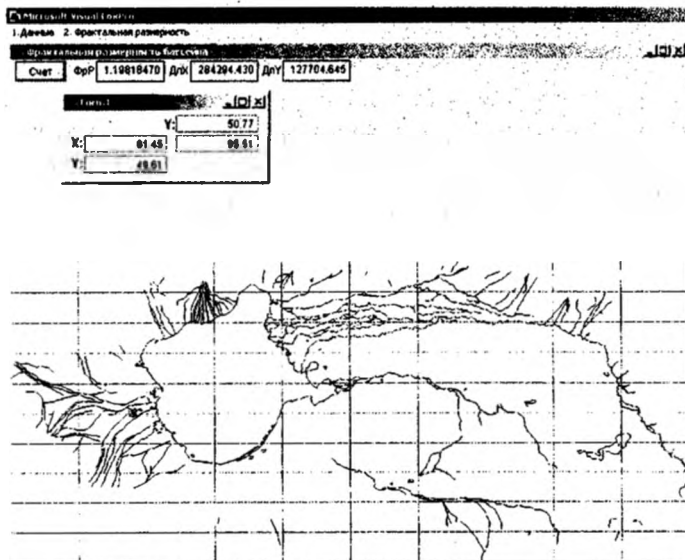


Рис. 4.1.9. Изображение экрана программы «Фрактальная размерность речной сети» для Убсунурской котловины

Определение фрактальной размерности речной сети с использованием теории порядка рек. Структура речного бассейна определяется закономерностями строения речных долин. Анализ строения речных систем, проведенный в работах зарубежных и отечественных исследователей (Гарцман, 1973; Оре, 1980; Ржаницын, 1960; Флоренсов, 1978; Хортон, 1948), показал, что одной из наиболее важных характеристик структуры речного бассейна является порядок входящих в него рек. Согласно классификации Хортон (Хортон, 1948), речной системе присваивается определенный порядок i , причем неразветвленным элементарным потокам присваивается первый порядок, а затем, при слиянии однопорядковых водотоков, порядок увеличивается на единицу. Главная река, по данной классификации, имеет наибольший порядок и обозначается через S . Речная сеть, по Хортону, характеризуется показателем длины r_i , т.е. отношением длин рек соседних порядков, средней длиной водотока L_i порядка i и показателем ветвления r_b , т.е. отношением количества водотоков смежных порядков.

Основные водные артерии Тувы – реки Большой и Малый Енисей и Хемчик, по данным, приведенным в монографии Л.М. Корытного (Корытный и др., 1990), отнесены, согласно классификации Хортон – Стралера, к седьмому порядку. Для основных речных бассейнов Тувы значения показателя ветвления r_b приведены в табл. 4.1.5 (Корытный и др., 1990).

Как отмечалось выше, показатель длины r_l определяется как отношение суммарной длины рек одного порядка к суммарной длине рек на порядок меньше. Вычисление этого показателя связано с определенными трудностями, нарастающими при изменении масштаба карты в сторону увеличения.

Таблица 4.1.5

Показатели ветвления по порядкам рек

Речная система	I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-VII	VII-VIII	средний
Верхний Енисей в т.ч.	4,1	4,5	4,1	4,4	5,4	3,0	6,0	4,5
Большой Енисей	3,8	4,6	3,9	4,3	7,5	2,0		4,4
Малый Енисей	4,0	4,4	4,2	3,8	5,0	3,0		4,1
Хемчик	3,6	4,9	3,2	3,6	4,5	2,0		3,6

Для исследуемой территории значения r_l рассчитывались двумя способами. В первом случае использовались справочные данные (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1973). Для бассейна Большого Енисея значения r_l в среднем равны 2,30; а для бассейна Малого Енисея – 2,33.

Во втором случае значения r_l определялись с использованием нашего ГИС-проекта по электронной карте масштаба 1:1 000000. Применение ГИС-технологий (используются слои, отвечающие притокам разных порядков) позволяет более быстро производить классификацию рек по их порядкам и определять длину соответствующих водотоков. Использовалась выборка из десяти рек, не имеющих притоков (для данного масштаба карты), к длинам рек, имеющих один приток для того же масштаба.

Для Большого Енисея выборка производилась в районе между 96-97° в.д. и 52-53°с.ш.; $r_l = 2,70$; для Малого Енисея 96-99° в.д. и 50-51° с.ш.; $r_l = 2,54$.

Для расчёта фрактальной размерности речной сети с использованием теории порядка рек, бралось за основу приведенное ранее предположение Хэнка (Федер, 1991). Получены следующие значения: Большой Енисей (Бий-Хема): $D_s = 1,27$ при $r_l = 2,30$, $r_b = 3,71$; Малый Енисей (Каа-Хема): $D_s = 1,19$ при $r_l = 2,33$, $r_b = 4,10$.

Практический интерес в связи с указанными выше трудностями представляет обратная задача: оценка показателя длины r_l , при условии, что величина фрактального показателя D известна (например, D определена из соотношения длина – площадь) и показатель ветвления r_b слабо зависит от порядка русла, оставаясь в среднем постоянным (Корытный и др., 1990).

Таблица 4.1.6

Рассчитанные показатели длины

Река	r_l						среднее	данные гидролог. изученности
	I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-VII		
Большой Енисей	2,38	2,88	2,44	2,69	4,7	1,25	2,76	2,30
Малый Енисей	2,49	2,74	2,62	2,37	3,12	1,87	2,56	2,33
Хемчик	2,22	3,02	1,97	2,22	2,77	1,23	2,22	–

Значения r_b для рек разных порядков берутся из табл. 4.1.5 и рассчитываются искомые значения параметра длины r_l (табл. 4.1.6). На рис. 4.1.10 приведен график соотношения показателя длины r_l и порядка реки.

Таким образом, используя фрактальный показатель D , произведен расчет показателя длины r_l , значение которого незначительно (не более 15%) отличается от полученных на основе опубликованных данных.

Подчеркнём, что совместное использование методов фрактальной геометрии и технологий ГИС позволяет получать оценку для показателя

длины r_i , минуя трудоёмкие расчёты определения суммарных длин притоков разных порядков на основе топографических карт. Полученные результаты свидетельствуют о том, что теория фракталов служит одним из способов количественного сопоставления связей.

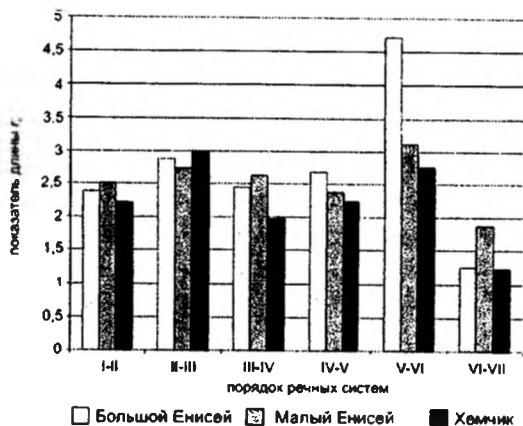


Рис. 4.1.10. Соотношение показателя длины r_i для рек разных порядков

Сравнительный анализ фрактальных показателей. В табл. 4.1.7 приведены полученные значения показателя фрактальной размерности речных систем Тувы с использованием различных алгоритмов расчёта (длина – площадь, ёмкостный метод) и на основе теории порядка рек Хортонa.

Таблица 4.1.7

Показатели фрактальной размерности, рассчитанные различными методами¹

Наименование речной системы	Фрактальный показатель D (зависимость длины от площади бассейна)	Фрактальный показатель D_R (с учётом порядка рек)	Фрактальный показатель D_S (метод квадратов)	Относительная погрешность $\delta = \frac{ D - D_i }{D}$
Большой Енисей	1,22	1,27	1,25	0,04
Малый Енисей	1,14	1,19	1,24	0,04
Хемчик	1,13	–	1,23	0,08
Тесийн-Гол	1,46	–	1,18	–

Как видно из табл. 4.1.7, вычисленные по всем методикам значения показателя D для бассейнов рек Большой Енисей, Малый Енисей, Тесийн-Гол и

¹ Для реки Хемчик и Тесийн-Гол фрактальный показатель не рассчитывался из-за отсутствия справочных данных показателей r_i и r_n .

Хемчик являются дробными: $1,13 < D < 1,27$, что указывает на фрактальность геометрии речных бассейнов. Существенно, что результаты расчётов оказываются одного порядка. Отличие составляет 4-8%. Указанное обстоятельство означает, что при оценке ряда параметров речных сетей можно использовать те значения показателя D , которые определяются наиболее просто, например, с помощью программы «Фрактальная размерность речной сети». Важную роль при этом играет созданная нами посредством геоинформационной системы цифровая модель речной сети Тувы, позволяющая автоматизировать и упростить многие трудоёмкие процессы вычисления характеристик речных сетей, в сравнении с классическими методами.

Таким образом, с привлечением ГИС проведен фрактальный анализ геометрии речной сети территории Тувы. Показано, что речная сеть Тувы подчиняется законам фрактальной геометрии. Фрактальная размерность является мерой сложности геосистем и позволяет восстанавливать информацию о пространственной структуре речной сети. Применение показателя фрактальной размерности даёт возможность получения и уточнения количественных характеристик речной сети: длины реки, её порядка, проведения генерализации рек, возможности определения расхода воды в реках на любом заданном ее отрезке.

Фрактальный анализ речных бассейнов с учетом значений высоты местности. Рисунок речной сети и показатели ее фрактальной размерности содержат скрытую информацию о геологических, геоморфологических и гидрологических аспектах ее зарождения и развития. На основе анализа составленных автором электронных карт рельефа и речной сети масштабов 1:1 000 000 и 1:100 000 с использованием программы определения фрактальной размерности, были определены значения показателя фрактальной размерности речной сети для различных значений высоты местности.

Методика анализа. Данные для вычислений получены с использованием программ MapInfo, ArcView GIS. Это связано с более лёгким получением исходных данных для программы «Фрактальная размерность речной сети». По электронной карте рельефа и речной сети масштаба 1:1 000 000, используя слои «Гидрография» и «Рельеф», последовательно выбирались отрезки реки, которые расположены между соседними горизонталями. Затем полученные файлы, содержащие координаты кривых, преобразовывались в текстовый формат *.txt файл и импортировались в программу «Фрактальная размерность речной сети». По окончании работы программы проводится отображение множества кривых и расчёт фрактального показателя для определённой высоты. Примеры изображения полученных файлов представлены на рис. 4.1.11.

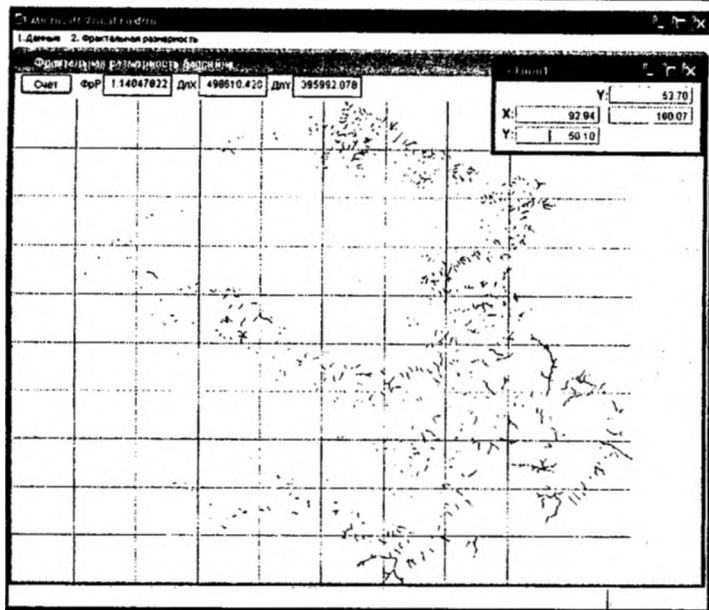
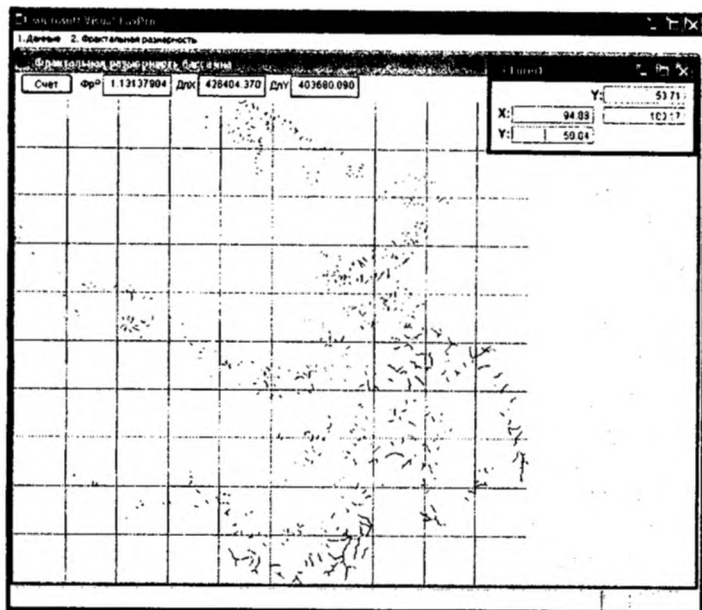


Рис. 4.1.11. Изображение экрана бассейна речной сети Большого Енисея и Малого Енисея для высот от 1800 до 2000 м

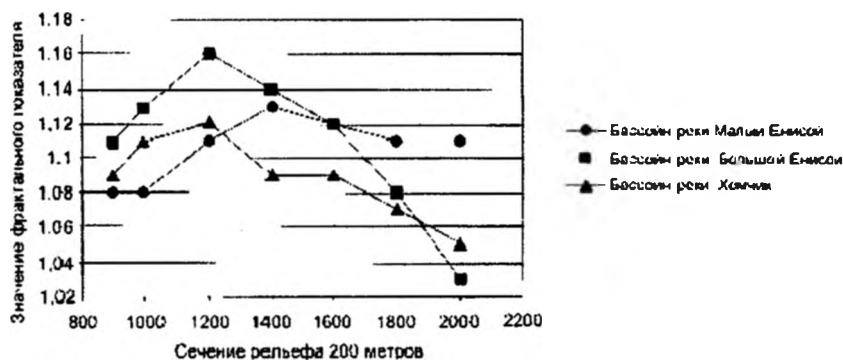


Рис. 4.1.12. Зависимость значений показателей фрактальной размерности от высоты рельефа

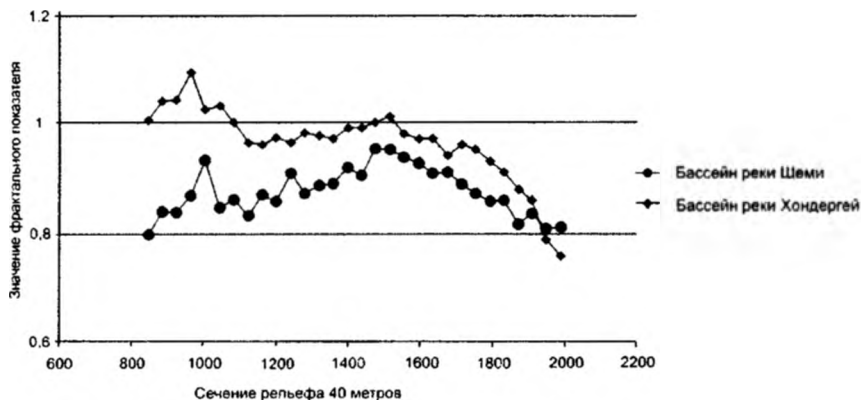


Рис. 4.1.13. Типичный характер зависимости показателя фрактальной размерности от высоты расчленяемой поверхности (реки Шема, Хондергей – левые притоки р. Хемчик)

По результатам полученных значений фрактальных показателей для бассейнов рек Большой Енисей, Малый Енисей и Хемчик, а также некоторых рек, входящих в эти бассейны, получены графики (рис. 4.1.12 и 4.1.13). Из графиков видно, что пик значений показателя фрактальной размерности приходится на высоты от 1000 до 1200 м над уровнем моря, что соответствует среднегорному поясу, составляющему более половины территории Тувы. Климатические условия среднегорного пояса способствуют формированию повышенной разветвленности речных бассейнов.

Таким образом, показатель фрактальной размерности, являясь количественной мерой, характеризующей степень «заполненности» плоскости

линейными объектами, служит объективным показателем степени разветвленности речной сети, зависящей от высоты рельефа.

Аналогичный анализ пространственного изменения фрактальной размерности в несколько преобразованном варианте методики был проведен и для различных участков бассейна Верхнего Енисея в масштабе 1:100 000. Как и в первом варианте, в программу «Фрактальная размерность речной сети» импортировались файлы координат речной сети и горизонтали с определёнными значениями. Однако в данном случае интервал изменения показателя фрактальной размерности D был задан заранее и равен: $0,6 \div 0,8$; $0,8 \div 1,0$; $1,0 \div 1,2$; $1,2 \div 1,4$. В результате расчётов на экране графически выделяются ячейки, принадлежащие заданному интервалу фрактальной размерности (например, $1,0 \div 1,2$), а также горизонтали (рис. 4.1.14).

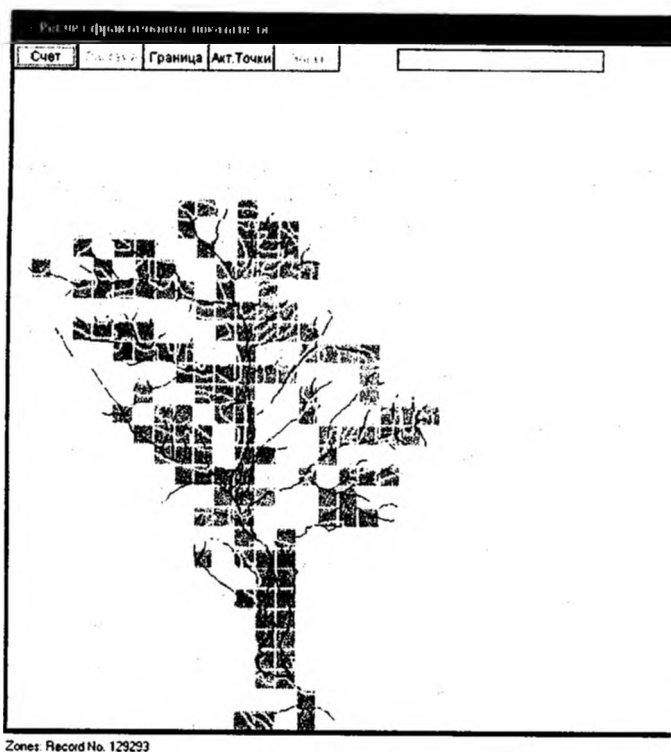
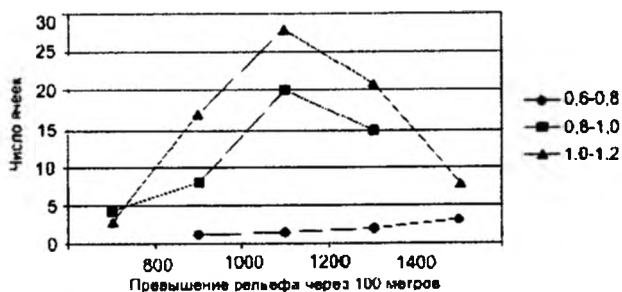


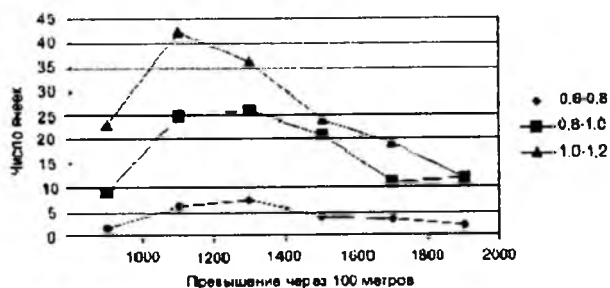
Рис. 4.1.14. Размещение ячеек, имеющих фрактальную размерность $1,2-1,4$, на примере р. Сейба (бассейн Большого Енисея)

Для каждого интервала высоты подсчитывалось количество ячеек для интервалов значений от $D = 0,6 \pm 0,8$ до $D = 1,2 \pm 1,4$. Затем оценивалась частота заполнения ячейками заданной фрактальной размерности заложенных между горизонталями. Полученные значения отражены на графиках (рис. 4.1.14).

Как видно из приводимых на рис. 4.1.15 графиков, и данный вариант анализа пространственного изменения фрактальной размерности выявляет характерную закономерность его распределения. Устанавливается чётко выраженный максимум показателя фрактальной размерности для значений высоты от 1000 до 1200 м над уровнем моря.



а



б

Рис. 4.1.15. Типичный характер зависимости показателя фрактальной размерности от высоты расчленяемой поверхности: а – бассейн реки Сейба, правый приток Большого Енисея; б – Бассейн реки Хадын, приток Малого Енисея

Таким образом, для территории Тувы выявлена взаимосвязь между высотой над уровнем моря различных форм рельефа и величиной показателя фрактальной размерности. На примере речных бассейнов Малого и Большого Енисея, Хемчика и отдельных речных систем, составляющих эти бассейны, с использованием технологий геоинформационных систем установлена количественная взаимосвязь между значением показателя фрак-

тальной размерности, определённым значением высоты и основными формами рельефа. Результаты получены на основе анализа тематических слоёв «Гидрография» и «Горизонтали». Характерная особенность – приуроченность максимума показателя фрактальной размерности к определённому интервалу высоты над уровнем моря.

Фрактальный анализ речной сети основных орографических элементов Саяно-Тувинского нагорья. Формирование типов рельефа и речной сети происходит при взаимодействии экзогенных и эндогенных процессов и подчиняется определённым закономерностям. Использование фрактального анализа дало возможность (при соблюдении одинаковых методических подходов к расчету фрактальной размерности) получать численное описание организации природных структур различного генезиса и, соответственно, сравнивать их между собой.

Методика анализа. Используя электронный вариант карты, созданной на основе данных Л.К. Зятьковой (1977) и других исследователей, выбирались тематические слои «Гидрография» и «Геоморфологические районы»; последовательно выбирались отрезки реки, которые приурочены к разным морфоструктурам.

Полученные файлы, с координатами кривых, преобразовывались в текстовый формат *.txt файл и импортировались в программу «Фрактальная размерность речной сети». Результаты расчетов величины показателя D для определённого геоморфологического района и множество элементов речной сети, входящих в указанный район, отображались на экране монитора (рис. 4.1.16). Рассчитанные значения показателя фрактальной размерности сведены в табл. 4.1.8.

Таблица 4.1.8

Значение показателя фрактальной размерности орографических элементов

Орографические элементы	Показатель фрактальной размерности
Западный Саян	1,16409695
Саянское нагорье	1,14653222
Алашское плато	1,15582318
Куртушибинский хребет	1,13325116
Туранская впадина	1,09061785
Центрально-Тувинская котловина	1,17270731
Хемчикская впадина	1,17206762
Чаа-Хольская впадина	1,08489027
Торгалыг-Шагонарская впадина	1,13038794
Улугхемская впадина	1,16969897
Низкогорные хребты и возвышенности	1,13369492
Каахемское плоскогорье	1,21073440
Терехольская впадина	1,15431216

Орографические элементы	Показатель фрактальной размерности
Горы юго-западной Тувы	1,19636768
Шапшалский хребет	1,15722624
Хребет Цаган-Шибету	1,14719501
Каргинская впадина	1,05561480
Монгун-Тайга	1,10774922
Хребет Чихачёва	1,13525973
Таннуольский хребет	1,17505785
Хребет Западный Танну-Ола	1,16884783
Хребет Восточный Танну-Ола	1,18037450
Хребет Сангилен	1,20578993
Убсунурская впадина	1,11172767
Восточный Саян	1,22538425
Хребет Эггак-Таргак-Тайга	1,18295228
Удинский хребет	1,24811244
Беликская впадина	1,08033318
Систигхемское плоскогорье	1,19024642
Тоджинская котловина	1,19309779
Хребты и возвышенности в пределах депрессии	1,14928717
Хребет академика Обручева	1,20096348
Охемская впадина	1,0116595
Серлигхемская впадина	1,10023036
Прихубсугульское нагорье	1,24012872
Тайрискская впадина	1,18194429

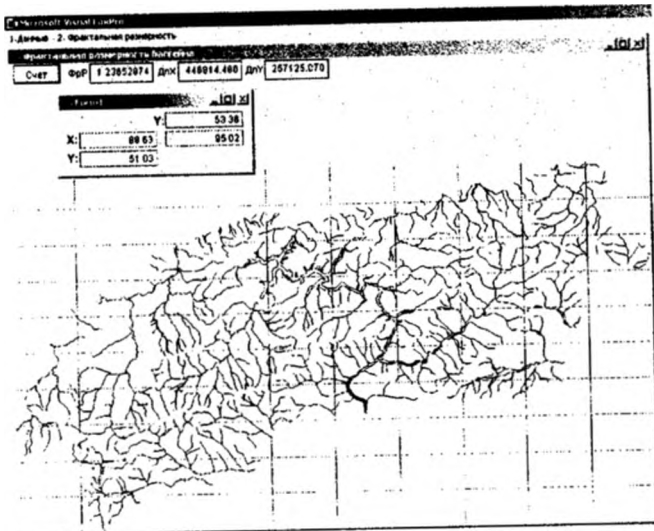


Рис. 4.1.16. Речная сеть хребта Западный Саян

На рис. 4.1.17 представлены результаты вычислений, из которых видно, что каждая из рассматриваемых морфоструктур (котловины, депрессии, горные системы) отличаются собственными характеристиками фрактальной размерности D . Как известно, величина фрактального показателя системы линий на плоскости является мерой разветвленности этой системы. В связи с этим, согласно полученным значениям показателя фрактальной размерности, степень разветвленности речной сети на возвышенных участках больше, чем на равнинных территориях, что подтвердилось проведенными исследованиями (рис. 4.1.17).

Но и для одинаковых форм рельефа, расположенных в различных природно-климатических условиях, значение показателя фрактальной размерности отличается.



Рис. 4.1.17. Характер связи параметра фрактальной размерности и отдельных форм рельефа. Цифрами обозначены: 1 – Туранская котловина; 2 – Хемчикская котловина; 3 – Чаа-Хольская котловина; 4 – Торгалык-Шагонарская котловина; 5 – Улуг-Хемская котловина; 6 – Терехольская котловина; 7 – Убсунурская котловина; 8 – Каргинская котловина; 9 – Хребет Восточный Танну-Ола; 10 – Хребет Сангилен; 11 – Хребет Академика Обручсва; 12 – Куртушибинский хребет; 13 – Эргак-Таргак-Тайга; 14 – Удинский хребет; 15 – Шапшальский хребет; 16 – Хребет Цаган-Шибету

Так, значения фрактальных показателей для котловин в пределах территории Тувы, расположенных в различных природно-климатических условиях, различаются существенно. Например, значение показателя фрактальной размерности для Убсунурской котловины меньше, чем для Хемчикской и Улуг-Хемской (рис. 4.1.18); а наибольшими значениями показателя фрактальной размерности характеризуется Тоджинская котловина. По-видимому, данные обстоятельства связаны с существенными разли-

ниями в климатических условиях сравниваемых районов и, в некоторой степени, в различиях геологического строения, прежде всего трещиноватости пород, что обуславливает заложение и развитие речной сети.

Наименьшее значение показателя фрактальной размерности характерно для Убсу-Нурской котловины, с ее особенными климатическими характеристиками. В частности, известно, что хребет Танну-Ола представляет собой природный барьер, задерживающий остатки влаги северо-западных воздушных течений, вследствие чего Убсунурская котловина получает почти вдвое меньше осадков, чем соседние с севера Хемчикская и Улутхемская (Центрально-Тувинская) котловины.

Для Тоджинской котловины влияние орографического барьера ослаблено, так как она обрамлена с северо-запада заметно пониженной частью Саянских гор, и эта котловина получает с проникающими сюда циклонами на 100-150 мм осадков больше, чем расположенная почти на той же широте и одинаковом гипсометрическом уровне, но закрытая более высокими горами Центрально-Тувинская котловина.

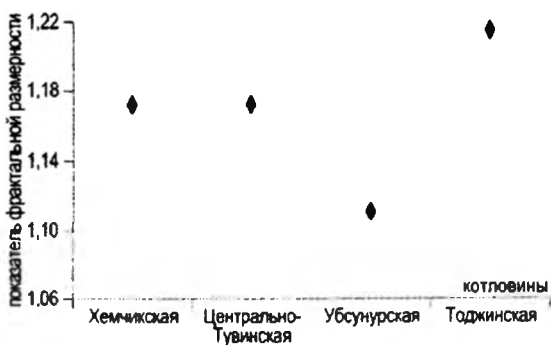


Рис. 4.1.18. Распределение показателей фрактальной размерности речной сети на территории котловин

При всех прочих равных условиях показатель фрактальной размерности зависит от степени изломанности линий. Следовательно, чем больше густота речной сети (густота эрозионного расчленения поверхности) и чем больше густота тектонических разломов, осваиваемых речной сетью, тем больше показатель фрактальной размерности.

Сравнительный анализ показателей фрактальной размерности речной сети и системы тектонических разломов Тувы. Как уже было сказано, новейшая тектоническая структура Саяно-Тувинского нагорья представляет собой систему крупных сводово-глыбовых поднятий. выра-

женных в рельефе в виде хребтов, нагорий и разделяющих их впадин и прогибов. Важную роль в их развитии играли многочисленные разломы, крупнейшие из которых, как правило, совпадают с древними региональными разломами. Так как геотектонические процессы, обуславливающие разломообразование земной поверхности, являются одним из важнейших элементов формирования морфологии речных систем, проводился совместный анализ показателей фрактальной размерности речной сети и системы тектонических разломов.

Методика анализа. Анализ проводился на основе созданных ГИС проектов речной сети Тувы (Чупикова и др., 2004) и поля разломов (Аюнова и др., 2007) в масштабе 1:500 000 (фиг. 5).

При расчете фрактальных показателей речной сети и поля разломов использовался модифицированный метод квадратов. Размер покрывающих разломы и речную сеть ячеек составлял 1 км. Затем вся территория Тувы делилась на прямоугольные участки (боксы), со сторонами 364; 182; 91; 45,5 и 22,75 км.

Для каждого разбиения вычислялся средний коэффициент корреляции. Зависимость величины коэффициента корреляции от размера блока представлена на рис. 4.1.19. Видно, что для боксов размером $\geq 45,5$ км характерна высокая ($>0,8$) корреляция между показателями фрактальной размерности речной сети и поля разломов. С уменьшением размеров боксов коэффициент корреляции резко уменьшается, а при их величине 22,5 км коэффициент корреляции становится меньше 0,5. При дальнейшем уменьшении размеров (площади) боксов корреляция исчезает.

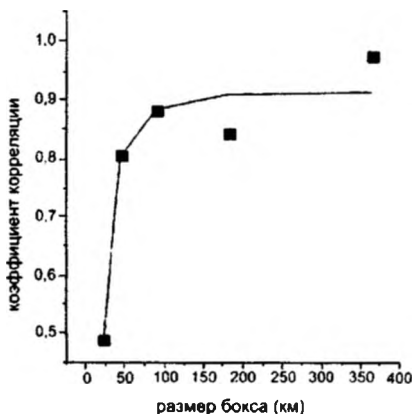


Рис. 4.1.19. График зависимости коэффициента корреляции k от размера бокса /

Приведенная на графике зависимость коэффициента корреляции $k = k(l)$ от размера бокса l с хорошей точностью описывается гиперболической кривой, уравнение которой имеет вид (непрерывная кривая):

$$k(l) = a - \frac{b}{(1 + 0,5l)^2}, \quad (4.1.1)$$

где $a = 0,91736 \pm 0,02827$, $b = 65,20304 \pm 9,32077$.

В табл. 4.1.9 представлены результаты расчетов фрактальных показателей (D) для двух основных речных бассейнов Енисея (Б. Енисей и М. Енисей) в Восточной Туве. Обращает на себя внимание, что в каждом случае наибольшие значения фрактальных показателей D имеет рельеф, меньше – речная сеть, еще меньше – разломная тектоника. При этом по всем параметрам наблюдается некая зональность – показатели D между речья Б. Енисей – М. Енисей значительно меньше, чем показатели D на юг и север от него.

Таблица 4.1.9

Результаты расчетов фрактальных показателей речных бассейнов Енисея в Восточной Туве

Речной бассейн \ Фрактальный показатель D	рельеф	реки	разломы
М. Енисей (левые)	1,324	1,230	1,200
М. Енисей (правые)	1,294	1,179	1,136
Б. Енисей (левые)	1,304	1,171	1,159
Б. Енисей (правые)	1,329	1,230	1,201

По-видимому, экзогенные процессы не успевают компенсировать скорость тектонического поднятия. Особенно это характерно для центральной части исследованной территории, где в течение всего плейстоцена и даже в голоцене активно проявлялись вулканические и сейсмические процессы и до сего времени фиксируются устойчивые дифференцированные тектонические движения (Ключевский, Демьянович, 2009). Это подтверждается следующими фактами (Суторакова, Ойдум, 2009): долинные базальтовые потоки р. М. Енисей, с возрастом 260-290 тыс. лет, мощностью до 300 м, прорезаны современным руслом до основания с захватом гранитного ложа базальтов до 20 м. Установлены фрагменты подвешенных долин притоков на высоте от уреза воды до 150 м и перехваты долин рек в водораздельной части междуречья (р. Харал, Кара-Хем, Серлиг-Хем, Кадыр-Ат и др.).

В целях более детального изучения на территории были выделены два блока: Южный – с проявлениями новейшего вулканизма (2 млн лет и

моложе) и Северный, где вулканизм после среднего миоцена (16 млн лет) не отмечен. Граница между ними проходит по Азасскому разлому. С востока область изучения ограничена Билин-Бусийнгольской рифтовой зоной с отрицательными вертикальными смещениями, с запада – местом слияния рек Б. Енисей и М. Енисей. Южный блок, отличающийся более активной современной эндогенной деятельностью, сопровождающейся землетрясениями, мы разделили на центральный (междуречье Б. Енисей – М. Енисей) и краевой (левобережье р. М. Енисей и правобережье р. Б. Енисей до Азасского разлома) блоки.

В табл. 4.1.10 представлены результаты расчетов показателей фрактальных размерностей Южного и Северного блоков, а также двух основных речных бассейнов – М. Енисей и Б. Енисей. Во всех случаях установлено, что наибольшими значениями показателей фрактальной размерности характеризуется горный рельеф, меньшими – речная сеть и наименьшими – разломная сеть. Сравнение данных показывает, что наибольшими показателями фрактальной размерности, как для горного рельефа, так и для речной сети, характеризуется Южный, более крупный по площади и эндогенно наиболее активный блок.

Таблица 4.1.10

Результаты расчетов фрактальных показателей Южного и Северного блока

Речной бассейн \ Фрактальный показатель D	рельеф	реки	разломы
Южный блок	1,42	1,273	1,230
Северный блок	1,324	1,219	1,155
М. Енисей (левые)	1,313	1,205	1,162
М. Енисей (правые)	1,264	1,164	1,110
Б. Енисей (левые)	1,311	1,184	1,111
Б. Енисей (правые)	1,267	1,184	1,082

Междуречье Большой Енисей – Малый Енисей (центральной части поднятия) характеризуется более низкими фрактальными показателями, по сравнению с его периферийными частями. Данное обстоятельство объясняется тем, что периферийные (краевые части) данной морфоструктуры подвергаются большим деформациям из-за дифференцированности скоростей вертикального смещения и большей сейсмической активности. К перифериям также приурочены термоминеральные источники.

При этом ожидаемая симметричная зональность по фрактальным показателям при более детальном изучении Южного блока не установлена.

Меньшими показателями фрактальной размерности характеризуются северные краевые части Южного блока, значительная площадь которого забронирована плохо разрушенным плиоцен-плейстоценовым лавовым покровом (лавовое плато).

Численно характеризуемые закономерности изменения фрактальной размерности таковы: 1) фрактальные показатели снижаются в ряду рельеф – реки – разломы; 2) отчетливая дифференцированность показателей выявляется при более крупном дроблении площадей, но даже для более мелких блоков корреляция между параметрами сохраняется.

Таким образом, изложенное в данном параграфе позволяет сделать следующие выводы. Выполненное исследование ориентировано на разработку современных подходов к детальному изучению пространственной организации речной сети и её динамики на основе использования современных вычислительных технологий. Полученные результаты служат подтверждением правомерности высказанных ранее положений (Зятькова, 1977), согласно которым объекты природы, сформировавшиеся в одинаковых геолого-геоморфологических и зонально-климатических условиях, имеют сходные геометрические особенности. Кроме того, закономерности пространственного распределения значений показателей фрактальной размерности речных бассейнов определяются различиями природно-климатических характеристик и геологических условий.

Применение геоинформационных технологий является перспективным для получения и уточнения гидрометрических характеристик и в дальнейшем для моделирования гидрологических процессов и явлений.

Вычисленные значения показателей фрактальной размерности в пределах водосборных бассейнов Большого Енисея, Малого Енисея и реки Хемчик являются близкими, при численном превышении показателей фрактальной размерности рельефа над таковыми речной сети (табл. 4.1.11).

Таблица 4.1.11

Сравнительная характеристика значений показателей
фрактальной размерности рельефа и речной сети

Наименование речной системы	Фрактальный показатель D_S (метод квадратов)	Фрактальный показатель рельефа в пределах водосбора (метод квадратов)
Большой Енисей (Бий-Хем)	1,25	1,35
Малый Енисей (Каа-Хем)	1,24	1,36
Хемчик	1,23	1,35

Совместное использование в работе инструментария геоинформационных систем и созданной программы «Фрактальная размерность речной сети» существенно расширяет возможности анализа геометрических свойств речной сети и решения теоретических и практически значимых задач. Полученные результаты свидетельствуют о том, что теория фракталов служит одним из способов количественного сопоставления связей. Определение показателя фрактальной размерности проводилось для получения позитивной информации по линейным динамическим системам, представителями которых являются речные системы. Применение этого показателя даёт возможность получения и уточнения количественных характеристик – уточнения длины реки, определения её порядка, вычисления показателя длины, проведения генерализации рек.

При определении количественных характеристик объектов в ГИС автором использовались картометрические функции, реализованные в ГИС: расчёты площадей, длин периметров, площадей реальных поверхностей.

В табл. 4.1.12 приведены полученные значения показателя фрактальной размерности речных систем Тувы. Как видно из таблицы, вычисленные значения показателя D для бассейнов рек Большой, Малый Енисей и Хемчик и отдельных рек, входящих в эти бассейны, являются дробными $1,13 < D < 1,33$, что указывает на фрактальность геометрии речных бассейнов. Существенно, что результаты расчётов оказываются одного порядка. Важную роль при этом играет созданная посредством геоинформационной системы цифровая модель речной сети Тувы, позволяющая автоматизировать и упростить многие трудоёмкие процессы вычисления характеристик речных сетей, в сравнении с классическими методами.

Таблица 4.1.12

Значения показателя фрактальной размерности для разных масштабов

Название речного бассейна	Фрактальный показатель объекта, м-б 1: 1 000 000	Фрактальный показатель объекта, м-б 1: 100 000
Большой Енисей	1,253719	1,32794
Малый Енисей	1,249519	1,33856
Хемчик	1,233241	1,32453
Бурен	1,131, 21400	1,27916
Систег-Хем	1,21017	1,29508
Ужеп	1,13973	1,27713

Результаты фрактально-морфометрического анализа речной сети позволили выявить закономерную зависимость фрактальной размерности от высоты рельефа и установить, что для территории Саяно-Тувинского наго-

рия максимальные показатели размерности соответствуют высотам 1200-1400 м. Эта интересная закономерность связана с особенностями динамики геоморфоструктур. В частности, такое распределение показателя фрактальной размерности свидетельствует о блоково-глыбовом характере тектонических деформаций поверхности. Именно в таком случае максимальное расчленение поверхности по глубине и площади наблюдается в крайних частях блоковых геоморфоструктур. Это и подтверждается результатами проведенного фрактально-морфометрического анализа. Таким образом, положительные результаты изучения и анализа пространственных закономерностей и скрытой регулярности сложнорасчлененного горного рельефа, выполненных на примере Саяно-Тувинского нагорья (Республика Тыва), могут быть получены, если фрактальные подходы опираются на современные методы геоинформационных технологий. В частности, благодаря специально разработанной нами программе «Фрактальная размерность речной сети», возможности анализа геометрических свойств речной сети удалось существенно расширить и в результате выявить связи фрактальных показателей речной сети с ее морфометрическими характеристиками (длина рек и их порядки, площадь водосбора и др.).

Помимо известной закономерной связи речных долин с тектоническими разломами, анализ показателей фрактальной размерности речной сети позволил рассчитать предельные значения площади территории, при которых эта связь проявляется особенно четко. Установлено, что начиная с площади 2070,25 км² (размер стороны квадрата анализируемой площади 45,5 км), связь речных долин с тектоническими разломами является предопределенной (коэффициент корреляции превышает 0,8).

При уменьшении анализируемой площади территории коэффициент корреляции заметно снижается и при достижении величины 506,25 км² (сторона квадрата анализируемой площади 22,5 км) становится малозначимым. Таким образом, анализ фрактальной размерности выявляет скрытую (не фиксируемую другими морфометрическими и традиционными методами картографического анализа) регулярность, заключающуюся в разграничении долгоживущих тектонических разломов земной коры и разломов одноактного действия, после образования которых смещения блоков относительно друг друга не происходило.

Другим, еще более ярким примером скрытой регулярности является впервые установленная нами связь показателей фрактальной размерности речной сети с высотой рельефа. Так, максимальные их значения соответствуют высотам рельефа 1200-1400 м. И выше, и ниже этих высотных отметок рельефа показатели фрактальной размерности убывают. Эта законо-

мерность связана с особенностями генезиса, формирования и динамики геоморфоструктур, с тем, какой была исходная поверхность Земли на данной территории, каким был характер тектонических движений, предопределяющих формирование рельефа. В частности, такое распределение показателя фрактальной размерности диагностирует типы тектонической деформации исходной поверхности – позволяет различать пликвативно-сводовый тип деформации исходной поверхности и блоково-глыбовый. Эрозионное расчленение поверхности при ее сводовой деформации начинается в центральных частях морфоструктур, постепенно расширяясь к краям поднятия. В условиях же глыбово-блоковой деформации исходной поверхности наибольшая густота и глубина эрозионного расчленения наблюдается в краевых частях блоковых геоморфоструктур, что и подтверждает проведенный фрактально-морфометрический анализ.

Установленные пространственные закономерности изменения фрактальной размерности позволили определить количественные характеристики речных систем – протяженность отдельных элементов речной сети, показатель длины реки, а на основании этих данных перейти к определению расхода воды в реках. Показатели длины реки легко определяются с использованием фрактального показателя, полученного по методу квадратов. Важную роль при этом играет разработанная нами геоинформационная система речной сети Тувы, позволяющая автоматизировать и упростить многие трудоёмкие процессы вычисления характеристик речных сетей. Подчеркнём, что, совместное использование методов фрактального анализа и технологий ГИС позволяет получать оценку для показателя длины, минуя трудоёмкие расчёты определения суммарных длин притоков разных порядков на основе топографических карт.

Результаты проведенного исследования имеют важное практическое значение с позиций геоэкологии и природопользования. В слабоизученных районах, к каковым относятся Саяно-Тувинское нагорье и территория Республики Тыва, фактические данные по гидрологическому режиму рек имеются лишь для 16 пунктов наблюдения. Отсутствие полной гидрологической и гидрометрической информации для большинства рек затрудняет объективную оценку валового энергетического потенциала объектов малой гидроэнергетики.

Использование ГИС в сочетании с фрактальным анализом обеспечивает комплексное отображение ситуации за счёт графического представления различной информации на географической карте, облегчая её восприятие и повышая эффективность принятия решений и оценки экологических последствий. Результаты исследований были положены в основу геоин-

формационного проекта «Гидроэнергетические ресурсы Республики Тыва». Проведенные виды анализа позволили количественно оценить расход воды в речных системах, определить потенциальную мощность и оптимальные места расположения предполагаемых к созданию объектов малой гидроэнергетики и произвести расчёт гидроэнергетического потенциала речных бассейнов.

4.2. Речная сеть Томской области

Региональные особенности морфологии русел и русловых процессов рек. *Река Обь.* Томская область богата реками, главной водной артерией области является р. Обь – одна из крупнейших рек России, ее общая длина от слияния Бии и Катунь в Алтайских горах до устья, за которое принят бар Большое жерло, составляет – 3676 км (Русловые процессы..., 2001). Обь пересекает территорию области с юго-востока на северо-запад своим верхним (до устья Томи) и средним течением на протяжении более 1000 км (Евсеева, 2001). Все остальные реки относятся к бассейну Оби. Всего в Томской области насчитывается 18100 рек, суммарной протяженностью 94800 км. Из них 573 реки имеют длину более 20 км, общей длиной 39,5 тыс. км (Штауб, 1966). Наиболее крупными реками – притоками Оби – являются Томь, Чулым, Кеть, Васюган, Тым, Парабель, Чая.

На судоходных реках Обского бассейна встречаются русла различных морфодинамических типов, представляющие почти все известные их разновидности (по классификации Р.С. Чалова, 1997). При этом в бассейне абсолютно преобладают широкопойменные русла, среди последних – меандрирующие. Особое место занимает русло Оби, отличающееся наибольшим разнообразием и наиболее сложным чередованием участков с руслом разного морфодинамического типа (Русловые процессы..., 2001). Для рек – притоков Оби – в целом характерно свободное меандрирование на всем их протяжении, и лишь на некоторых реках (Кеть, Чулым и др.) в среднем и нижнем течении отмечается другой тип руслового процесса (Ресурсы..., 1972; Евсеева, Земцов, 1978).

Обь на протяжении от Новосибирской ГЭС до устья р. Томи не принимает значительных притоков. Долина Оби располагается по границе двух тектонических зон: Колывань-Томской складчатой области и Колпашевской впадины. Для Оби особенно характерно разветвленное русло, на участке от Новосибирской ГЭС до устья р. Томи встречаются почти все его разновидности. Русло, разветвленное на рукава, занимает большую часть длины этого участка, составляя 64% (не считая отмирающих систем)

пойменной многоруканности и разветвлений, осложняющих излучины русла. В пределах этого участка преобладают сопряженные разветвления. Ширина большинства островов на Оби редко превышает 1 км, и лишь у некоторых достигает 1,8 км. Извилистость рукавов более выражена, чем в главном русле.

Обь ниже слияния с Томью полностью протекает по территории Западно-Сибирской низменности, переходя от ее юго-восточной окраины к центральной части среди заболоченных таежных равнин (Васюганье). Это определяет повсеместно свободные условия развития русловых деформаций, наличие очень широкой поймы и легкую размываемость берегов. Для реки характерно быстрое нарастание водности вниз по течению из-за слияния с такими сравнительно крупными реками, как Чулым, Кеть, Васюган, Тым, а также впадения многочисленных малых рек. Обь ниже устья Томи характеризуется преимущественно меандрирующим руслом с широким распространением прорванных излучин и развитой пойменной многоруканностью.

Нижняя Томь (от 104 км до устья) характеризуется резкой сменой геолого-геоморфологических и физико-географических условий. В районе Томска проходит явно выраженная граница между структурами Кольвань-Томской складчатой зоны и Западно-Сибирской плиты. Геологическая граница отчетливо отражается в форме продольного профиля реки. Принятый нами как исходный, продольный профиль водной поверхности и дна реки за 1933 г. (до начала интенсивной техногенной нагрузки) отличался наличием резкого перелома в районе 62 км от устья, так что в целом форма профиля описывалась экспонентой, что довольно редко для продольного профиля равнинных рек на сравнительно коротком участке (100 км); обычно в таких случаях профиль близок к прямому. Морфодинамические типы русла на нижней Томи представлены пойменно-русловыми, одиночными, простыми сопряженными и дельтовыми разветвлениями, а также относительно прямолинейными участками. В расширениях дна долины русло дробится на рукава, а в сужениях становится относительно прямолинейным или слабо извилистым.

Река Чулым – самый крупный после Томи правый приток Оби. Чулым образуется слиянием горных рек Белого и Черного Июса, берущих начало на северо-восточных склонах Кузнецкого Алатау. В верхнем течении река имеет горный характер, галечно-гравелистое устойчивое русло. В среднем и нижнем течении реки русло сложено легкоразмываемыми песчаными и песчано-глинистыми грунтами. На всем его протяжении, используемом для судоходства или бывшим таковым в прошлом, абсолютно пре-

обладают условия свободного развития русловых деформаций. По всей своей длине Чулым меандрирует. Однако, кроме излучин разного вида, встречаются также небольшие относительно прямолинейные отрезки русла и одиночные разветвления. Всего на Чулыме насчитывается 318 свободных излучин. Из них 74% относятся к сегментным, 16% – к омеговидным, 5% – к синусоидальным, 3% – к заваленным и 2% – к прочим (Русловые процессы..., 2001).

Река Васюган – левый приток Оби, имеет сильно заболоченный (55%), асимметричный бассейн. Протекает в широкой долине. Правый склон ее крутой и обрывистый, хотя и невысокий, слабо рассечен речной сетью; левый – пологий и хорошо дренированный. Правобережье – плоская равнина с незначительными колебаниями высот – от 0,5 до 3 м, покрыта мощными торфяниками, являющимися фактором, замедляющим горизонтальные деформации речных русел. Русло Васюгана в основном меандрирующее. Только на 30% его протяженности встречаются другие типы русла – относительно прямолинейные участки и небольшие пойменно-русловые разветвления. Имеются вынужденные излучины. Из 571 свободных излучин 78% относятся к сегментным, омеговидных излучин на Васюгане всего 13%, а синусоидальных – 6% (Русловые процессы..., 2001).

Река Кеть – правый приток Оби, берет начало на Обь-Енисейском водоразделе. Протекает по широкой долине, ширина которой в некоторых местах достигает 20 км, имея обширную пойму. Бассейн сильно заболочен и покрыт лесом. Кеть – река меандрирующая, 77% длины ее русла приходится на излучины, но имеются участки относительно прямолинейного русла – в пойменных берегах (21%) и небольшой участок пойменно-руслового разветвления. Для меандрирующего русла наиболее характерны сегментные излучины, доля которых составляет 82%, далее идут омеговидные – 15%, заваленные – 2% и синусоидальные – 1% излучины (Русловые процессы..., 2001).

Река Тым – правый приток Оби, течет в основном по широкой долине с обширной поймой. На всем своем протяжении Тым меандрирует, и лишь на отдельных участках встречаются как относительно прямолинейное русло (8% от общей длины судоходных участков), так и одиночные разветвления (2%) и пойменно-русловые разветвления (2%). Всего на Тyme насчитывается 336 свободных излучин, из них: 78% – сегментные, 16% – омеговидные, 2% – синусоидальные и 1% – заваленные излучины (Русловые процессы..., 2001).

Фрактальный анализ морфологически однородных участков рек. По предложенной методике был обработан 21 морфологически однородный участок рек Томской области, для них построены логарифмиче-

ские графики зависимости $L_r = f(r)$ для однорукавных русел и $N = f(r)$ – для многорукавных. Среди отобранных участков 6 характеризуются многорукавным руслом и 15 участков с однорукавным руслом. Множество исследованных русловых форм представлено в основном руслами рек, разветвленными на рукава, прямолинейными участками русла и свободными меандрами на широких поймах, поскольку для рек Томской области свободное меандрирование является наиболее характерным и распространенным видом русловых процессов. Таким образом, анализируемые материалы охватывают основные морфологические виды однородных участков, типичных для рек Томской области.

Фактические измерения проводились вручную. Исследованные русловые формы, являющиеся срединными линиями рек, были рассмотрены на лощманских картах. Хотя лощманские карты не имеют координатной сетки, почти не отображают топографическую ситуацию на берегах и в ряде случаев весьма схематичны, их использование для вычисления фрактальных характеристик вполне удовлетворительно. Мы использовали карты 1:50000, 1:25 000, 1:10 000 и 1:5 000 масштабов, для каждого из них была выбрана своя сетка значений длин шагов измерения таким образом, чтобы минимальная длина одного шага измерения составляла не более 100 м истинного масштаба. Затем каждой выбранной единице измерения (размеру раствора циркуля) ставилась в соответствие длина речного русла. Полученные точки откладывались на графике в двойном логарифмическом масштабе. В дальнейшем часть графиков, характеризуемая средними масштабами и имеющая ненулевой наклон, была аппроксимирована линейной функцией, что позволило найти показатели фрактальной размерности.

Абсциссы точек перегиба полученных графиков указывают на значения масштабов фрактальности планового рисунка речного русла, по ним можно найти значения m и M . В этом диапазоне масштабов график Ричардсона имеет ненулевой наклон, и именно в этом диапазоне сохраняются свойства самоподобия исследованных форм русла.

Также с помощью значения M были вычислены показатели фрактальной извилистости для каждого морфологически однородного участка. Более подробно методика получения фрактальных показателей была описана выше.

Фрактальный анализ однорукавного русла. На р. Чулым было выбрано 4 участка в верхнем, среднем и нижнем течении. Один из них (№ 1) относительно прямолинейный, а для трех других характерна высокая степень извилистости. Показатели фрактальной размерности, полученные в результате анализа р. Чулым, вполне отражают степень извилистости

данных участков и имеют значения: 1,12; 1,24; 1,31; 1,28 соответственно (табл. 4.2.1). Внутренние масштабы фрактальности участков русла на порядок превосходят среднюю ширину русла. Внешние масштабы фрактальности в основном соответствуют масштабу 1:1 000 000, т.е. при рассмотрении плановых рисунков речных участков в масштабах, больших указанно-го, свойство самоподобия исчезает.

Таблица 4.2.1

Фрактальные характеристики морфологически однородных одноорукавных участков рек Томской области

Характеристика	L	D	m	M	P_f	k	Протяженность участка
Участки							
Чулым 1	31	1,1257	0,5	10	1,31	1,4	от 316 до 347 км
Чулым 2	42	1,2395	1,0	8,5	1,6	1,6	от 147 до 216 км
Чулым 3	42	1,3141	0,65	8,5	1,948	2,3	от 720 до 762 км
Чулым 4	55	1,2853	0,65	12	2,039	2,3	от 392 до 447 км
Тым 1	40	1,2532	0,45	6,0	1,896	1,9	от 455 до 495 км
Тым 2	40	1,5097	0,5	5,0	2,77	3,2	от 225 до 265 км
Тым 3	40	1,4187	0,4	5,0	2,42	2,6	от 100 до 140 км
Васюган 1	30	1,1969	0,5	9,5	1,621	1,7	от 40 до 70 км
Васюган 2	20	1,3815	0,35	5,0	2,7	3,1	от 400 до 420 км
Васюган 3	30	1,4363	0,4	6,0	2,67	2,9	от 545 до 575 км
Васюган 4	30	1,1961	0,4	5,0	1,796	1,7	от 500 до 530 км
Кеть 1	73	1,2396	0,25	4,5	1,856	1,9	от 663 до 736 км
Кеть 2	89	1,3323	0,45	8,5	2,31	2,3	от 272 до 361 км
Кеть 3	152	1,2294	0,8	10	1,654	1,6	от устья до 152 км
Кеть_4	76,5	1,3002	0,35	4,5	1,961	2,1	от устья р. Лайги до устья р. Озерной
Кеть 2,1913	74	1,357	0,5	7,0	2,12	2,2	от 272 до 361 км
Кеть_4,1913	69	1,1935	0,4	8,0	1,851	1,8	от устья р. Лайги до устья р. Озерной

Продемонстрируем *методику выявления регулярных излучин* и определения их морфометрических показателей. Рассмотрим график (рис. 4.2.1). Разрывы на графиках говорят о наличии регулярных компонент в исследуемых формах русла и являются показателем периодичности анализируемых данных. Это указывает на возрастающую изрезанность речных форм по мере увеличения единицы длины. Так, по данным графика участка Чулым_3 можно получить характеристики регулярных компонент

¹ Обозначения: L – длина русла, D – фрактальная размерность, m – внутренний масштаб фрактальности, M – внешний масштаб фрактальности, P_f – коэффициент фрактальной извилистости, k – коэффициент извилистости

исследуемого русла. Поскольку положительный наклон имеет совокупность точек в диапазоне масштабов от $0,38 = \lg(2,4)$ до $0,477 = \lg(3)$, то, соответственно, длина шага излуины $L = 2,4$ км и ширина пояса меандрирования $B = 3$ км.

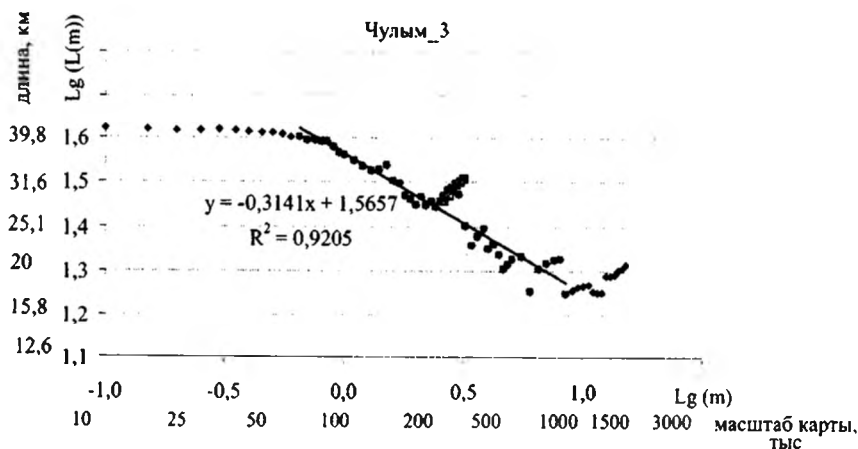


Рис. 4.2.1. График фрактального анализа участка русла, содержащего регулярные компоненты

Для р. Кеть были выбраны 4 модельных участка. Значения фрактальных размерностей колеблются в пределах от 1,23 до 1,33 и характеризуют высокую степень извилистости анализируемых участков. Нижний предел масштабов фрактальности также на порядок выше средней ширины русла, а верхний предел существенно зависит от длины участка (табл. 4.2.1). Из четырех исследуемых морфологически однородных участков р. Кеть, для двух был проведен расчет фрактальных показателей по картам за различные годы: 1971 и 1913.

В связи с тем, что изменение фрактальности свидетельствует как о смене генетических факторов образования системы, так и об изменении собственных параметров объекта, исследование динамики фрактальных характеристик за различные годы весьма перспективно. Анализ желательного проводить по сериям одномасштабных карт за разные годы с интервалом 20-30 лет; считается, что за такой период времени существенно меняется морфология русла. При подобном изучении фрактальных показателей необходимо наложение данных о динамике русловых деформаций, погодных и климатических изменениях, а также о техногенной и антропогенной нагрузке на данную территорию за исследуемый период времени.

Нами был проведен фрактальный анализ р. Кеть по сериям карт только за 1913 и 1971 годы. На одном из модельных участков (№ 2) показатель фрактальной размерности незначительно уменьшился: в 1913 году $D_H = 1,39$, а в 1971 году – 1,33. Однако на другом участке (№ 4) данный показатель изменился в обратную сторону, и притом существенно: в 1913 году $D_H = 1,19$; в 1971 – 1,3.

К сожалению, по нашим данным корректных выводов об изменении морфометрии модельных участков сделать нельзя, можно только продемонстрировать полученные показатели. Методика фрактального анализа, которая позволила бы проследить динамику и судить о степени изменения структуры русла, о росте извилистости, длины или, наоборот, о выравнивании и выпрямлении русла, в настоящее время находится в разработке.

Из четырех анализируемых морфологически однородных участков р. Васюган два участка (№ 2 и № 3) показали высокие значения фрактальной извилистости ($D_H = 1,38$ и $D_H = 1,46$ соответственно), а два других (№ 1 и № 4) – одинаковые, средние значения ($D_H = 1,19$). Внутренние масштабы фрактальности в среднем имеют значение 1:40 000, что на порядок выше ширины русла р. Васюган. Внешние масштабы фрактальности колеблются от 1:500 000 до 1:800 000, в зависимости от длины исследуемого участка (см. табл. 4.2.1). Естественно, что участок длиной 20 км, при его рассмотрении в масштабе 1:800 000, не может сохранять фрактальные свойства, поскольку в таком масштабе он будет представлен гладкой кривой.

На участке № 4 так же, как и на участке р. Чулым, видны существенные разрывы в центральной части графика Ричардсона. Это говорит о наличии регулярных компонент в плановом рисунке данного участка русла. Метод выявления их параметров описан выше.

Для р. Тым нами были проведены исследования на трех участках: в верхнем, нижнем и среднем течении. В результате анализа выявлено, что показатели фрактальной размерности участков № 2 и 3 ($D_H = 1,51$ и $D_H = 1,42$ соответственно) имеют рекордно высокие значения, что говорит не только о высокой степени извилистости, но и о значительной скорости увеличения длины русла с изменением масштаба. Диапазон фрактальных масштабов довольно мал, для всех участков р. Тым он составляет от 1:45 000 до 1:600 000 ($m \approx 0,45$ и $M \approx 6$) (см. табл. 4.2.1).

Следует особо отметить, что, по результатам наших исследований и по данным других авторов (Никора, 1992; Berquist, 1985; Richardson, 1961; Snow, 1989), показатели фрактальной размерности зависят только от степени извилистости исследуемого участка, тогда как диапазон фрактальных масштабов зависит еще и от крупности реки. Чем шире русло реки, тем

выше показатель m внутреннего масштаба фрактальности, он приблизительно на порядок выше средней ширины русла. К такому же выводу пришел и R. Scott Snow (1989), однако, по данным В.И. Никоры (1992), внутренний масштаб фрактальности имеет значение, близкое к значению средней ширины русла исследуемого участка. Несмотря на такие расхождения, несомненно, прослеживается зависимость внутреннего масштаба фрактальности от ширины русла. Значение внешнего масштаба фрактальности M существенно зависит от длины участка речного русла. Значение длины участка выступает ограничивающим фактором для верхнего предела фрактальности объекта.

Для каждого морфологически однородного участка одноруканного русла были вычислены показатели фрактальной извилистости P . Естественно, что их значения меньше, чем коэффициенты извилистости тех же участков, поскольку при вычислении фрактальной извилистости учитываются излучины больших масштабов и не учитывается возрастание блуждания русла, обусловленного внешним ограничением речной системы. Полученные значения приведены в табл. 4.2.1, там же для сравнения представлены показатели коэффициентов извилистости исследуемых участков.

Фрактальный анализ многоруканного русла. Для многоруканных русел был также проведен фрактальный анализ, в основу которого положена методика (Мандельброт, 2002; Никора, 1992 и др.), описанная выше. За основу взяты крупномасштабные лодманские карты 1:25 000 и 1:50 000 масштаба, на которых представлено изображение руслового рисунка с достаточно детальным разрешением особенностей его структуры. В результате исследований построены графики в двойном логарифмическом масштабе зависимости числа ячеек N , содержащих линию русла, от размера ячеек. По графикам найдены значения фрактальной размерности разветвленной структуры исследуемых участков и значения внутренних и внешних масштабов фрактальности.

Для р. Оби выбраны два участка выше устья Томи и два – ниже. Фрактальный анализ первого участка дал невысокий показатель размерности, равный 1,207, что, несомненно, можно объяснить распространением морфодинамических типов на исследуемом отрезке русла. Разветвленная структура участка от мыса Скала до села Батурино развита слабо, она охватывает сопряженные, одиночные разветвления, прямолинейное неразветвленное русло с разветвлениями второго порядка и одиночные разветвления веерного типа (Русловые процессы..., 2001).

Участок № 2 (от устья реки Таган до устья реки Томи) представлен сопряженными и односторонними разветвлениями, свободными и вынуж-

денными излучинами. Здесь также встречаются участки с прямолинейным неразветвленным руслом. А при слиянии с р. Томью русло имеет дельтовые разветвления (Русловые процессы..., 2001). Показатель фрактальной размерности данного участка равен 1,303.

Анализируемые участки русла ниже слияния Оби и Томи также имеют невысокие значения фрактальной размерности: для участка № 3 $DH = 1,29$, а для четвертого участка $DH = 1,301$. Обь ниже устья Томи характеризуется преимущественно меандрирующим руслом, с широким распространением прорванных излучин и развитой пойменной многорукавностью. Результаты фрактального анализа для реки Оби представлены в табл. 4.2.2.

Таблица 4.2.2

Фрактальные характеристики морфологически однородных многорукавных участков рек Томской области

Характеристика Участок	D	m	M	Протяженность участка
Обь_1	1,207	0,45	15,0	от п. Скала (754 км) до Батурино (828 км), участок длиной 74 км
Обь_2	1,303	0,45	10,0	от устья р. Таган (919 км) до устья р. Томи (986), участок длиной 67 км
Обь_3	1,287	0,5	15,0	от устья р. Чулым (1125 км) до устья р. Чая (1229 км), участок длиной 104 км
Обь_4	1,301	0,5	10,0	от протока Осмега (1767 км) до г. Стрежевого (1882 км), участок длиной 115 км
Томь_1	1,382	0,35	10,0	от 108 км до г. Томска, участок длиной пр. 38 км
Томь_2	1,301	0,35	10,0	от 46 км до устья, участок длиной 46 км

Для реки Томи фрактальный анализ проведен по двум модельным участкам. На участке № 1 (от 108 км до города Томска) значение фрактальной размерности довольно высокое, $D_{II} = 1,38$. Это объясняется тем, что сначала (104-82 км) русло представлено двумя пойменно-русловыми разветвлениями, между которыми оно образует крупную излучину у Синего Утеса, а на участке от 82 до 74 км русло образует два одиночных разветвления – островами Басандайским и безымянным перед п. Гидрораствор.

Участок № 2, в 46 км до устья, имеет также разветвленное русло и охватывает систему простых сопряженных разветвлений (45–30 км), крупное пойменно-русловое разветвление (30–16 км) и дельтовое разветвление в узле слияния Томи и Оби (Русловые процессы..., 2001). Показатель фрактальной размерности данного участка равен 1,3.

Диапазон фрактальных масштабов составляет от 1:35 000 до 1:1 000 000.

По результатам анализа участков рек с многорукавным руслом видно, что значения показателей фрактальной размерности лежат в интервале от 1,2 до 1,38. Это свидетельствует о невысокой степени разветвленности и слабой иерархичности структуры исследуемых участков. Но тот факт, что почти для всех участков $D_{II} \approx 1,3$, указывает на действие единых физических механизмов на анализируемых пространственно-временных интервалах и на неизменность собственных параметров русла и однородность его структуры.

Таким образом, из изложенного в данном параграфе возможно сделать следующие выводы:

1. Исследование морфологии однорукавного речного русла, основанное на фрактальной геометрии, позволяет выделить и описать регулярные компоненты планового рисунка русла.

2. Извилистость и фрактальная размерность взаимосвязаны, но не являются прямо соизмеримыми мерами блуждания потока. Значение фрактальной размерности в большей мере указывает на возрастание извилистости и степень увеличения длины русла с изменением масштаба.

3. Незначительный диапазон значений фрактальной размерности для морфологически однородных участков рек Гомской области указывает на действие единых физических механизмов в пределах анализируемых пространственно-временных интервалов, а также на неизменность собственных параметров русла и однородность его структуры.

4.3. Интегральный фрактальный анализ морфологии и динамики поймы р. Дунай

Морфология таких географических объектов, как основные и второстепенные рукава р. Дунай, острова, находящиеся в пойме Балта-Брзилей и в бассейне р. Жижилы (в горах Мачин), характеризуется сложностью, неравномерностью, прерывистостью, несогласованностью с евклидовой геометрией, поэтому можно утверждать, что им свойствен фрактальный характер, и, следовательно, к их изучению применимы методы фрактального анализа.

Большая Пойма Балта-Брзилей – самая протяженная часть поймы между главными рукавами Дуная (Мэчин и Навигационный Дунай), начинающая с низовья от Острова Гыска, с правой стороны Хыршовы и до Брзила, представляет северный сектор бывших «Пойм Дуная». Последние, до

1964 года, занимали приблизительно 3,322 км², сформировав внутреннюю дельту. Григоре Антипа, в 1910 году, утверждал в работе «Затопляемая территория Дуная – его актуальное состояние и методы оценки», что Дунай от входа в страну и до Чёрного моря имеет пойменную зону 891,232 га, из которых, без учета площади поймы (404,748 га), пойма Дуная, как особое геоморфологическое формирование, располагается на 4.865 км². В указанных пределах Балта-Брзилей имеет, в среднем, длину 60 км и ширину 22 км, а общая площадь составляет 96,000 га. Сегодня площадь Балты-Брзилы (71,994 га) защищается от наводнений гидромелиоративными работами.

Антропогенное воздействие на пойму Балта-Брзилей, начиная с 1964 года, стало наиболее интенсивным. В это время вся зона была обвалована круговой дамбой 150,5 км, средней высотой 4 м, которая защищает площадь в 72,173 га. Результатом строительства дамбы и устранения опасности затопления стало дальнейшее повреждение площади излишком влаги, вызванное инфильтрацией из-под дамб, осадками, сливами с площади высокой поймы, к которым прибавляется и риск вторичного засоления. Так начались работы по осушению для отвода излишков влаги, вызванных осадками, просачиванием и потоками подземных вод. Осушение территории проводилось в 2 этапа: 1967-1969 и 1970-1972 годы. Общая осушенная площадь составляет 69241 га. Одновременно выполнялись работы по вырубке лесов, удалению кустарников, нивелированию балок и протоков, систематизации населенных центров и дорожных сетей. Осуществленное ранее осушение привело регион в условия зоны степного климата, в результате чего стали абсолютно необходимыми орошения. Они происходили в период 1975-1978 гг. для площади 69730 га.

Сегодняшний рельеф поймы Большая Балта-Брзилей характеризуется специфичной зонированностью, которая отражает последовательность процессов аккумуляции и эрозии, оказываясь рекой в прошлом. Морфологически сейчас различаются 3 зоны: *зона речных ложбин, промежуточная зона и низкая зона.*

Малая Пойма Балта-Брзилей является зоной международного интереса (сит RAMSAR), поскольку представляет собой след, оставшийся после осушения бывшей Внутренней дельты (пойма Балта-Брзилей и пойма Балта Яломшии) в естественном режиме затопления поймы нижнего течения Дуная. Малая пойма Балта-Брзилей в настоящее время консервирует комплексы гидро- и агроэкосистем в форме, приближенной к начальной.

Природный парк Малая пойма Балта-Брэилей находится в пойме Дуная, между Равниной Брэила и Большой поймой Балта-Брэилей, на площади 24555 га, включая рукава Дуная. Малая пойма Балта-Брэилей занимает участок в 62 км в нижнем течении Дуная и ограничивается зонами дамб-берег Луга Северный Бэрэган к западу, Большого Балта-Брэилей к востоку, между мостом Джуурджень – Ваду Оий (237 км вверх по течению) и муниципальной территорией Брэила (175 км ниже).

С геоморфологической точки зрения, Малая Пойма Балта-Брэилей представляет собой цепь из семи островов, площадь крупнейшего из которых составляет 250 га. Малая Пойма Балта-Брэилей занимает площадь 152 км², из них 57 км² приходится на водоемы, включая Дунай, его притоки и 52 внутренних озера. Каждый остров имеет свои геоморфологические особенности и характеризуется комплексом морфометрических и гидрологических показателей, что, в свою очередь, создает большое разнообразие условий среды обитания. В унитарной базе данных Природного парка Малой Балта-Брэилей было выявлено и зарегистрировано более 345 биотопов. Все острова отличаются характерной особенностью, они имеют вид «перевернутой тарелки» – высокие во внутренней части и низкие на периферии.

Долина Жижила является составляющей частью малых северных Доброжских вод, источник которых берет свое начало в горах Мэчин (на высоте 300 метров). Она находится в северо-западной части Пика Гречь, разделяет горы Мэчин – холм Кишэ – холм Чиклэйашь – холм Вэжэрень от горного хребта Прикопань – холм Сэрэрией – холм Орлига, пробивается сквозь впадину Жижила и впадает в Дунай по правой стороне, посредством озера Жижила, расположенного в пойме Дуная.

Гидрографический бассейн Жижила находится на Северо-Доброжском горообразовании (хребет Прикопань – горы Мэчин) и в пойменной зоне Дуная, а с литологической точки зрения находится на склоне Мэсин, сложенном гнейсами, гранитами, гранодиоритами, амфиболитами, кварцитами, филлитами, кварцевыми сланцами, частично затопленными залежами лессоидов и четвертичными лессами (Abraham, Christopher, 1992). Наряду с лессами, также присутствуют четвертичные отложения следующих видов: элювиальные (на участках абразии), делювиальные, коллювиальные отложения, пролювиальные отложения (на склонах) и аллювий (в пойме Дуная).

Гидрографический бассейн Жижила располагается на площади в 47,426 км², характеризуется умеренной левосторонней асимметрией. Значение коэффициента асимметрии составляет 0,3816, более заметное в

верхнем и среднем течении. Площадь бассейна на левой стороне составляет 28,238 км², а на правой – 19,188 км².

Речная сеть характеризуется высоким коэффициентом извилистости (1,623), что объясняется удлиненной конфигурацией гидрографического бассейна и средней высотой, составляющей 176,3 м. Существует небольшое различие между правосторонней и левосторонней частью бассейна Жижила. Большая высота с левой стороны (208,12 м) в основном объясняется наличием некоторых острых инсельбергов, возникших на твердых породах, в то время как с правой стороны (144,5 м) преобладают закругленные и куполообразные инсельберги.

При определении фрактальной размерности объект измеряется при помощи набора масштабов, с каждым разом все более мелких, в результате чего получается ряд приближений к анализируемому объекту. Затем изучается конвергенция этого ряда результатов, его величина (D) является фрактальной размерностью.

При фрактальном анализе мы использовали метод box-counting (метод квадратов), по причине его гибкости и надежности вычислений. Метод box-counting хорошо подходит для исследования двумерных гетерогенных и беспорядочных структур, тогда как использование других методов обычно сопряжено с большими трудностями в определении фрактальной размерности. Метод box-counting позволяет не только определить фрактальную размерность, но и распознать возможные режимы масштабности.

Этот метод можно применять как при определении фрактальной размерности рукавов Дуная, так и площадей и периметров островов территории поймы Балта-Брэилей.

Изображения основных и второстепенных рукавов Дуная, а также контуры островов были получены на основании спутниковой съемки поймы Балта-Брэилей 31 мая 2006, адаптированной в масштабе 1:200.000. Спутниковая съемка заимствована с сайта Национального Института Метеорологии и Гидрологии (www.inmh.ro/images/floods/index6bda.html?stage=zona&cat=5) (фиг. 14).

Изображение полученных контуров бинарно конвертировано с использованием software XnView 1.93.6, на основании полученных результатов вычислены значения фрактальных размерностей с использованием программы software Fractal 3e.

Аналогично был исследован гидрографический бассейн Жижила (рис. 4.3.1-4.3.6). На основании спутниковых изображений оказалось возможным выполнение фрактального анализа гидрографического бассейна Жижила.

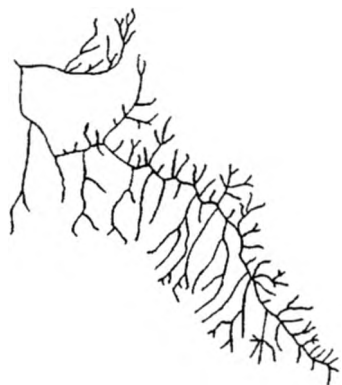


Рис. 4.3.1. Гидрографический бассейн Жижилы



Рис. 4.3.2. Притоки первого порядка по классификации Хортона-Стралера

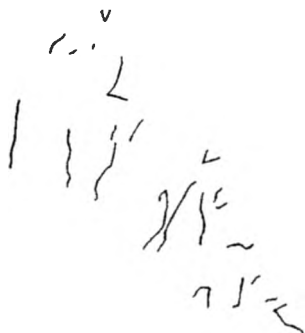


Рис. 4.3.3. Притоки второго порядка по классификации Хортона-Стралера



Рис. 4.3.4. Притоки третьего порядка по классификации Хортона-Стралера

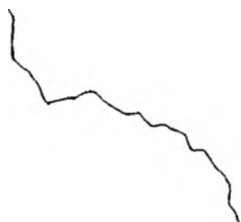


Рис. 4.3.5. Притоки четвертого порядка по классификации Хортона-Стралера

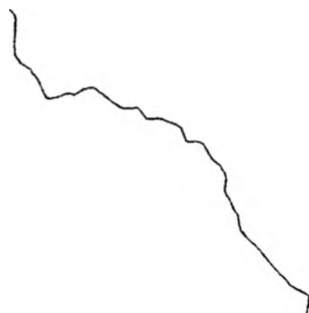


Рис. 4.3.6. Долина Жижилы

Предварительно была выполнена классификация гидрографической сети по системе Хортон-Стралера. Данная система построения иерархии водотоков позволяет провести фрактальный анализ, дает возможность статистически обработать полученные данные по порядкам рек, а также выполнить сравнительный анализ.

Согласно иерархии Хортон-Стралера, неразветвленным элементарным потокам присваивается первый порядок. Потоки второго порядка образуются при слиянии двух потоков первого порядка. Третий порядок потоков определяется слиянием потоков второго порядка и так далее. Если у реки более высокого порядка (например, IV) существует приток более низкого порядка (например, I, II или III), то скачка при слиянии не происходит, и порядок реки не меняется (остается IV).

В рамках гидрографического бассейна Жижилы были выявлены 148 притоков (с распределением 3,12 притоков на 1 км^2), из которых: 113 притоков первого порядка (73 притока на правой стороне, 39 притоков реки на левой стороне и сегмент реки первого порядка Долины Жижилы), 28 притоков второго класса (17 – на правой стороне, 10 – на левой стороне и сегмент реки второго порядка Долины Жижилы), 6 притоков реки третьего порядка (3 – на правой стороне, 2 – на левой стороне и сегмент реки третьего порядка Долины Жижилы) и 1 сегмент реки четвертого порядка, полученный в результате слияния сегмента реки третьего порядка Долины Жижилы и Долины Ион Попа. Можно заметить, особенно для притоков реки первого и второго порядка, что наибольшее их количество на правой стороне там, где педименты занимают меньшую площадь.

Предварительно, чтобы убедиться в достоверности и точности определения фрактальной размерности методом box-counting, используемым в программе software Fractal 3e, были проведены тесты.

В рамках тестов определялось – имеет ли метод вычисления фрактальной размерности ряд ошибок измерения, вызванных следующими причинами: разрешением изображения, которое содержит анализируемый объект; положением анализируемого объекта в рамках изображения.

Касательно роли разрешения изображения, при надежном определении фрактальной размерности, был проведен ряд измерений на классических фракталах, чья фрактальная размерность может быть точно математически вычислена (прямая, кривая Коха, треугольник Серпинского), при различных разрешениях: 512×512 , 1024×1024 , 2048×2048 , 4096×4096 . В результате этих тестов было замечено, что правильная оценка фрактальной размерности осуществляется при высоком разрешении. В результате было выбрано разрешение 2048×2048 .

На втором этапе была выявлена зависимость значения фрактальной размерности объекта от расположения его изображения (рис. 4.3.7-4.3.8). В результате этих тестов метода box-counting, используемого Fractal 3e, было получено стандартное отклонение 0,0033016. Таким образом, к результатам, полученным этим методом, должна быть применена, для более точной оценки, коррекция $\pm 0,0033016$.

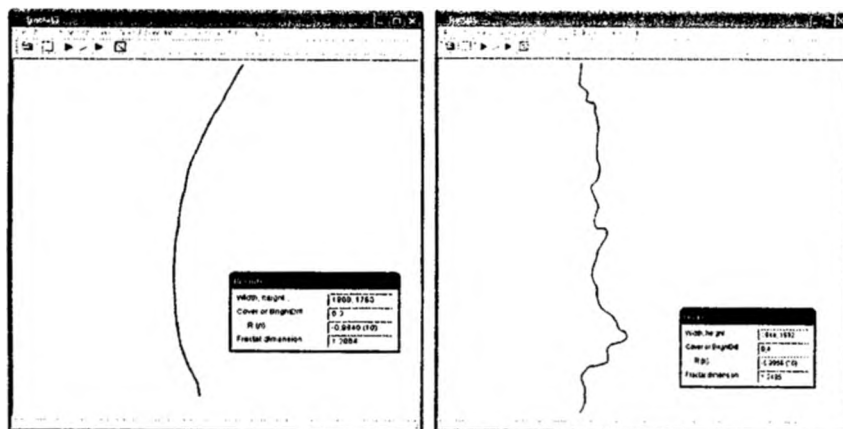


Рис. 4.3.7. Расчет фрактальной размерности рукавов Харату и Вылчу

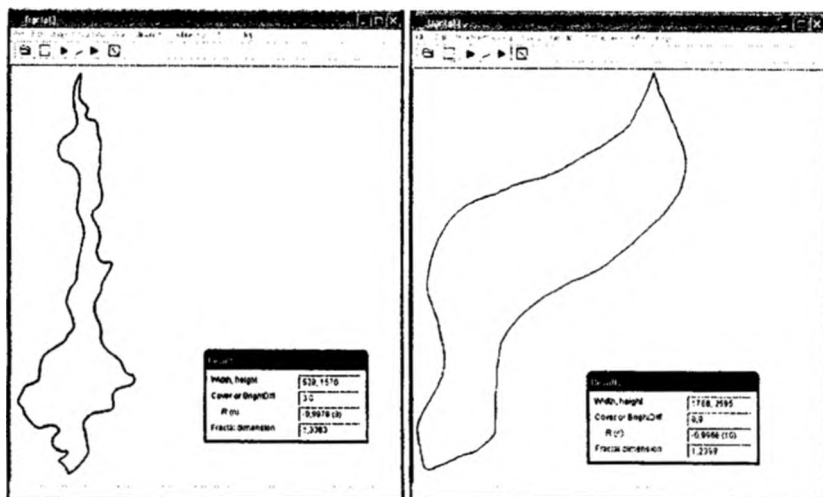


Рис. 4.3.8. Расчет фрактальной размерности периметров островов Крэкнел и поймы Малая Балта-Брэилей

Фрактальная размерность была определена как вручную, так и с использованием software Fractal 3e и Benoit, посредством метода box-counting, для основных и второстепенных рукавов Дуная, для периметров и площадей островов, находящихся в пойме Балта-Брэилей, в гидрографическом бассейне Жижила, а также для временной динамики климатических, гидрогеологических и гидрологических параметров поймы Балта-Брэилей, в результате чего были получены следующие значения, приведенные в табл. 4.3.1-4.3.3.

Таблица 4.3.1

Значения фрактальной размерности для основных и второстепенных рукавов

№	Объект	Размерность
1	рукав Харапу	1,2064
2	рукав Мэнушоая	1,2267
3	рукав Орбу	1,2272
4	рукав Кременеа	1,2278
5	рукав Калия	1,2281
6	рукав Мэчин	1,2306
7	рукав Кравия	1,2340
8	рукав Судходный Дунай	1,2486
9	рукав Вылчигу	1,2495

Таблица 4.3.2

Значения фрактальной размерности для периметров

№	Объект	Размерность
1	остров Крэкэнел	1,2499
2	остров Калия	1,2632
3	остров Фунду Маре	1,2699
4	остров Кичу Орбулуй	1,2736
5	остров Вэрсэтура	1,2779
6	пойма Большая Балта-Брэилей	1,2803
7	остров Харапу	1,2888
8	остров Пойма Малая Балта-Брэилей	1,3363

Таблица 4.3.3

Значения фрактальной размерности для периметров для площадей

№	Объект	Размерность
1	остров Харапу	1,9341
2	остров Вэрсэтура	1,9021
3	пойма Большая Балта-Брэилей	1,8977
4	остров Крэкэнел	1,8916
5	остров Фунду Маре	1,8889
6	остров Кичу Орбулуй	1,8674
7	остров Калия	1,8026
8	остров поймы Малая Балта-Брэилей	1,7884

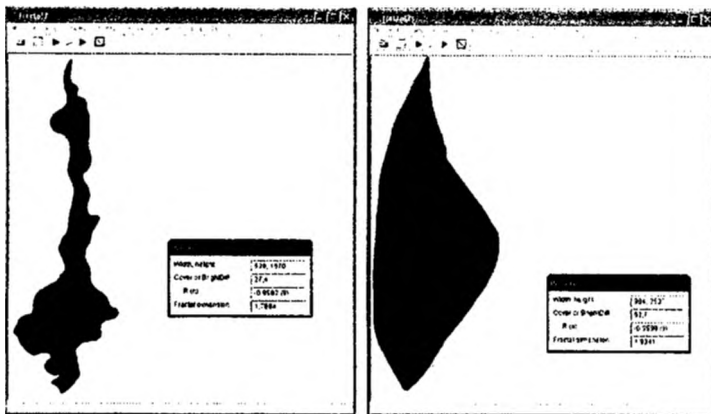


Рис. 4.3.9. Расчет фрактальной размерности площадей островов Крэкэнел и поймы Малая Балта-Брэилей

Таблица 4.3.4

Результаты дифференциации по значению величины фрактальной размерности

№	Объект	Интервал
<i>для основных и второстепенных рукавов Дуная</i>		
1	Харапу	< 1,22
2	Орбу, Кременса, Калия и Мэнушоая	1,221-1,23
3	Мэчин и Кравия	1,231-1,24
4	Вылчиу и Судоходный Дунай	1,241
<i>для периметров островов</i>		
1	Крэкэнел	<1,25
2	Калия и Фунду Маре	1,251-1,27
3	Вэрсэтура, Харапу, Кичу Орбулуй и пойма Большая Балта-Брэилей	1,271-1,29
4	пойма Малая Балта-Брэилей	1,291
<i>для площадей островов</i>		
1	Харапу	1,921
2	Вэрсэтура и пойма Большая Балта-Брэилей	1,901-1,92
3	Фунду Маре и Крэкэнел	1,881-1,90
4	Кичу Орбулуй и пойма Малая Балта-Брэилей	< 1,88

Исследованные объекты были дифференцированы по значению величины фрактальной размерности на 4 группы, в зависимости от их регулярности или сложности (I интервал представляет самую высокую степень регулярности, а IV интервал – самую высокую степень сложности) (табл. 4.3.4). На основании этой классификации были составлены

три карты, показывающие дифференциацию результатов в рамках изучения поймы Балта-Брэйлей, что позволит установить, существует ли связь между пространственным распределением фрактальных показателей и динамикой географической среды.

В случае, гидрографического бассейна Жижила были выполнены расчеты по количеству, длине и фрактальной размерности для притоков различных порядков (рис. 4.3.2-4.3.5), полученные данные представлены в табл. 4.3.5.

Таблица 4.3.5

Значения фрактальной размерности для притоков различных порядков

	Порядок притоков			
	I	II	III	IV
Фрактальная размерность	1,33	1,18	1,10	1,11

Рост степени сложности отражает возникновение многих степеней свободы в рамках системы, отражающееся в усилении динамики и снижении степени предсказуемости.

Анализ фрактальной размерности основных и второстепенных рукавов Дуная в пойме Балта-Брэйлей. При фрактальном анализе речной сети, чем больше фрактальная размерность стремится к 2, тем сильнее возрастает ее сложность (в смысле нестабильности, иррегулярности), речная сеть занимает больше пространства. Значения, более близкие к 1, указывают на более высокую стабильность речного русла.

Из анализа результатов можно заметить, что наименьшую фрактальную размерность имеет приток Харапу (1,2064), расположенный в нижней части Малой поймы Брэйлей. Низкое значение фрактальной размерности этого притока может быть объяснено как более прямолинейной формой русла (коэффициент извилистости 1,05), его небольшой длиной, небольшим количеством жидкого и твердого стока Дуная, так и слабо выраженной динамикой русловых процессов. В этих условиях приток Харапу имеет наибольшую стабильность.

Притоки Орбу, Кременеа, Калия и Мэнушоая, которые включают в себя острова центральной и южной части Малых пойм Брэйлей, имеют фрактальные размерности от 1,23 до 1,24. У них умеренная стабильность, вызванная тем фактом, что эти рукава принимают меньшее количество воды и осадков. При детальном анализе можно, однако, выделить и более сложные секторы, где величина фрактальной размерности больше, и где русловые процессы более ускорены: северная часть притока Орбу, южная часть притока Мэнушоая (рис. 4.3.10).

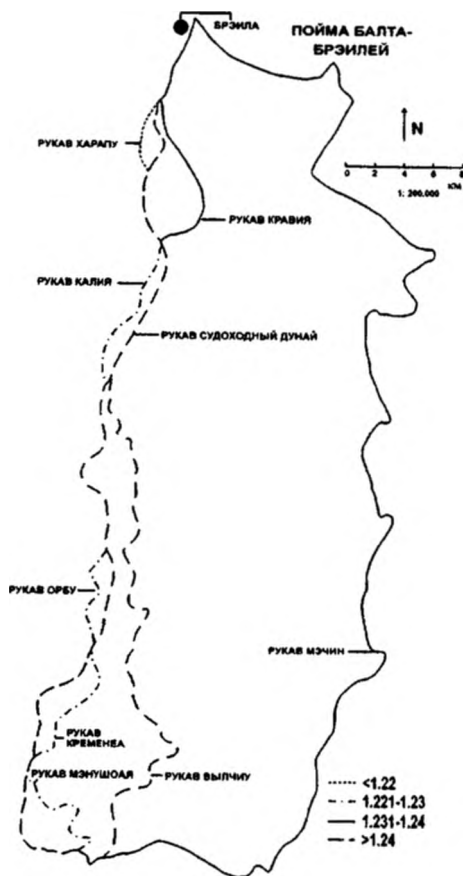


Рис. 4.3.10. Карта фрактальной размерности основных и второстепенных рукавов Дуная в пойме Балта-Брзилей

Притоки Мэчин и Кравия имеют фрактальную размерность от 1,23 до 1,24, обладая, таким образом, повышенной степенью сложности. У притока Мэчин более высокая фрактальная размерность вследствие выраженных тенденций к образованию излучин, к кольматации, а также резких изменений направления, вызванных соседством Северо-Добружского горного массива, его коэффициент извилистости составляет 1,55. В секторе Туркоая – Smyрдан, в правой части гор Мэчин, фрактальная размерность равна 1,2851, в период больших разливов здесь существует риск наводнения. Приток Кравия принимает в себя значительную часть вод и осадков Дуная, что приводит к выраженной динамике русловых процессов (таким обра-

зом, в ареале истока, где эти процессы более интенсивны, фрактальная размерность достигает 1,2703).

Речными руслами с самой большой фрактальной размерностью являются Вылчиу и Судоходный Дунай, которые принимают самую большую часть жидкого (рукав Судоходный Дунай 67,11%, а приток Вылчиу 21,19%) и твердого (рукав Судоходный Дунай 74,43%, а приток Вылчиу 18,50%) стока. Это, фактически, и самые важные рукава Дуная для Малых пойм Брзилей, территории поймы Балта-Брзилей – они обладают большой сложностью и неустойчивостью.

Анализ фрактальной размерности периметров островов поймы Балта-Брзилей. Как и в ситуации с фрактальной размерностью притоков Дуная, насколько фрактальная размерность больше 1, настолько возрастает сложность периметров островов, появляется больше степеней свободы, что приводит к более быстрому возникновению морфологических изменений. В целом фрактальная размерность периметров островов уменьшается от истока к устью, в смысле уменьшения интенсивности поступления наносов. Таким образом, периметры островов, расположенные в районе истока Малых пойм Брзилей (пойма Малая Балта-Брзилей, Вэрсэтура, Кичу Орбулуй) имеют самую большую фрактальную размерность (1,3363; 1,2779, соответственно 1,2736), в то время как острова устья, такие, как Калия и Фунду Маре, имеют меньшую фрактальную размерность (1,2632, соответственно 1,2699).

Самую большую фрактальную размерность имеет остров пойма Малая Балта-Брзилей, это – остров с самой большой сложностью морфодинамических процессов, здесь происходит самая интенсивная кольматация. Существует очень хорошая корреляция с фрактальной размерностью площадей и тех речных русел, которые его окружают: Вылчиу и Судоходный Дунай.

Периметром с самой маленькой фрактальной размерностью является периметр острова Крэкэнел, она составляет 1,2499 из-за небольших размеров и близкой к прямолинейной форме русел. Значительная протяженность этого острова в длину, однако, не дает устойчивости, и как следствие, здесь нет благоприятных условий для более сложных птичьих поселений (рис. 4.3.11).

Интересную ситуацию иллюстрирует остров Харапу. Он обладает хорошей устойчивостью по фрактальной размерности площадей, но все же имеет большую фрактальную размерность периметра, вызванную нерегулярной формой и ярко выраженной динамикой русла Судоходного Дуная в этом секторе. Можно наблюдать дифференциацию в динамике морфодинамических процессов на этом острове, они больше выражены к руслу Судоходного Дуная.

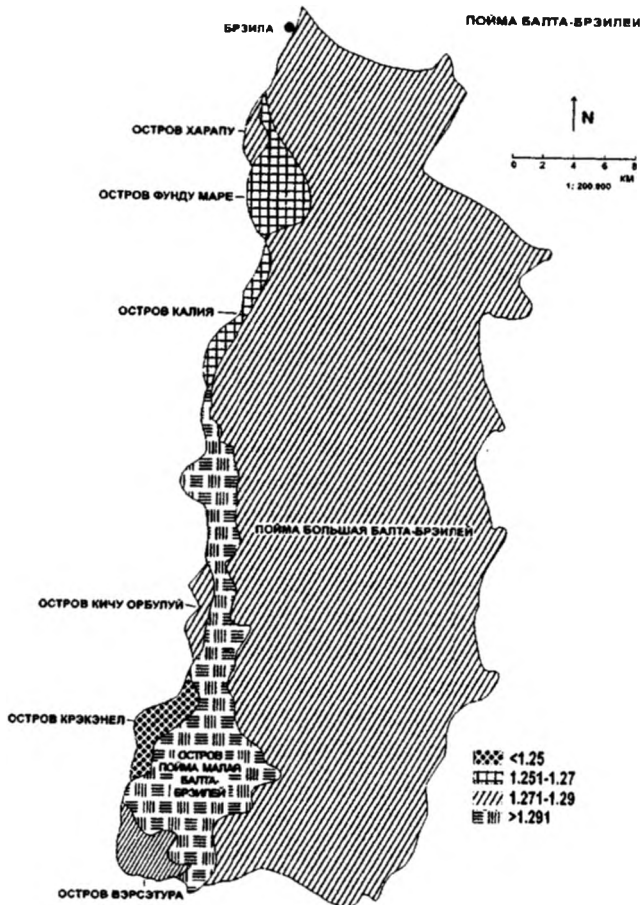


Рис. 4.3.11. Карта фрактальной размерности периметров островов поймы Балта-Брэзлей

Анализ фрактальной размерности площадей островов поймы Балта-Брэзлей. При проведении фрактального анализа площадей мы исходили из двумерной модели анализа, в этих условиях полученная фрактальная размерность меньше 2. В ситуации, в которой проводится анализ трехмерной модели, величина фрактальной размерности площади должна быть больше, чем 2. Мы остановились на этом варианте для того, чтобы была возможна корреляция с фрактальной размерностью периметров. В этих условиях фрактального анализа площадей, чем ближе фрактальная размерность к 2, тем больше стабильность острова, и наоборот.

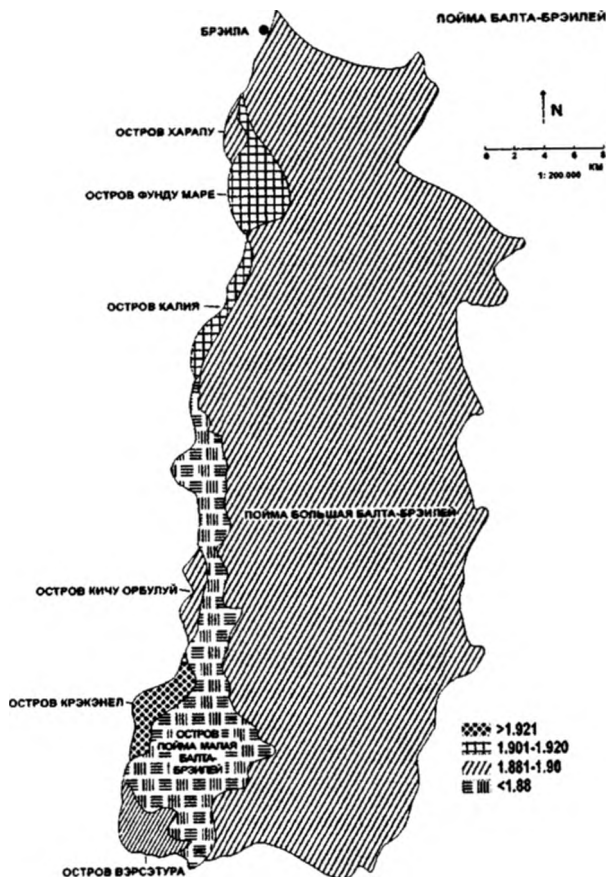


Рис. 4.3.12. Карта фрактальной размерности площадей островов поймы Балта-Брэилей

Анализируя фрактальную размерность площадей островов (рис. 4.3.12), можно заметить, что самую большую фрактальную размерность имеет остров Харапу, она равна 1,927, что отражает хорошую устойчивость этого острова, как и в ситуации притока Харапу. Маленький размер этого острова приводит к тому, что здесь нет благоприятных условий для больших птичьих поселений, как в ситуации с колониями Кирилоая и Мисаила, островом Фунду Маре и колониями Вулпашу и Жигара острова поймы Малая Балта-Брэилей.

Остров Вэрсэтура и пойма Большая Балта-Брэилей имеют фрактальную размерность площадей от 1,90 до 1,92, что указывает на их хорошую

стабильность. Таким образом, пойма Большая Балта-Брзилей до 1964 года функционирующая в естественном режиме стока, благоприятствует биологическому разнообразию, сходному с разнообразием Дельты Дуная (пойма Балта-Брзилей, наряду с поймой Яломица, считаются внутренними дельтами Дуная). Из-за больших размеров и правильной геометрической формы, антропогенное вмешательство смягчалось относительно высокой степенью самовосстановления. Остров Вэрсэтура дал убежище колонии Андронаке, на территории, где фрактальная размерность равна 1,9627; этот факт может подтвердить прямую связь между фрактальной размерностью и условиями поддержания биологического разнообразия.

Низкие значения фрактальной размерности имеют площади островов Крэкэнел и Фунду Маре. В ситуации острова Крэкэнел, а также северной части острова Фунду Маре, причиной может быть ярко выраженная нестабильность, вызванная удлинением этих островов. Остров Фунду Маре, в своей центральной и южной части, имеет фрактальную размерность 1,911. Этот ареал включает в себя два птичьих поселения Кирилоая и Мисаила, они должны быть обустроены для экотуризма. Большая фрактальная размерность отражает хорошую способность самовосстановления экосистемы в ответ на деятельность человека, в том числе и в туристических целях.

Самые маленькие величины фрактальной размерности площадей свойственны островам истока: Кичу Орбулуй, пойма Малая Балта-Брзилей и Калия. Эти острова имеют сложные, удлиненные формы, определяющие большее число степеней свободы. Исключением является сектор Эгрета-Вулпашу острова пойма Малая Балта-Брзилей, где фрактальная размерность равна 1,8944. Эгрета-Вулпашу характеризуется благоприятными условиями для большого количества птичьих поселений Малых поим Брзилей. Эта территория также обладает высокой степенью природного самовосстановления экосистем в ответ на деятельность человека, что благоприятствует включению этого ареала в круг туристической деятельности, даже сразу после запруживания поймы Малая Балта-Брзилей.

Самым сложным островом является пойма Малая Балта-Брзилей. Он находится в самом интенсивном процессе кольматации. Исключение составляет Вулпашу-Эгрета, где благоприятные условия обуславливают стабильность и адаптацию экосистем.

Фрактальная размерность периметров хорошо отражает уменьшение степени кольматации островов от истока к устью.

Пойма Балта-Брзилей до запруживания в 1964 г. имела фрактальную размерность периметра 1,2624 и площади – 1,8996. Эти величины указывают на существование благоприятных условий экосистемы для сопротив-

ления давлению, оказываемому извне, для относительно быстрого восстановления, если они были нарушены. Антропогенное вмешательство в пойме Большая Балта-Брзилей и выход последней из естественного режима стока сильно повлияли на Малые поймы Брзилей, посредством повышенного давления, на фоне существующей нестабильности, вызванной морфологическими параметрами (протяженностью 62 км в длину и лишь 4 км в ширину). Нестабильность и неустойчивость также подтверждается при вычислении фрактальной размерности (она равна 1,8026) площади Малых пойм Брзилей.

Существует тесная связь между фрактальной размерностью, очень близкой к 2, и ареалами, содержащими самое сложное биологическое разнообразие, благодаря более прочной устойчивости и возможности самовосстановления.

Ярко выраженная нестабильность Малых пойм Брзилей требует введения ограничений на туристическую деятельность, ее хорошей организации и сокращения количества туристов – 15 туристов в день в Фунду Маре и 25 туристов в день в Эгрета – пойма Малая Балта-Брзилей. Наиболее привлекательные для туристической деятельности места совпадают с ареалами максимальной концентрации биологического разнообразия, что требует ответственности при проведении туристической деятельности, с тем, чтобы избежать неконтролируемых и непредвиденных рисков.

Меньшая устойчивость острова Калия, особенно в южной части, коррелированная с северной частью острова пойма Малая Балта-Брзилей, выявляет ареал с наиболее выраженной динамикой морфогенетических процессов. Существует вероятность объединения со временем этих двух островов. В связи с этим уже появился проект возвращения, в результате декольматации, к навигации по руслу Судходного Дуная в секторе острова Калия, в настоящее время навигация происходит по рукаву Калия (рис. 4.3.10 – критическая зона).

Считаем, что дальнейший фрактальный анализ поймы Балта-Брзилей, в течение ряда последовательных временных периодов, с использованием спутниковой съемки в одном и том же масштабе, и при том же уровне Дуная, позволит лучше понять динамику географической среды, при этом можно будет выявить тенденции эволюции и сделать наиболее правильные прогнозы.

Фрактальный анализ кривых распределения годовых и месячных климатических параметров. При изучении особенностей месячного и годового распределения основных климатических параметров ландшафта можно получить важные характеристики, используя фрактальный ана-

лиз данных временных рядов. Фрактальному анализу подвергнуты результаты микроклиматических измерений, полученных Метеорологической станцией Брэила (Румыния). Нами проведен сравнительный анализ данных за периоды 1878-1964 гг. (до запруживания) и 1965-2007 гг. (после запруживания). Подобные измерения сделаны также для годовых кривых распределения уровней воды Дуная и распределения гидрогеологических уровней в Пойме Балта-Брэилей.

Фрактальный анализ кривых годового и месячного распределения климатических параметров на метеорологической станции Брэила (до и после запруживания) отражает тенденцию роста фрактальной размерности после запруживания в течение одного года (табл. 4.3.6). Этот аспект указывает на повышение сложности (на фоне глобальных изменений климата), наличие нескольких степеней свободы, что может проявиться в виде среднесрочных и долгосрочных элементов риска.

Для исследования динамики было применено программное обеспечение AutoSignal 1.7. В результате анализа среднегодового распределения можно наблюдать положительный тренд среднегодовой температуры, что показывает тенденцию к потеплению климата и отрицательный тренд для осадков (в результате исчезновения пойменного микроклимата).

Таблица 4.3.6

Фрактальная размерность кривых распределения средних месячных значений основных климатических параметров (Метеорологическая станция Брэила)

Фрактальная размерность температурного режима		Фрактальная размерность осадков		Фрактальная размерность потенциальной эвапотранспирации	
до запруживания	после запруживания	до запруживания	после запруживания	до запруживания	после запруживания
1,100	1,109	1,128	1,131	1,104	1,109

Фрактальный анализ годовых кривых распределения уровней грунтовых вод. Определение фрактальной размерности было выполнено с использованием программного обеспечения Venoit 1.3 после того, как предварительно были получены кривые распределения при помощи приложения XnView 1.93.6. Фрактальный анализ годовых кривых распределения уровней грунтовых вод показал, что в кумулятивном режиме фрактальная размерность становится все большей по мере удаления от реки (фрактальная размерность в кумулятивном режиме составила 1,126 по сравнению с 1,115 в компенсирующем режиме). Высокое значение фрактальной размерности объясняется как большой амплитудой колебаний (вызванных, помимо режима Дуная, еще и ирригацией), так и более

высокой степенью сложности эволюционной динамики. Такая же ситуация присуща и ежемесячным кривым распределения уровней грунтовых вод.

Анализ фрактальной размерности ежегодных кривых распределения показывает, что по мере удаления от реки, фрактальность уменьшается. одновременно с увеличением продолжительности распространения воды между Дунаем и уровнем грунтовых вод (амплитуда колебаний уменьшается по мере удаления от реки, одновременно с уменьшением степени сложности ежегодных проявлений уровня грунтовых вод).

Фрактальный анализ кривых распределения годовых и ежемесячных уровней Дуная. Проведенный фрактальный анализ отражает тенденцию увеличения фрактальных размерностей после запруживания, как при оценке среднегодовых распределений уровней Дуная, так и при оценке в течение года (табл. 4.3.7). Этот аспект указывает на высокую степень сложности и существование большого числа степеней свободы, которые могут материализоваться в проявлении некоторых аспектов риска на средний или длительный период. В результате анализа среднегодового распределения уровней наблюдается положительный тренд, обусловленный сужением потока плотинами.

Таблица 4.3.7

Результаты фрактального анализа кривых распределения годовых и ежемесячных уровней р. Дуная

Фрактальная размерность \ Уровни	минимальный уровень		средний уровень		максимальный уровень	
	до запруживания	после запруживания	до запруживания	после запруживания	до запруживания	после запруживания
Годовой	1,219	1,307	1,220	1,249	1,213	1,249
За месяц	1,130	1,136	1,117	1,119	1,112	1,106

Запруживание привело к тому, что Большая пойма Балта-Брэйлей в естественном режиме стока перестала бы функционировать, и, как следствие, появилось новое распределение расхода воды в секторе наносов, где максимальный расход воды имеет наибольшее значение. Запруживание Поймы Балта-Брэйлей устранило уменьшение расхода воды, вызвав возрастание расхода воды в секторе наноса затопленного сектора (Брэйла) по сравнению с прошлым периодом наводнений: средний многолетний рост составлял $290 \text{ м}^3/\text{с}$ (многолетняя среднегодовая до запруживания составлял $5980 \text{ м}^3/\text{с}$, а после запруживания выросла до $6280 \text{ м}^3/\text{с}$).

Максимальный средний расход воды вырос с 10,170 м³/с до запруживания до 11030 м³/с после запруживания. Максимальные зарегистрированные расходы воды отмечены 28 мая 1970 г. и 27 апреля 2006 г., они составили 15000 м³/с.

Фрактальный анализ гидрографического бассейна Жижилы. Фрактальный анализ притоков реки первого, второго, третьего и четвертого порядков отражает, как и в случае модели водоотлива, супрареализацию гидрографического бассейна Жижилы. Фрактальный анализ рек первого, второго и третьего порядков выявляет естественную тенденцию к уменьшению фрактальной размерности, одновременно с увеличением порядка притоков реки (чем больше порядок, тем меньше количество притоков этого порядка, и как следствие, меньше их суммарная длина).

Исключением из данного правила служит, в случае гидрографического бассейна Жижилы, русло реки четвертого порядка, которое обладает большей величиной фрактальной размерности, чем аналогичный показатель притоков третьего порядка, таким образом, отражая супрареализацию гидрографического бассейна. Более низкое значение фрактальной размерности притоков третьего порядка (1,1025) по отношению к руслу реки четвертого порядка (1,1075) объясняется как меньшей суммарной длиной (9,575 км – для притоков реки третьего порядка, 10,85 км – для русла реки четвертого порядка), так и меньшей извилистостью рек третьего порядка.

Фрактальная размерность Долины Жижилы (рис. 4.3.6) имеет небольшое значение, равное 1,1598, а фрактальность гидрографического бассейна Жижилы (рис. 4.3.1) характеризуется величиной – 1,4303 (в анализ включены все притоки реки, независимо от их порядка). Обе ситуации отражают относительное однообразие физико-географических условий, в которых создавался и развивался гидрографический бассейн Жижилы.

Величина фрактальной размерности точек бифуркации речного русла составляет 0,46, имея меньшую величину, чем порог в 0,5. Этот факт указывает на умеренное количество ветвлений для гидрографического бассейна четвертого порядка, что подтверждается показателем ветвления, который составляет 4,34:

$$\ln = \frac{N_{n+1}}{r_n} \equiv \ln \frac{53}{\frac{32}{1}} = \ln \frac{1,66}{3} = 0,46. \quad (4.3.1)$$

$$\frac{r_{n+1}}{1} = \frac{243}{728}$$

4.4. Овражно-балочная сеть города Саратова¹

Фрактальный анализ может выступать в качестве одного из инструментов, позволяющих анализировать современное состояние природных объектов, обусловленность их развития геолого-географическими особенностями территории и антропогенной нагрузкой.

Подобный подход применен нами (Иванов и др., 2006) к геолого-геоморфологическим структурам (в частности, для описания овражно-балочной сети и трещин), демонстрирующим свойства самоподобия на урбанизированных территориях. В научной литературе изучение фрактальной размерности собственно овражно-балочной сети авторам не известно, хотя подобные работы по изучению фрактальной структуры природных объектов (в том числе и трещин, а также речных бассейнов) описаны как в отечественных (Васильев, 1992; Манжуров, 2002; Пузаченко, 1997; Яшков, Иванов, 2005 и др.), так и в зарубежных литературных источниках (Claps, Oliveto, 1996; Barbera, Rosso, 1989; McNamara et al., 1998).

Как правило, в вышеупомянутых работах осуществляется расчет емкостной фрактальной размерности. Получающееся при этом число трактуется как фрактальную размерность исследуемого природного объекта и интерпретируют его с точки зрения наук о Земле. При этом всё в основном ограничивается констатацией факта того, что рассчитано значение фрактальной размерности для того или иного геологического объекта, тогда как смысловая нагрузка полученного результата, зависимость размерности от характеристик геологических объектов остается за кадром внимания исследователей.

В то же самое время, в подавляющем большинстве работ, посвященных изучению фрактальной размерности природных объектов, авторы не акцентируют особое внимание на том факте, что строгое определение фрактальной размерности применимо для абстрактных математических множеств, демонстрирующих фрактальные свойства на бесконечном интервале характерных масштабов, в то время как природные объекты, будучи естественными фракталами, демонстрируют свойства самоподобия на ограниченном интервале пространственных масштабов. Соответственно, методы расчета фрактальной размерности, которые дают корректные результаты для абстрактных математических фракталов, могут приводить к неточным (а порой и ошибочным) результатам для естественных фрактальных объектов, встречающихся в природе.

¹ Параграф написан при участии И.М. Минюхина.

На данный момент отсутствует даже приблизительное понимание того, каким образом величина фрактальной размерности характеризует состояние той или иной геологической системы. Такие исследования, помимо теоретического интереса, стимулированы практической необходимостью. В последнее время становится очевидной потребность в тщательном анализе геоэкологических опасностей, провоцируемых человеком посредством изменения геолого-географических объектов и процессов (в том числе и овражно-балочной сети) на территориях городов. Саратов, к сожалению для его жителей, является показательным полигоном для таких исследований.

Методика расчета фрактальной размерности. Начнем рассмотрение с определения фрактальной размерности для природной пространственно самоподобной структуры. В качестве показательного объекта выберем структуру трещин, образовавшихся в слое вещества в результате усыхания (фиг. 6). На приведенном рисунке отчетливо видна фрактальная самоподобная структура системы трещин на поверхности, возникшая в результате процесса усыхания. Важно еще отметить, что самоподобие наблюдается на ограниченном интервале пространственных масштабов, что является важной особенностью природных фрактальных объектов и отличает их от математических фракталов. Соответственно, можно попытаться охарактеризовать наблюдаемую структуру трещин усыхания с помощью фрактальной размерности, традиционно используемой для описания фрактальных объектов.

Традиционный способ расчета емкостной размерности заключается в том, что исследуемый объект покрывается сеткой с размером ячейки ϵ и подсчитывается количество ячеек сетки $N(\epsilon)$, покрывающих изучаемый объект. С уменьшением размера ϵ ячейки сетки, количество ячеек $N(\epsilon)$, покрывающих объект, увеличивается. При этом количество ячеек $N(\epsilon)$, покрывающих изучаемую структуру, зависит не только от размера отдельной ячейки, но и от топологической размерности исследуемого объекта. Линейный объект (линия) имеет топологическую размерность, равную единице, поэтому количество ячеек $N(\epsilon)$ будет обратно пропорционально размеру одной ячейки, то есть $N(\epsilon) \sim \epsilon^{-1}$. Для плоского объекта с топологической размерностью «двойка» будет выполняться соотношение $N(\epsilon) \sim \epsilon^{-2}$. Фрактальные же объекты, как известно, имеют дробную размерность, не совпадающую с целыми числами. Для фрактальных объектов, расположенных на плоскости фрактальная размерность будет заключена между значениями «единица» и «двойка». Для фрактальных объектов, заключенных в трехмерный объем, величина фрактальной размерности будет лежать в диапазоне от «двойки» до «тройки» и т.д. Поэтому для фрактальных

объектов, по аналогии с линией и поверхностью, для количества ячеек покрытия $N(\epsilon)$ можно записать соотношение:

$$N(\epsilon) \sim \epsilon^{-D}, \quad (4.4.1)$$

где D – величина фрактальной (иначе ее еще называют *емкостной*) размерности.

Важно отметить еще одну особенность фрактального объекта: расположенный на плоскости (величина его фрактальной размерности, как уже отмечалось, должна лежать в интервале от единицы до двойки), он занимает ограниченную площадь, в то время как его длина стремится к бесконечности. Подобное утверждение полностью справедливо для абстрактных математических фракталов, у которых диапазон характерных пространственных масштабов содержит все масштабы – от нуля до бесконечности. Для природных фрактальных объектов длина, конечно, не бесконечна (в силу ограниченности диапазона характерных пространственных масштабов, в котором наблюдается самоподобная структура), однако эта тенденция также имеет место. Она выражается в том, что по мере учета все более мелких характерных масштабов длина исследуемого объекта увеличивается. Впервые с подобным явлением на практике столкнулся английский физик Л.Ф. Ричардсон, когда он пытался измерить длину береговой линии Британии.

Таким образом, чем более мелкие участки изучаемого фрактального объекта будут приниматься в рассмотрение (в рассматриваемом примере – чем более мелкие трещины будут учитываться), тем больше будет длина фрактального объекта, причем это изменение будет весьма существенно. Из этого следует, что все количественные характеристики трещинообразования, опирающиеся на стандартные геометрические характеристики (длина, площадь) применительно к фрактальным природным объектам (а именно такова структура трещин) будут давать численные значения, весьма существенным образом зависящие от того, каков минимальный размер трещин, учитываемых при подсчете. Все это приводит к тому, что все эти характеристики очень сложно использовать на практике, и результаты, получаемые с их помощью, будут неоднозначными.

Перейдем теперь к определению фрактальной (емкостной) размерности. Емкостная размерность объекта, с учетом соотношения (4.4.1), определяется как:

$$D = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \epsilon}. \quad (4.4.2)$$

В силу того, что для природного фрактала интервал самоподобия ограничен, размер ячейки покрытия для него может варьироваться в опреде-

лёмном диапазоне, максимальное значение которого определяется размерами объекта, а минимальное – его наименьшим структурным элементом (в случае структуры трещин – размерами её оцифрованного изображения и минимальным элементом изображения (пикселом), соответственно). Таким образом, формула (4.4.2) для структуры трещин (например, такой, как показана на фиг. 6) неприменима, и для оценки её фрактальной размерности необходимо применение численного алгоритма, который заключается в получении зависимости числа ячеек покрытия фрактала от размера ячейки, выделении на ней линейного участка (в двойном логарифмическом масштабе) и аппроксимации зависимости на этом участке линейной функцией (рис. 4.4.1). Параметры аппроксимирующей прямой при этом вычисляются методом наименьших квадратов, а ёмкостная размерность фрактала определяется угловым коэффициентом прямой.

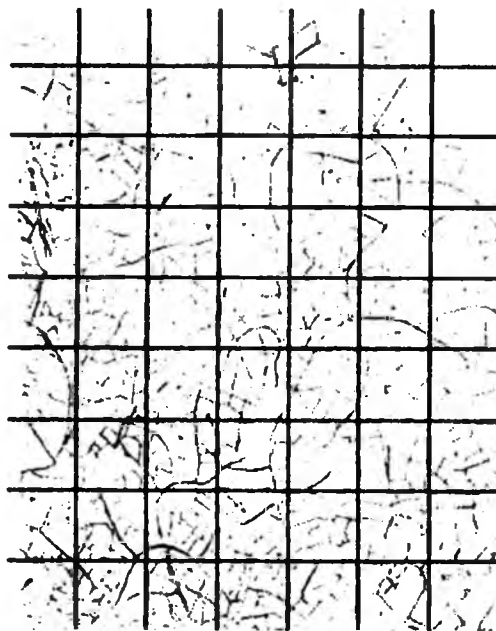


Рис. 4.4.1. Структура трещин усыхания, покрытая квадратной сеткой с размером ячейки ϵ . Линейный размер ячеек покрытия выбран большим, поэтому размер отдельной ячейки сопоставим с размером всего оцифрованного изображения фрактального паттерна

Наибольшие затруднения вызывает выбор участка аппроксимации, которому соответствует степенная (в двойном логарифмическом масшта-

бе – линейная) зависимость между размером ячейки ϵ сетки покрытия и числом ячеек $N(\epsilon)$.

Как уже отмечалось ранее, это связано с неидеальностью природных фракталов (ограниченным пространственным интервалом самоподобия). Кроме того, природные структуры неоднородны, что также осложняет их фрактальный анализ.

Рассмотрим методику расчета фрактальной размерности более детально на примере структуры трещин усыхания. Оцифрованное изображение структуры, показанной на фиг. 6 покрывалось квадратными ячейками различных размеров и для каждого i -го покрытия ячейками со стороной ϵ , определялось количество ячеек $N(\epsilon_i)$, покрывающих элементы структуры трещин (рис. 4.4.1). Затем полученная зависимость $N(\epsilon)$ была построена в двойном логарифмическом масштабе (рис. 4.4.2).

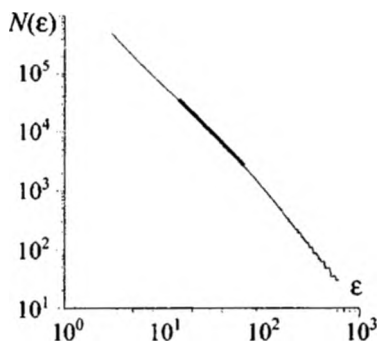


Рис. 4.4.2. Зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для рассматриваемой структуры трещин усыхания, построенная в двойном логарифмическом масштабе

Как видно из рисунка, существует некоторый диапазон линейных размеров ϵ ячеек покрытия, в котором данная зависимость в двойном логарифмическом масштабе является линейной и подчиняется степенному закону (4.4.1) с показателем степени (соответственно, величиной фрактальной размерности) $D \approx -1,4$. В то же самое время, по обеим сторонам от этого диапазона на графике зависимости видны изломы и отклонения от соотношения (4.4.1) с показателем степени $D \approx -1,4$. Как уже отмечалось, это обусловлено тем, что природные фракталы обладают самоподобной структурой лишь в ограниченном диапазоне характерных пространственных масштабов.

На эту особенность природных фрактальных объектов накладываются также ограничения численного метода расчета фрактальной размерно-

сти по существующему изображению: при больших значениях линейных размеров ячеек покрытия ϵ размер отдельной ячейки становится сопоставимым с размером всего оцифрованного изображения фрактального паттерна. В этом случае почти все ячейки покрывают поверхность, на которой расположена исследуемая структура, и, соответственно, при больших значениях размеров ячеек покрытия величина определяемой размерности оказывается близкой размерности поверхности, то есть к двум.

Рассматривается другой предельный случай, когда линейный размер ячейки покрытия оказывается меньше наименьшего размера трещин, принимаемых во внимание при расчете размерности. В этом случае на малых пространственных масштабах фрактальность объекта уже не учитывается (поскольку мелкие трещины исключены из рассмотрения), и, соответственно, данная структура ведет себя как линейный объект, а соответственно, определяемая в данном случае величина размерности будет близка к единице.

Очевидно, что оба предельных случая, хотя и дают физически понятные результаты, не имеют особой ценности и обусловлены особенностями метода расчета размерности и характерными чертами природных фракталов. Наибольший интерес представляет собой диапазон пространственных масштабов ϵ , на котором со всей очевидностью проявляется фрактальная природа природных геологических объектов (в данном случае структуры трещин усыхания).

В то же самое время, в ряде случаев существует сложность с определением величины фрактальной размерности даже по центральному линейному участку. Это отчетливо можно видеть на примере расчета фрактальной размерности овражно-балочной сети г. Саратова (рис. 4.4.3).

Из рис. 4.4.3 видно, что ОБС, скорее всего, действительно обладает фрактальными свойствами, и, следовательно, можно попытаться охарактеризовать ее с помощью фрактальной размерности.

Как уже отмечалось, в силу того, что для природного фрактала интервал самоподобия ограничен, размер ячейки покрытия для него может варьироваться в определенном диапазоне, и формула (4.4.2) для овражно-балочной сети (как, впрочем, и для любого другого природного фрактального объекта) неприменима. При использовании же метода, описанного выше, наибольшие затруднения вызывает выбор участка аппроксимации, которому соответствует степенная (в двойном логарифмическом масштабе – линейная) зависимость между размером ячейки сетки покрытия и числом ячеек. Как уже отмечалось ранее, это связано с неидеальностью природных фракталов (ограниченным пространственным интервалом самоподобия).

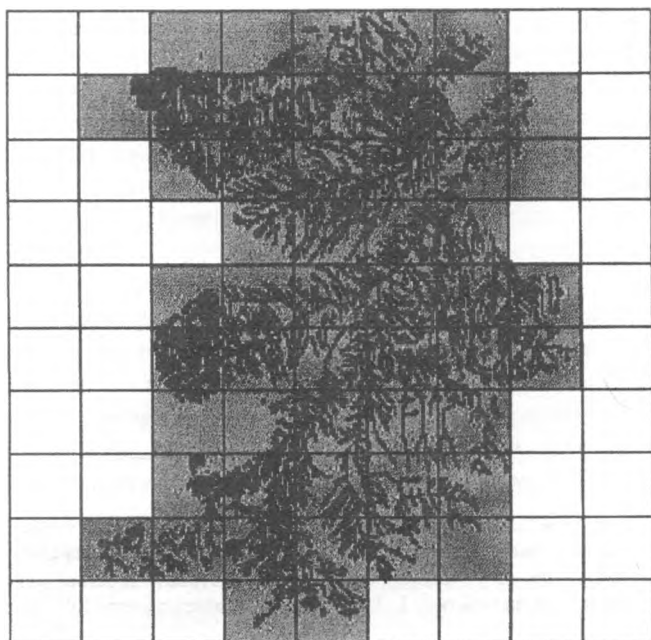


Рис. 4.4.3. Структура овражно-балочной сети Елшанского ландшафтного района города Саратова, покрытая квадратной сеткой с размером ячейки ϵ (ячейки, покрывающие фрактал, показаны серым цветом)

При исследовании овражно-балочной сети Елшанского урболодшафтного района города Саратова была получена зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки, изображённая в двойном логарифмическом масштабе на рис. 4.4.4. Как видно из рисунка, на графике этой зависимости можно визуально выделить линейный участок (например, участок, обозначенный как 1–2) и определить для него фрактальную размерность как модуль углового коэффициента аппроксимирующей зависимость $N(\epsilon)$ прямой ($D_{12} \approx 1,66$). Однако при выборе другого участка (участок 2–3 на рис. 4.4.4), внешне ничем не отличающегося по своим свойствам от первого, такого же «линейного», получается другое значение фрактальной размерности ($D_{23} \approx 1,59$), причем разница значений размерностей для различных участков аппроксимации значительно превосходит погрешность метода наименьших квадратов. Это обстоятельство не позволяет однозначно определить значение размерности с точностью, достаточной для фрактального анализа овражно-балочной сети, а позволяет только говорить о некотором интервале значений размерности, зависящем от выбора участков аппрок-

симации (т.е. от выбора диапазона характерных масштабов, на котором исследуемый объект считается самоподобным).

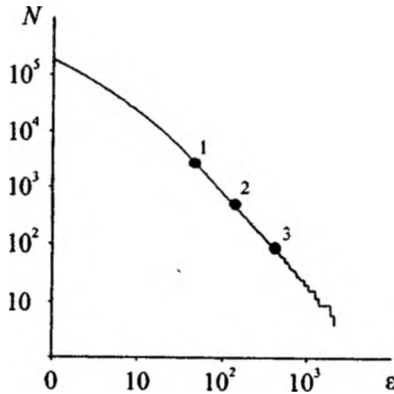


Рис. 4.4.4. Зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для овражно-балочной сети Елшанского ландшафтного района Саратова, построенная в двойном урбологарифмическом масштабе (емкостная размерность, вычисленная на участках 1–2 и 2–3, равна соответственно 1,66 и 1,59)

Действительно, на рис. 4.4.4 показана зависимость величины фрактальной размерности D , определенной как угол наклона аппроксимирующей прямой зависимости $N(\epsilon)$ (в двойном логарифмическом масштабе), от максимального значения участка аппроксимации ϵ_{\max} . Начальная точка линейного участка была выбрана как $\epsilon_{\min} = 30$. Отчетливо видно, что величина фрактальной размерности существенным образом зависит от выбора используемого участка, а следовательно, традиционный метод определения фрактальной размерности (достаточно часто используемый при анализе фрактального строения ландшафтов, речных систем, овражно-балочных сетей и т.п.), непригоден для природных объектов, и для их корректного фрактального анализа необходима разработка особых методик, учитывающих особенности природных самоподобных структур.

Расчет фрактальной размерности для природных объектов. Итак, как было показано выше, величина фрактальной размерности D существенным образом зависит от выбора участка, на котором она вычисляется. Соответственно, возникает необходимость выбора одного значения величины D из некоторого набора получающихся значений. В принципе, возможен и другой вариант: можно пытаться рассматривать все множество получившихся значений величины D как некоторую характеристику фрактального объекта. Однако подобный подход существенно затрудняет ана-

лиз таких систем и тяжело реализуем на практике. Одним из возможных вариантов является следующий подход: можно отыскать некоторое множество отрезков на графике зависимости $D(\epsilon)$ в двойном логарифмическом масштабе, использование которых для определения величины фрактальной размерности позволяет получить множество значений D , не сильно отличающихся друг от друга, и использовать усредненную по этому множеству величину $\langle D \rangle$ как характеристику самоподобного объекта.

Охарактеризуем отрезок, используемый для вычисления величины фрактальной размерности, двумя числами: максимальным и минимальным размерами ячеек покрытия (ϵ_{\max} и ϵ_{\min} , соответственно). Зафиксируем значение величины ϵ_{\min} и будем строить зависимость величины фрактальной размерности $D(\epsilon_{\max})$. В этом случае на графике зависимости $D(\epsilon_{\max})$ искомым диапазоном значений ϵ_{\max} , необходимый для определения величины $\langle D \rangle$, будет выглядеть как горизонтальный линейный участок. В этом случае можно провести некоторую аналогию с методом вычисления корреляционной размерности по наблюдаемой временной реализации, используемым при анализе поведения нелинейных динамических систем, демонстрирующих хаотическую динамику. Поскольку при выборе величины ϵ_{\min} также допускается изрядная доля произвола, необходимо осуществить подобный анализ и при различных значениях ϵ_{\min} .

Таким образом, имеет смысл рассматривать график зависимости $D(\epsilon_{\max})$ с целью нахождения на нем горизонтального участка, по которому и следует рассчитывать искомую величину $\langle D \rangle$. Применим предложенный подход последовательно к модельному фрактальному объекту (ковру Серпиньского), а затем и к природным фракталам, к которым относится овражно-балочная сеть города Саратова.

Расчет фрактальной размерности модельного объекта на примере ковра Серпиньского. Рассмотрим ситуацию, связанную с расчетом размерности модельного фрактального объекта – ковра Серпиньского – одного из эталонных систем нелинейной динамики (рис. 4.4.5). Аналитическое значение емкостной размерности для этого объекта известно и составляет $D \approx 1,89$. Однако, при расчете емкостной размерности способом, описанным выше, возникает та же самая проблема, что и для природного фрактального объекта: получающийся результат сильно зависит от выбора линейного участка, на котором осуществляется расчет размерности. На рис. 4.4.6 показана зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для ковра Серпиньского, выполненная в двойном логарифмическом масштабе. Очевидно, что границы линейного участка на этой зависимости могут быть выбраны с достаточно большой степенью произвола, что, в свою очередь, ведет к разнице

в значениях емкостной размерности. Например, значения размерности, вычисленные на участках 1–2 и 2–3, равны соответственно 1,9 и 1,81, т.е. выбирая произвольным образом участок аппроксимации зависимости $N(\epsilon)$, нельзя однозначно определить размерности фрактала.

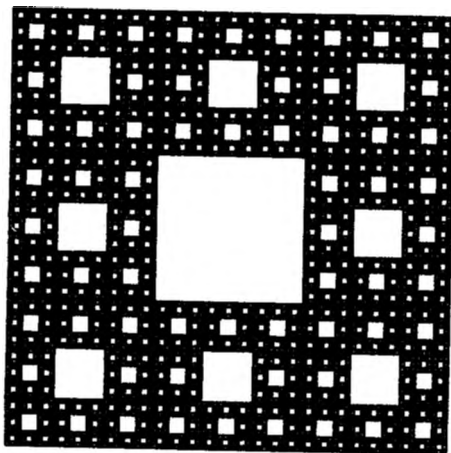


Рис. 4.4.5. Модельный фрактал – ковер Серпиньского ($D \approx 1.89$)

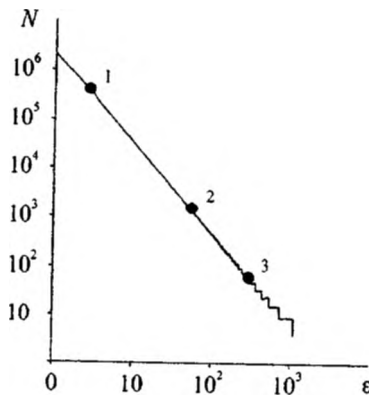


Рис. 4.4.6. Зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для ковра Серпиньского $N(\epsilon)$, выполненная в двойном логарифмическом масштабе (емкостная размерность, вычисленная на участках 1–2 и 2–3, равна соответственно 1,90 и 1,81)

На рис. 4.4.7 показана зависимость емкостной размерности ковра Серпиньского от максимального размера ячейки покрытия фрактала

$D(\epsilon_{\max})$. Различным кривым соответствуют различные значения минимального размера ячейки покрытия ϵ_{\min} . Видно, что размерность существенно образом зависит от выбора линейного участка, причем разброс в значениях размерности значительно превосходит погрешность метода наименьших квадратов, при помощи которого осуществлялась аппроксимация зависимости $N(\epsilon)$. В то же время на графике можно выделить участок, на котором размерность принимает примерно одинаковые значения вне зависимости от выбора ϵ_{\min} и ϵ_{\max} . Проводя усреднение размерности по этому участку, можно получить ее значение $\langle D \rangle$, вычисленное с учетом ограниченности пространственного интервала самоподобия фрактала. Для ковра Серпиньского оно составило $\langle D \rangle \approx 1,89$, что отличается от аналитического значения менее чем на 0,5%. Таким образом, полученный результат позволил говорить о высокой эффективности предложенного метода и возможности его применения для изучения природных самоподобных объектов.

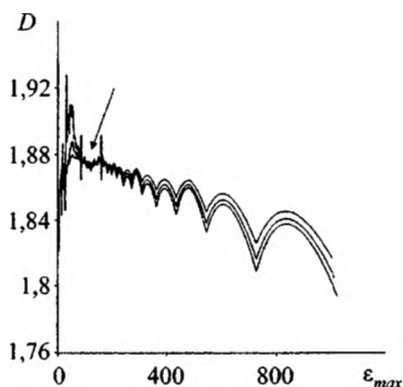


Рис. 4.4.7. Зависимость емкостной размерности от максимального размера ячейки покрытия (различным кривым соответствуют различные значения минимального размера ячейки покрытия). Стрелкой обозначен участок, по которому проводилось усреднение размерности (значение $\langle D \rangle$, соответствующее этому участку, равно $\langle D \rangle \approx 1,88$)

Расчет фрактальной размерности для овражно-балочной сети различных ландшафтных районов города Саратова. Опробованный на модельном фрактале метод расчета емкостной размерности был применен для изучения овражно-балочной сети города Саратова, для которой, как и для ковра Серпиньского, характерен разброс значений размерности, соответствующих различным участкам аппроксимации. При исследовании характера зависимости $D(\epsilon_{\max})$ для ОБС при различных ϵ_{\min} было обнаруже-

но, что на графике этой зависимости можно также выделить участок, на котором размерность принимает примерно одинаковые значения вне зависимости от выбора ϵ_{\min} и ϵ_{\max} (рис. 4.4.8). Как и для ковра Серпиньского, проводя усреднение размерности по этому участку, можно получить характеристику фрактала, учитывающую его неоднородность и ограниченный интервал пространственного самоподобия.

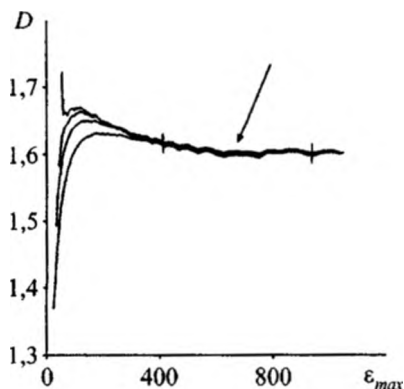


Рис. 4.4.8. Зависимость емкостной размерности овражно-балочной сети Елшанского ландшафтного района Саратова от максимального размера ячейки покрытия. Стрелкой обозначен участок, по которому проводилось усреднение размерности (значение $\langle D \rangle$, соответствующее этому участку, равно $\langle D \rangle \approx 1,61$)

Для овражно-балочной сети Елшанского урболовшафтного района Саратова разброс значений размерности, соответствующих различным участкам аппроксимации, составил примерно 0,07, в то время как участок, обозначенный на рис. 4.4.8 стрелкой (на графике зависимости $N(\epsilon)$ в двойном логарифмическом масштабе этому участку соответствуют отрезки с приблизительно одинаковым угловым коэффициентом), позволил получить набор значений размерности, отличающихся друг от друга менее чем на 0,01. При вычислении размерности на этом участке было получено значение $\langle D \rangle \approx 1,61$, которое можно рассматривать как некоторую усредненную характеристику фрактала и использовать при сравнительном анализе различных самоподобных объектов природного происхождения.

Для других районов Саратова вычисление фрактальной размерности описанным методом также позволило получить усредненные значения размерности, колеблющиеся в интервале от 1,54 (Лысогорский ландшафтный район) до 1,71 (Волжский ландшафтный район). Таким образом, можно сделать вывод об адекватности предложенного метода поставленной за-

даче и возможности его применения при исследовании как модельных, так и природных самоподобных структур.

На данный момент трудно однозначно охарактеризовать геолого-геоморфологический смысл фрактальной размерности овражно-балочной сети. Накоплено пока слишком небольшое количество данных для каких-либо обобщающих интерпретаций. Можно считать, что значение фрактальной размерности отражает в определенной мере энергетическую напряженность овражно-балочной сети как геолого-геоморфологической системы на анализируемом участке. Проверять это предположение на территории Саратовского научно-образовательного полигона, мы планируем, в частности, подтвердить с помощью фрактального анализа ОБС наличие и очертания геоморфоблоков и энергоопасных зон. Представляется рациональным предположить также, что овражно-балочная сеть, развивающаяся в более жестком, гетерогенном по вещественному составу горных пород геологическом субстрате, характеризуется более низким значением фрактальной размерности D . Так, именно ландшафтный район Лысогорского плато, сложенный наиболее разновозрастными, разнофациальными отложениями, имеет наименьший показатель $\langle D \rangle \approx 1,54$. Предполагаемая закономерность, безусловно, нуждается в дальнейшей проверке на иных территориях.

Таким образом, можно сделать основные выводы по данному параграфу.

Возможны различные подходы к фрактальному анализу природных самоподобных структур. Аналитический метод вычисления емкостной размерности абстрактных математических фракталов непригоден для реальных фракталов, интервал пространственного самоподобия которых ограничен, что приводит к необходимости применения численного алгоритма. При использовании традиционного способа вычисления размерности было обнаружено, что неопределенность в выборе участка аппроксимации зависимости числа ячеек покрытия фрактала от размера ячейки приводит к неопределенности в выборе значения размерности, которое можно трактовать как характеристику фрактальных свойств объекта.

Для устранения описанного недостатка численного алгоритма было предложено проводить сравнительный анализ зависимости размерности от максимального значения участка аппроксимации $D(\epsilon_{\max})$ для различных минимальных значений ϵ_{\min} с целью нахождения некоторого множества отрезков на графике зависимости $N(\epsilon)$ в двойном логарифмическом масштабе, угловой коэффициент которых (емкостная размерность фрактала) отличается незначительно. На графике зависимости $D(\epsilon_{\max})$ этому набору

отрезков соответствует горизонтальный участок. Проводя усреднение размерности по этому участку, можно получить значение размерности, вычисленное с учетом неоднородности природных фракталов и ограниченного интервала их пространственного самоподобия. Для проверки эффективности предложенного метода он был применен для вычисления размерности модельного фрактала, в качестве которого был взят ковер Серпиньского. Полученное при этом значение размерности отличалось от аналитического менее чем на 0,5%, то есть указанный алгоритм позволил с высокой точностью определить размерность модельного фрактала.

Рассмотрение овражно-балочных сетей различных ландшафтных районов Саратова выявило тот же, что и для ковра Серпиньского, характер зависимости $D(\epsilon_{\max})$, что позволяет сделать вывод о возможности применения предложенного в работе метода для фрактального анализа природных самоподобных структур и использования полученного этим методом усредненного значения размерности для характеристики фрактальных свойств объекта.

5. СВОЙСТВА БИНАРНОСТИ И МАСШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ГЕОСИСТЕМ

Бинарные, операционально замкнутые системы. Есть достаточно оснований утверждать, что самоорганизующиеся системы, в самом широком смысле, развиваются и функционируют с насыщением. С насыщением развиваются системы, характеризующиеся предельным циклом, в основе которого лежат внутренние структурно-организационные противоречия. А они - суть бинарности (Поздняков, 2007) самоорганизующихся систем, в них генетически заложено диалектически противоречивое, по существу субстанциональное единство двух начал, вместе предполагающих образование, существование и развитие структурных целостностей - систем (рис. 5.1).

Начало действия F -потока предполагает изъятие из среды вещества и энергии и экспоненциальное их накопление в некоей формирующейся структуре $X(t)$; а начало действия D -потока предполагает изъятие части вещества и энергии из F -потока для формирования другой структуры - $Y(t, F)$. Таким образом, процесс ингибирует развитие системы $X(t)$ и, следовательно, самой себя, - системы $Y(t, D)$.

Вместе они, образуя структурно-функционально-эмерджентное единство, развиваются с насыщением, графически имеющим вид кривой, названной Ферхюльстом «логистической кривой роста». Весь опыт изучения самоорганизующихся геосистем (в частности, геоморфосистем) показывает, что они представляют собой парные образования: если формируется система $X(t)$, то вместе с ней формируется и ее спутник-система $Y(X, t)$. Для $Y(X, t)$ система X поставляет энергию и определяет пространственные границы развития и время существования. Динамика системы, как бинарной структуры, осуществляется, с одной стороны, за счет поступления вещества и энергии из среды, а с другой - вследствие обмена ими между составляющими ее подсистемами. Потоки энергии, вещества и информации (MEI), потребляемые системой X из среды, - это F -потоки, а объективно отдаваемые ее спутнику (системе Y) - D -потоки. Энергия в F -потоках («энергия для себя») используется для сохранения и функционирования самой системы X .

Величина накапливаемых в ней MEI ограничивается емкостью среды. Поэтому, если в F -потоке расход $Q(t) = \text{const}$, то $\Delta M(t) \rightarrow 0$. Энергия в D -потоке - это «вынужденно» отдаваемая «энергия для спутника», причем расход ее $q(t, M) \rightarrow \text{max}$. Формирование геоморфосистемы «спутник» является объективным, имманентным свойством всех самоорганизующихся

ся систем (Кузнецов, Поздняков, 2012). Появление геоморфосистемы, создаваемой F -потоком, неизбежно влечет к появлению геоморфосистемы «сателлит» и питающего ее D -потока MEI . Таким образом, любые самоорганизующиеся системы, включая социально-экономические, можно рассматривать как бинарные структуры и характеризовать их динамику на основе балансовых отношений, известных как «ресурс – потребитель» или «хищник – жертва».



Рис. 5.1. Структура бинарной самоорганизующейся геосистемы (Поздняков, 2007)

Выходной характеристикой $W(t)$ такой бинарной структуры является форма их внешнего выражения, в основном такие морфометрические показатели, как объем $V(t)$, площадь $S(t)$, высота $H(t)$ и пр. (Поздняков, 2002; Поздняков, 2007; Pozdnyakov, 2008). По существу, это – закономерность

всеобщего действия, согласно которой динамика систем описывается уравнением:

$$dW/dt = X(t, W) - Y(t, W) + f(U), \quad (5.1)$$

где $f(U)$ – антропогенная управляющая функция, если она присутствует (например, при формировании горнодолинных водохранилищ или при проведении каких-либо защитных мероприятий, снижающих риски развития нежелательных процессов).

Согласно этой закономерности, динамика геосистем соответствует логистическому закону. В упрощенном виде: если полагать, что предел насыщения системы известен, то решение уравнения динамики геосистемы (например, при расчетах, связанных с динамикой продуктивности какой-либо системы при известной экологической емкости (V)), возможно аналитически.

Самоорганизующиеся геосистемы представляют собой *бифурные структуры* (Поздняков, 2007), для которых фрактальные закономерности в виде пространственно-временной их инвариантности проявляются наиболее контрастно.

Заданные и текущие состояния в динамике геосистем. Понятие «заданное состояние» введено в кибернетике. Оно характеризует состояние, которое некая саморегулирующаяся техногенная система в своей динамике *должна достичь*, при установленных начальных условиях поступления энергии. Динамика кибернетических и технических систем регулируется за счет определения величины рассогласования между заданным и текущим состояниями.

Природные системы (в частности геоморфосистемы) не имеют специальных регулирующих органов для определения величины рассогласования между заданным и текущим состояниями. Функции регуляторов в них выполняют их собственные морфометрические характеристики (высота, объем, площадь поверхности и пр.), в соответствии с которыми аккумулируются вещество и энергия (Поздняков, 1988; 2002). В динамике геоморфосистем морфометрические характеристики оказывают обратное воздействие на входные характеристики, в частности, – на поступление вещества (объем материала, выводимого в сферу гипергенеза). Так, прирост высоты и объема горного массива, по мере их суммарного увеличения, приближается к нулю (существенно возрастает давление на нижележащие слои, и они выжимаются из-под гор). Показательным примером может служить динамика поймы (Поздняков, 1988; Поздняков и др., 1986; Pozdnyakov, 2008) и прибрежной отмели водохранилищ: с увеличением размеров (высоты, ширины) их прирост приближается к нулю. Эта закономерность используется для прогноза динамики геосистем.

Таким образом, саморегулирование во всех геосистемах косной среды осуществляется за счет обратного влияния своих собственных размеров на поступление вещества на входе.

В вышеприведенном уравнении (5.1) слагаемые в правой части находятся в функциональной зависимости от самих регулируемых характеристик систем, и, так как второе слагаемое всегда стремится по своей величине к первому слагаемому, то эта функциональная зависимость, выступая в качестве обратной отрицательной связи, ингибирует процесс – замедляет рост вещества, энергии и информации в системе, приводит их массу к некоторой динамически равновесной величине, мало меняющейся в течение времени. Система переходит в разряд самоорганизующихся, способных к увеличению своей упорядоченности за счет изъятия вещества, энергии и информации, порядка (негэнтропии) из среды.

В отличие от живых организмов, обладающих гомеостатическими свойствами, и от кибернетических систем, в которых имеется специальный регулирующий (управляющий) орган и орган, задающий воздействие (т.е. определяющий количество поступающего и отводимого вещества или энергии в системе), в геоморфосистеме все эти функции выполняются взаимодействующими потоками F и D .

Заданными величинами, характеризующими геосистемы в стадии насыщения, являются характеристики размеров форм рельефа: высота (H_c); площадь (S_c) поверхности; объемы (V_c) форм; ширина (B_c) склона; крутизна (α_c) склонов и пр. В графиках кривые одновременного и взаимосвязанного изменения расходов вещества и энергии, в зависимости от роста размеров форм рельефа, всегда пересекаются. Точка пересечения кривых указывает на равенство расходов вещества в F - и D -потоках (в состоянии насыщения), а проекция ее на абсциссу – на стационарную динамически равновесную высоту, или, пользуясь терминологией теории авторегулирования, *заданную высоту* в стадии насыщения, но задаваемую спонтанно складывающимися условиями развития геосистем. Роль задающего воздействия (т.е. морфометрические характеристики, какими должны обладать геосистемы при данных расходах вещества и энергии в F - и D -потоках в стадии насыщения) могут играть различные эндогенные и экзогенные процессы или импактные события. Динамика форм рельефа и их самоподобие (масштабная инвариантность) определяются направленными изменениями их объема и площади поверхности, при известных физических свойствах веществ, из которых следуют морфометрические показатели.

Механизм возникновения автоколебаний в геоморфосистемах. В качестве F -потока в процессах рельефообразования выступают все те

силы, в результате действия которых создается гравитационный потенциал, объективно предполагающий выделение кинетической энергии, обуславливающий пространственное перераспределение вещества. В процессах горного рельефообразования такой силой является эндогенный поток литогенного материала с определенными физико-механическими свойствами, численно характеризующимися вязкостью (Пуазы) или углом внутреннего трения. Для сыпучих веществ это – угол наклона поверхности, при котором трение и сцепление между частицами меньше сдвигающего усилия.

В результате действия этих сил создаются первичные неровности (неровности первого порядка), площадь поверхности возрастает до $S = S_0/\cos \alpha$ и организуется D -поток вещества, обуславливаемый различными видами экзогенных процессов. В силу эрозионного расчленения крутизна склонов с ростом числа их генераций нелинейно растет. С увеличением степени расчлененности поверхности, нелинейно растет количество денудированного материала и расход вещества в D -потоке объективно приближается к расходу его в F -потоке. Выходной характеристикой рельефа, с позиций данного подхода, является динамика объема $V(t)$ вещества, заключенного в формах рельефа (морфология и морфометрические соотношения влияют лишь на способы вычисления объемов вещества), всецело определяющаяся расходами вещества в F - и D -потоках. Поэтому динамика форм рельефа описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = P(t) - Q(t) \\ \frac{dQ(t)}{dt} = kS(V(t)), \end{cases} \quad (5.2)$$

где k – коэффициент денудации, $\text{м}^3/\text{м}^2\text{год}$; V – объем вещества, заключенного в формах рельефа, м^3 ; $P(t)$ – объем вещества, поступающего эндогенном потоке, $\text{м}^3/\text{год}$; $Q(t)$ – объем денудированного материала, $\text{м}^3/\text{год}$; S – площадь поверхности (Лялин, Поздняков, 2001)

Важное значение в процессах рельефообразования имеют некоторые пороговые значения площади S_p поверхности, превышение которых вызывает существенное возрастание $Q(t)$. Причина кроется в следующем. В начальные этапы поднятия территории скорость ее расчленения и денудации отстает от собственно скорости вертикального движения – $Q(t) < P(t)$. Но, в связи с тем, что скорость денудации растет нелинейно, при условии $P(t) = 0$ (расход в эндогенном потоке постоянен), очевидно, начнется по-

нижение поверхности, так как $Q(t) > P(t)$. Оно может продолжаться до того времени, пока скорость денудации за счет уменьшения уклонов поверхности не снизится. Кроме того, при моделировании следует учитывать влияющие разгрузки горных пород и вызываемой ею активизации вертикальных движений.

Следует подчеркнуть, что именно вследствие фрактального характера процесса эрозионного расчленения система (5.2) становится нелинейной. Этим обуславливается возможность возникновения автоколебаний в геоморфосистемах и в целом движение геосистем к состоянию динамического равновесия. Достигнув его, геосистема, в силу изменения баланса расходов вещества в литопотоках, уходит от него, с тем, чтобы опять, по истечении некоторого времени, возвратиться (рис. 5.2).

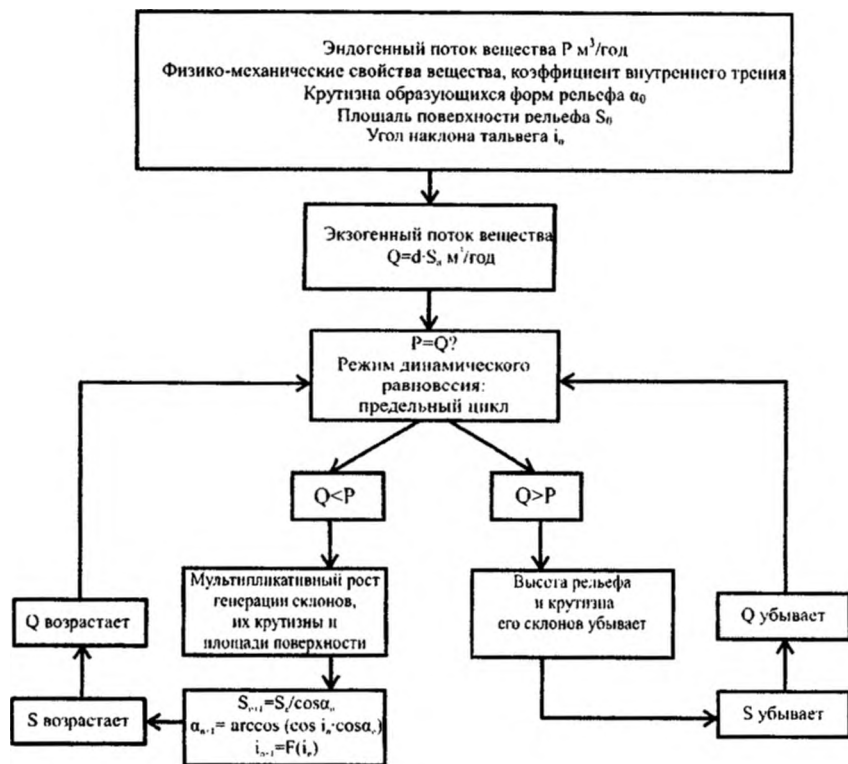


Рис. 5.2. Алгоритм формирования рельефа в результате взаимодействия F - и D -потоков вещества, переходов системы в состояние динамического равновесия и режим автоколебания

Таким образом, F -поток литогенного материала («инициатор» рельефообразования) и D -поток (противоположной рельефообразующей направленности) имеют свои пределы действия – амплитуду. При отсутствии D -потока поднятие поверхности с замедлением продолжалось бы до величины, при которой вес столба горных пород создает давление, достаточное для вязко-пластического выдавливания нижележащих пород. Согласно расчетам А.В. Бялко (1989), на Земле этот предел составляет 11000 м.

Пределом действия D -потока является эквипотенциальная поверхность геонда, с приближением к которой пространственное перераспределение вещества прекращается. Вследствие взаимодействия F - и D -потоков образуется новый и единый для них предел, внешне выражающийся в виде поверхности равновесия различной морфологической сложности. Это – реально наблюдаемый в современном рельефе предел, тогда как верхний и нижний пределы в природе не существуют, поскольку непрекращающимися являются эндогенные и экзогенные процессы.

Пределы масштабной инвариантности самоорганизующихся геосистем. Одним из основных свойств фракталов, имеющих особую значимость в изучении строения и динамики природных процессов, является масштабная инвариантность: в неделимой части (элементе) системы, если она определена как целое, содержится любое количество таких же частей меньшего размера, и из нее же можно получить часть большего размера. Именно эту закономерность и выявил английский математик и метеоролог Льюис Фрай Ричардсон в 1922 г., когда понятия *фрактал* еще не существовало.

Согласно вышеизложенным положениям, фрактальное самоподобие (масштабная инвариантность) обуславливается тем, что любая самоорганизующаяся система характеризуется минимально необходимым набором элементов, находящихся в устойчивых функциональных отношениях, образующих его структуру – саму операционально замкнутую геосистему. Благодаря этому, по-видимому, можно утверждать, что если та или иная геосистема является самоорганизующейся структурой, то она одновременно будет и фрактальной со всеми вытекающими из этого методологическими следствиями. Именно потому существуют пределы масштабной инвариантности конкретных рассматриваемых объектов, и только в задаваемых ими границах можно производить манипуляции с масштабом, не теряя и не искажая информацию. Любой природный фрактал сохраняет свойства самоподобия только в определенном диапазоне масштабов; таким образом, появляется необходимость выявления внутреннего и внешнего масштабов фрактальности исследуемых объек-

тов. Внутренний масштаб фрактальности соответствует наибольшему масштабу, в котором сохраняются фрактальные свойства объекта, а внешний масштаб – наименьшему.

Например, при измерении извилистой береговой линии, если бесконечно уменьшается масштаб, наступает момент, когда она становится гладкой непрерывной кривой – внешний масштаб фрактальности. А бесконечное увеличение приведет к тому, что элементом измерения станет песчинка или галька (внутренний масштаб фрактальности), и, соответственно, береговая линия как явление исчезнет. На данном этапе исчезает фрактальность береговой линии как таковой и появляется иная фрактальность, связанная со строением пород, слагающих берег. Такой скачок от одних природных объектов к другим можно назвать ступенями фрактальности. Как только теряются фрактальные свойства одного объекта, наблюдатель обязан перейти на новую ступень, характеризующуюся иными механизмами формирования структуры.

Если, например, во фрактально характеризующейся извилистости реки или береговой линии не учитывается структурно-геологическая и гидродинамическая ее предопределенность, то неадекватное отображение существа явления неизбежно. Поэтому в данном примере фрактальный анализ извилистости реки или береговой линии должен выполняться отдельно для участков, извилистость которых предопределена геологической структурой и различиями в эрозионной (абразионной) устойчивости пород (см., например, фиг. 32-34), и для участков с извилистостью, обусловленной особенностями гидродинамики русловых процессов (вдольбереговых течений, приливно-отливных колебаний уровня моря и транспорта обломочного материала, его аккумуляции). Фрактальный анализ тектонических разрывов необходимо проводить с учетом геологической структуры: выполнять фрактальный анализ отдельно, например, для участков разлома, секущего интрузивные массивы или осадочный метаморфический комплекс.

Изучение фракталов может вестись по нескольким направлениям. Одно связано с подобием только формы, например, геометрических фигур (снежинка Коха или губка Серпиньского, множество Кантора и пр.). Это направление, описывающее самоподобные масштабные изменения формы абстрактных, в реальности не существующих систем, названо *фрактальной геометрией*. На первый взгляд, может показаться, что оно никакой практической значимости не имеет, если не считать фрактальные способы рисования картин, похожих на реально существующие объекты природы. Конечно, такой вывод ошибочен, поскольку построение фрактальных мо-

делей несуществующих объектов и процессов имеет важное значение в разработке теории и методологии фрактального анализа.

С вышеизложенными обстоятельствами, на наш взгляд, связывается и другое направление фрактальной теории – самоподобная смена состояний геосистем во времени, при которой сохраняются их структура и форма. Это направление представляет наибольший научный интерес, поскольку касается множества практических сторон прогноза развития не только природных, но и социальных систем.

Важно и третье направление, связанное с поисками в хаотической динамике какого-либо явления скрытых, но закономерно формирующихся структурных упорядоченностей. Когда говорят о хаотической динамике, имеют в виду «существенную зависимость от начальных условий», или так называемый «эффект бабочки», полагая, что взмах гиперболизированного ее крыла (какого-либо начального условия процесса) фатально предопределяет всю цепь последующих событий, ведущих, в конечном счете, к некоему хаосу – аттрактору. Вероятно, это ошибочное суждение, хотя бы потому, что установившаяся последовательность состояний системы (процесса) нарушается изменением состояния среды, в которой система развивается. И, следовательно, прежние начальные условия отменяются, во всяком случае, корректируются под новые условия среды. Существенная зависимость от начальных условий проявляет себя далеко не всегда и не у всех систем, а лишь при некоторых постепенно складывающихся обстоятельствах, которые могут быть раскрыты на основе их анализа, если система и вмещающая ее среда на заданном пространственно-временном интервале развиваются коэволюционно.

Для бинарных систем с развитыми обратными отрицательными связями хаотическая динамика не является характерной чертой, что, вообще говоря, подтверждается наличием устойчивых фрактальных закономерностей, проявляющихся как в форме (во фрактальной геометрии), так и в содержании (во фрактальной динамике); например, в автотомельном режиме развития систем: сомы действующих вулканов, овражные системы, горный рельеф, формирующийся длительное время вследствие равномерного врезания рек и др. (Поздняков, 1988).

Фракталы можно относить к числу характерных и емких показателей степени упорядоченности систем, причем как в состоянии установившегося режима (например, автотомельного с аффинными соотношениями и динамически равновесного режимов развития (Поздняков, 1988) или, что то же самое, режима предельного цикла), так и на пути к нему – на переходных этапах, когда наблюдается упорядоченная и направлен-

ная смена состояний, подобных предшествующим. Хаотическая динамика возникает, на наш взгляд, вследствие нарушения иерархии систем и иерархии событий в их эволюции, нарушения фрактальных соотношений, но не потому, что смена состояний закономерно и самопроизвольно переходит в динамический хаос.

Хаос, описываемый математическими моделями, действительно может развиваться, если изменение коэффициентов – некоторых постоянных величин, характеризующих специфику воспроизводства систем (например, прирост численности составляющих ее особей в моделях «хищник-жертва»), умышленно, для удовлетворения любопытства, выводится за пределы естественной динамики. Иначе говоря, динамика системы переводится в ирреальные условия, в которых она может только деградировать, двигаться в сторону хаоса. Так, постепенное увеличение коэффициента параметра роста в модели «хищник-жертва» при достижении некоторого предельного значения ведет к хаотизации процесса воспроизводства численности особей и хищников, и жертв (Пайтген, Ритхтер, 1993). И упорядоченный колебательный процесс переходит в хаотический, непредсказуемый, в силу того, что существенно завышенный коэффициент прироста, по существу, означает фантастически быструю и противоестественную воспроизводимость и жертв, и хищников. Такое состояние возможно лишь в моделях, но не в естественных их аналогах. В математической модели не учитывается запаздывание в росте численности особей, и промежуток времени между рождаемостью и смертностью укорачивается (коэффициент прироста растет). В то же время показатель емкости среды, выступающий в качестве внешнего регулятора численности, остается неизменным. Иначе говоря, постановка задачи становится некорректной.

Динамика, похожая на хаотическую, наблюдается в развитии некоторых насекомых (например, саранчи), эпидемий болезни. Развитие саранчи осуществляется вполне предсказуемо. В границах среды ее обитания, при достаточности ресурсов питания, зародившись на нескольких локальных участках, там, где сохранились личинки, быстро растущая в количестве саранча (или эпидемии болезней) образует центробежно распространяющуюся волну, подобную солитону. Эта волна предсказуемо затухает, когда достигает границ своей среды обитания.

В динамике рельефообразующих процессов тоже можно найти подобные примеры, не выходящие за пределы эволюционного режима. Например, на смене гидротермических режимов с семиаридного на плювиальный формируются так называемые «дурные земли»; по сложности выделения в них порядка их можно было бы отнести к примеру хаотической

динамики. Но такое суждение может возникнуть только на первый взгляд и у неискушенного исследователя. Во всяком случае, и к этим явлениям аттрактор Лоренца не имеет отношения, поскольку он не соответствует реальной действительности – причинно обусловленной упорядоченности форм рельефа.

Теоретически построенные фракталы являют собой идеализированные модели. Так, в нашей работе (Поздняков, 1996; 2005) получен фрактал строения и динамики рельефа (см. рис. 2.1.8), исходя из того, что каждая последующая генерация форм рельефа увеличивает свою крутизну не случайным образом, а закономерно. В чистом виде эта закономерность проявляется не полностью. Тем не менее, она показывает направление к упорядоченности, что не достигается в идеале только в силу изменчивости материала (физических свойств) и прочих условий. Фрактал, таким образом, являясь характеристикой упорядоченности, одновременно характеризует и цикл. Непериодически развивающийся процесс не фрактален, и наоборот.

Фрактальность не может проследиваться бесконечно при изменении размеров. Она находится в определенных пределах, задаваемых иерархической структурой целостного образования – системы. Скажем, нельзя бесконечно увеличивать/уменьшать размеры береговой линии, границ районов, государств, извилистых рек, тектонических разломов и прочих линейных объектов сложной формы.

Для понимания динамики развития от хаоса к порядку требуется определить, какая система задает и меняет условия, необходимые для развития того или иного процесса, и по каким правилам. Ясно, что изменение условий задается вышестоящей по рангу системой, управляющей той, что располагается ниже. В хаосе порядок рождается не самопроизвольно, а вследствие организации упорядоченных условий, которые по отношению к данному хаосу выступают порядком более высокого ранга и задают направленную смену событий, заканчивающуюся формированием порядка. Так, каменные розетки и гирлянды (структурно организованные грунты) формируются в результате направленной сортировки обломочного материала, осуществляющейся вследствие периодического (упорядоченного) колебания влажности и температуры, с переходом ее через 0° (упорядоченное состояние условий среды). Формирование турбулентных струй сопровождается закономерным распределением поля скоростей. Тектонические дифференцированные движения, деформируя горизонтальную поверхность и создавая разность потенциалов силы тяжести, предопределяют закономерное (упорядоченное) пространствен-

ное перераспределение вещества. Вследствие гравитационного взаимодействия, если масса вещества превосходит критическую (масса, достаточная для стяжения частиц в шар), происходит формирование планетных систем.

Порядок и хаос не только сосуществуют, но взаимно дополняют друг друга, составляя диалектическое противоречивое единство – основу развития материи. Порядок порождает хаос, но порядок и формируется в хаосе. Порядок и хаос иерархичны и взаимообуславливаемы: высшие формы порядка и хаоса порождают располагающиеся ниже по уровню порядки и хаосы. Процессы самоорганизации целого существуют в силу того, что любой из всеобщих законов объективно предполагает целесообразное развитие: формирование хаоса целесообразно, так как направлено на замещение старого порядка новым, соответствующим изменившимся условиям.

Заключение

Длительные наблюдения, натурные эксперименты и численное моделирование показали, что многие процессы в рельефообразовании не обнаруживают достаточно выраженной, явной строгой периодичности, зато в большей или меньшей степени обладают свойствами самоподобия в пространственной, временной и энергетической областях. И эта фрактальность настолько наглядна, что позволяет говорить о ней как о неотъемлемом свойстве большинства геоморфологических систем.

Но, при этом, фракталы представляют собой лишь упрощенную модель реальности. Следовательно, фрактальный анализ может быть применен к довольно широкому, но все же ограниченному кругу естественных объектов и явлений и ни в коей мере не рассматривается в качестве своеобразного единственного универсального ключа к познанию природы.

Тем не менее, анализ пространственной структуры рельефа земной поверхности с позиции фрактальной теории значительно расширяет возможности исследования. Безусловно, конкретные методики численного моделирования, а также получения необходимой цифровой информации о геоморфосистемах непосредственно в полевых условиях, при работах с картографическими материалами и данными дистанционного зондирования нуждаются в дальнейшей разработке и корректировке. В то же время очевидно большое значение фрактального анализа для познания фундаментальных закономерностей структурной организации, особенностей функционирования и эволюции флювиальных геоморфосистем.

Подводя итоги, особо отметим потенциальную практическую значимость применения фрактального анализа при изучении геоморфосистем. Нами затронуты, по меньшей мере, три прикладных аспекта, лежащих в области геоэкологии и природопользования: оценка морфологии и динамики речной сети (на примере Саяно-Тувинского нагорья,

Горного Алтая, Западно-Сибирской низменности в России и поймы р. Дуная в Румынии), мониторинг изменений овражно-балочной сети в условиях урбанизации (на примере Саратовской урбосистемы) (фиг. 23-28) и выявление особенностей продвижения флюидов в палеофлювиогеморфологических сетевых структурах, что непосредственно связано с поиском и добычей соответствующих полезных ископаемых.

Таким образом, применение фрактального анализа в флювиальной геоморфологии находится фактически в начальной стадии осмысления результатов. Однако определенные промежуточные итоги позволяют предположить для этого направления значительные перспективы, и спектр практического приложения по тематике монографии будет в дальнейшем стремительно расширяться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анищенко В.С., Янсон Н.Б., Павлов А.Н. Может ли режим работы сердца здорового человека быть регулярным? // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42. № 8. – С. 1005-1010.
2. Аюпова О.Д., Калуш Ю.А., Логинов В.М. Связь сейсмической активности территории Тувы и прилегающей части Монголии с фрактальной размерностью системы разломов // Геология и геофизика. – 2007. – № 48. – С. 769-775.
3. Аюпова О.Д., Калуш Ю.А., Лебедев В.И. Фрактальная размерность новейших разломов сейсмически активных районов Тувы и сопредельных территорий Монголии // Дальнейшее совершенствование природной, техногенной и пожарной безопасности населения и территорий – устойчивое развитие Сибирского региона: Труды науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2004. – С. 97-98.
4. Балханов В.К., Баикуев Ю.Б. Фрактальная размерность структуры русловой сети дельты Селенги // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31. № 2. – С. 165-169.
5. Божожин С.В., Париши Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
6. Борняков С.А., Адамович А.Н., Гладков А.С., Клетиков В.А., Матросов В.А. Информационная энтропия и фрактальная размерность как критерий самоорганизации систем разрывов в зонах разломов (по результатам моделирования) // Доклады РАН. – 2003. – № 2. – С. 250-253.
7. Бялко А.В. Наша планета Земля. – М.: Наука, 1989. – 240 с.
8. Вадковский В.Н., Соколов С.Д., Захаров В.С., Лубина Н.В. Аккреционная тектоника и фрактальная размерность // 4-е Геофизические чтения им В.И. Федынского: тезисы докладов. – М.: Геос, 2002. – С. 57-58.
9. Васильев Л.Н. Фрактальность и самоподобие природных пространственных структур // Известия РАН. Сер. геогр. – 1992. – № 5. – С. 25-35.
10. Ватолин Д. Фрактальное сжатие изображений // <http://www.osp.ru/cw/1996/06/30.htm>, 1996.
11. Великанов М.А. Гидрология суши. Л.: Гидрометеоздат, 1948. – 550 с.
12. Гарцман И.Н. Топология речных систем и гидрографические исследования // Водные ресурсы. – 1973. – № 3. – С. 109-124.
13. География овражной эрозии / под ред. Е.Ф. Зоршой. – М.: Изд-во Московского университета, 2006.
14. Гладков А.С., Лубина О.В., Шипкина Л.П. Фрактальный анализ тектонической трещиноватости и речной сети Прибайкалья // Рельфообразующие процессы: теория, практика, методы исследования: материалы XXVIII пленума геоморфологической комиссии РАН. – Новосибирск: ИГ СО РАН, 2004. – С. 78-80.
15. Голобергер Э.Л., Ригши Д.Р., Уэст Б.Дж. Хаос и фракталы в физиологии человека // В мире науки. – 1990. – № 4. – С. 25-32.
16. Данилов Ю.А. Фрактальность // Знание – Сила. – 1993. – № 5.
17. Евсеева Н.С. География Томской области (Природные условия и ресурсы). – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2001. – 223 с.

18. *Евсеева Н.С., Земцов А.А.* Деформации берегов Кети и связанные с ними процессы // Вопросы географии Сибири. – 1978. – Вып. 11. – С. 121-129.
19. *Замышляев В.И.* Математическое моделирование плановых перестроений русел меандрирующих рек: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ГГИ, 1983.
20. *Знаменская Н.С.* Гидравлическое моделирование русловых процессов. СПб.: Гидрометеониздат, 1992. 240 с.
21. *Золотухин И.В.* Фракталы в физике твердого тела // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 7. – С. 108-113.
22. *Зяtkова Л.К.* Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Изд-во «Наука». Сибирское отделение, 1977. – 215 с.
23. *Иванов А.В.* Козволюция геосфер: элементы бинальности и синергетики // Биология, симметрия и синергетика в естественных науках. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2004. – С. 8-12.
24. *Иванов А.В.* Некоторые размышления о восприятии эволюционных и синергетических идей // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2007. – Вып. 52. – С. 63-83.
25. *Иванов А.В.* Фрактально-ячеистая модель геосфер // Геология: история, теория, практика: материалы Междунар. конф., посвященной 250-летию Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН. – М.: ГГМ РАН, 2009. – С. 94-96.
26. *Иванов А.В., Короновский А.А., Милохин И.М., Яшков И.А.* Определение фрактальной размерности овражно-балочной сети города Саратова // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2006. – Т. 14. № 2. – С. 64-74.
27. *Иванов А.В., Молоствовский Э.А., Трубецков Д.И.* Эколого-геологические опасности в городах и их нелинейное моделирование: постановка проблемы // Геологические науки – 2007: материалы науч. межвед. конф. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. – С. 57-60.
28. *Иванов А.В., Шешнёв А.С., Яшков И.А.* Аналогии в строении природных эрозионных структур и кривой Коха: предпосылки качественного сопоставления // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 359. – С. 188-192.
29. *Иванов С.А.* Стохастические фракталы в Информатике // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2002. – № 8. – С. 7-18.
30. *Калуш Ю.А., Логинов В.М., Чутикова С.А.* Использование технологий ГИС при анализе фрактальных характеристик речной сети Тувы // Геоинформатика. – 2005. – № 4. – С. 31-40.
31. *Калуш Ю.А., Аюнова О.Д.* Закономерности распределения фрактальной размерности разломов Тувы // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов в Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2005. – Вып. 8. – С. 156-158.
32. *Каменсков Ю.И.* Русловые и пойменные процессы: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. 171 с.
33. *Каякин В.В., Комочко А.В., Чечот В.З. и др.* Развитие экзогенных трещин и их инженерно-геологическое значение // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1968. – С. 280-288.

34. *Клюнова А.С.* Реки // Природные условия Тувинской автономной области: труды тувинской комплексной экспедиции СОПС АН СССР. – М., 1957. – Вып. 3. – С. 66-104.
35. *Ключевский А.В., Демьянович В.М.* Байкальская рифтовая зона: область повышенной энергии сейсмоструктурных деформаций литосферы // Доклады РАН. – 2009. – Т. 428. № 5. – С. 663-666.
36. *Кондратьев Н.Е.* Дискретность руслового процесса // Труды ГГИ. – 1978. – Вып. 252. – С. 19-28.
37. *Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 282 с.
38. *Кондратьев Н.Е.* Русловые деформации в меандрирующих реках // Труды ГГИ. – 1954. – Вып. 44(98).
39. *Коноваленко С.С., Кочубенко О.В., Шляев С.А., Янушкевич О.А.* Плиоценовая речная сеть Куйбышевского Поволжья // Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. – М.: Наука, 1984. – С. 97-103.
40. *Корытный Л.М.* Водные ресурсы Ангаро-Енисейского региона / Л.М. Корытный, Л.А. Безруков. – Новосибирск: «Наука». Сибирское отделение, 1990. – 213 с.
41. *Кроновер Р.М.* Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
42. *Кубрин С.С.* Определение размерности Хаусдорфа фракталов с циклически повторяющимися структурами // Фракталы и циклы в развитии систем. Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе: материалы пятого Всерос. науч. семинара. – Томск, 2001. – С. 124-126.
43. *Кузнецов А.С., Поздняков А.В.* Динамика развития геоморфосистем как бинарных структур, функционирующих с насыщением (на примере горноледникового бассейна р. Актру) // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2012. – № 2. – URL: <http://www.scienceeducation.ru/102-5901>.
44. *Ляхно В.Д.* Кластеры в физике, химии, биологии: учеб. пособие для вузов. – М.; Ижевск: Регуляр. хаот. динамика, 2000. – 254 с.
45. *Лухнева О.Ф., Куснер Ю.С., Лухнев А.В., Балханов В.К.* Фрактальная характеристика береговой линии озера Байкал и сети водотоков дельты реки Селенги // География и природные ресурсы. – 2005. – С. 60-63.
46. *Лялин Ю.В., Поздняков А.В.* Фракталы и автоколебания в геоморфосистемах // Фракталы и циклы развития систем. Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе: материалы пятого Всерос. науч. семинара. – Томск: ИОМ СО РАН, 2001. – С. 126-129.
47. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в её бассейне – М.: АН СССР, 1955. – 346 с.
48. *Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.
49. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
50. *Манжуров И.Л.* Фрактальная модель распределения плотности поверхностных загрязнений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Екатеринбург, 2002.

51. Мельник М.А., Поздняков А.В. К методологии фрактального анализа процессов рельефообразования // Земная поверхность, ярусный рельеф и скорость рельефообразования: материалы Иркутского геоморфологического семинара. Чтения памяти Н.А. Флоренсова. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. – С. 205-207.
52. Мельник М.А., Поздняков А.В. Фрактальный анализ эрозивно расчлененного рельефа: методологические подходы // Вестник ТГУ. – 2007. – № 301. – С. 201-205.
53. Мирлин Е.Г. Фрактальная размерность литосферы и геодинамика // ДАН. – 2001. – Т. 379. – № 2. – С. 231-234.
54. Мирлин Е.Г. Фрактальная дискретность литосферы // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Т. «Тектоника и геодинамика». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – С. 140-143.
55. Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов / под ред. И.В. Ильина, Д.И. Трубецкого. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 2010. – 412 с.
56. Морозов А.Д., Введение в теорию фракталов. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
57. Морфоструктурный анализ речной сети СССР / отв ред. И.П. Герасимов и С.С. Коржув. – М.: Наука, 1979. – 303 с.
58. Никора В.И. Руслыные процессы и гидравлика малых рек. – Кишинев: Штиинца, 1992. – С. 26-40.
59. Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1980. – 336 с.
60. Пайтген Х.-О., Рихтер П. Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 176 с.
61. Пат. 2006611604 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Фрактальная размерность речной сети» / Ю.А. Калуш, В.М. Логинов, С.А. Чупикова; заявитель и правообладатель Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирское отделение Российской академии наук. – № 20066110092; заяв. 10.01.06; зарег. 12.05.06.
62. Пат. 200661802 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Фрактальная размерность разломной тектоники» / Ю.А. Калуш, В.М. Логинов, О.Д. Аюнова; заявитель и правообладатель Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирское отделение Российской академии наук. – № 2006611901; заяв. 08.06.06; зарег. 02.10.06.
63. Пенк В. Морфологический анализ. – М.: Географгиз, 1961. – 359 с.
64. Поздняков А.В. Самоорганизующиеся бинарные структуры // Биология, симметрия и синергетика в естественных науках: материалы V-й Междунар. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2007 – С. 29-35.
65. Поздняков А.В. Геоморфодинамика в содержании и формах проявления // Геоморфология. – 2005. – № 1. – С. 24-30.
66. Поздняков А.В., Лялин Ю.В. Автоколебания и фрактальность в геоморфосистемах // Геоморфология Центральной Азии: материалы XXVI Пленума Геоморфологической комиссии РАН. – Барнаул: Изд-во АлГУ, 2001. – С. 141-144.
67. Поздняков А.В. Эволюционное развитие и устойчивость целостных систем // Самоорганизация геоморфосистем (Проблемы самоорганизации. Вып. третий). – Томск: ТНЦ СО РАН, 1996. – С. 15-25.

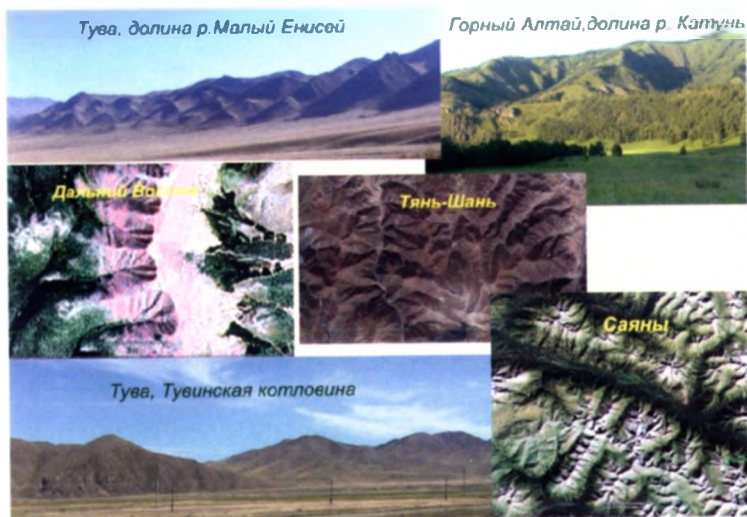
68. Поздняков А.В. Динамическое равновесие в рельефообразовании. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
69. Поздняков А.В. Авторегуляция и динамическое равновесие в рельефообразовании // Основные проблемы теоретической геоморфологии. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 39-48.
70. Поздняков А.В. Развитие склонов и некоторые закономерности формирования рельефа. – М.: Наука, 1976. – 112 с.
71. Поздняков А.В., Лялин Ю.В., Тихоступ Д.М. Формирование поверхности равновесия и фрактальные соотношения в эрозионном расчленении // Самоорганизация геоморфосистем (Проблемы самоорганизации. Вып 3). – Томск: ТНЦ СО РАН, 1996. – С. 36-48.
72. Поздняков А.В., Махинов А.Н. О механизме формирования плесов и перекатов водными струями русловых потоков // Проблемы гидрологии зоны БАМа и Дальнего Востока. – Владивосток, 1983. – С. 77-78.
73. Поздняков А.В., Черванев И.Г. Самоорганизация в развитии форм рельефа. – М.: Наука, 1990. – 204 с.
74. Пузаченко Ю.Г. Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Известия РАН. Сер. геогр. – 1997. – № 2. – С. 24-40.
75. Пузаченко Ю.Г. Методологические основы измерения сложности ландшафта // Известия АН СССР. Сер. геогр. – 1995. – № 4. – С. 30-40.
76. Пуцаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика. – М.: Наука, 1994. – 150 с.
77. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 240 с.
78. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – Т. 15. – Вып. 2. – 240 с.
79. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 238 с.
80. Русловой процесс / Н.Е. Кондратьев, А.Н. Ляпин, И.В. Попов и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 264 с.
81. Русловые процессы и водные пути рек Обского бассейна / под ред. Р.С. Чалова, Е.М. Плескевича, В.А. Баулы. – Новосибирск: РИПЭЛ плюс. 2001. – 300 с.
82. Рыскин М.И., Иванов А.В. Нелинейная динамика в науках о Земле: информация к размышлению // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2003. – № 6. – С. 138-148.
83. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Дискретные иерархические модели геофизической среды // Комплексное исследование по физике Земли: ИФЗ-60 лет. – М.: Наука, 1989. – С. 9-26.
84. Салтыков В.Ф. Палеогеоморфология байосского времени северной части Доно-Медведицких дислокаций // Геоморфология. – 2004. – № 4. – С. 78-86.
85. Салтыков В.Ф., Иванов А.В. О главных ограничениях применимости метода актуализма при геологических исследованиях // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках: труды 4-й Междунар. конф. – Тюмень, 2004. – С. 110-114.

86. *Сандерс Л.М.* Фрактальный рост // В мире науки. – 1987. – № 3.
87. *Сидоренко В.В., Суртаев В.Н., Хасанов М.М.* Новый подход в моделировании строения природных нефтяных резервуаров речного генезиса // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2007. – Т. 15. – № 3. – С. 74-88.
88. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла – СПб.: Гидрометеониздат, 1992. – 126 с.
89. *Симонов Ю.Г.* Региональный геоморфологический анализ. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1972. – 250 с.
90. *Смирнов Б.М.* Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991. – 134 с.
91. *Стаховский И.Р., Белоусов Т.П.* Параметры локального самоподобия систем активных разломов и пространственное распределение сейсмичности // Доклады РАН. – 1997. – Т. 354. – № 4. – С. 545-548.
92. *Стаховский И.Р., Белоусов Т.П.* Масштабные инварианты в сейсмотектонике // Доклады РАН. – 1996. – Т. 347. – № 2. – С. 252-256.
93. *Ступишин А.В.* К истории формирования левобережья Приказанского Поволжья // Известия Всесоюз. географ. об-ва. – 1948. – Т. 80. – Вып. 3.
94. *Сугоракова А.М., Ойдуу Ч.К.* Краткий очерк геологического строения и металлогении Тувы на основе современных данных // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества / отв. ред. д.г.-м.н. В.И. Лебедев. – Кызыл: ТувиНКОПР СО РАН, 2009. – Вып. 10. – С. 10-16.
95. *Торнес Д.Б., Брунсден Д.* Геоморфология и время. – М.: Недра, 1981. – 225 с.
96. *Уломов В.И.* Фрактальная структура литосферы сейсмоактивных регионов и решеточная модель сейсмогеодинамики // Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные): Первый междунар. семинар. 19-23 сентября 1994 г. – М.: ИГиРГИ, 1994. – С. 192-193.
97. *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
98. *Философов В.П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 232 с.
99. *Флоренцов Н.А.* Очерки структурной геоморфологии. – М.: Наука, 1978. – 237 с.
100. *Фракталы в физике / под ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти.* – М.: Мир, 1988. – 670 с.
101. *Хортон Р.Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов / Р.Е. Хортон. – М.: ИЛ, 1948. – 158 с.
102. *Хрусталева Ю.П.* Эколого-географический словарь / науч. ред. Г.Г. Матишов. – Батайск, 2000.
103. *Худяков Г.И.* Геоморфотектоника юга Дальнего Востока. – М.: Наука, 1977. – 256 с.
104. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1979. 232 с.
105. *Чалов Р.С.* Общее и географическое русловеление. – М.: Изд-во Московского университета, 1997.

106. *Чутикова С.А., Аюнова О.Д., Казуш Ю.А.* Сравнение фрактальных характеристик разломной тектоники и речной сети республики Тыва // Научные основы сохранения водосборных бассейнов: междисциплинарные подходы к управлению природными ресурсами: материалы Междунар. конф. – Улан-Удэ, 2004. – С. 51-52.
107. *Шахматова П.А., Лиханов Б.Н.* Советская Тува (природа, население, хозяйство) / под ред. Л. Леонтьева. – Кызыл.: Тувинское книжное изд-во, 1955. – 156 с.
108. *Шерман С.И., Сорокин А.П., Черемных А.В.* Новый подход к тектоническому районированию Приамурья по фрактальной размерности разломов земной коры // Доклады РАН. – 2001. – Т. 381. – № 3. – С. 1-5.
109. *Шмидт Ф.К.* Методы синергетики в физической химии (самоорганизация химических систем): учеб. пособие для вузов. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2003. – 192 с.
110. *Шмидт Ф.К.* Фракталы в физической химии гетерогенных систем и процессов: учеб. пособие для вузов. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2002. – 180 с.
111. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
112. *Штауб А.К.* Воды // Природные ресурсы Томской области. – Томск, 1966. – С. 50-52.
113. Эволюция геологических процессов в истории Земли. – М.: Наука, 1993. – 240 с.
114. Электронный ресурс: www.inmh.ro/images/floods/index6bda.html?stage=zona&cat=5.
115. Электронный ресурс: <http://maps.google.com/>.
116. *Яшков И.А., Иванов А.В.* Изучение эрозионной сети с помощью фрактального анализа // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2005. – Вып. 44. – С. 49-58.
117. *Яшков И.А., Иванов А.В.* Некоторые аспекты реконструирования и нелинейного моделирования эрозионной сети в геологическом прошлом: комментарии географа и геолога к статье В.В. Сидоренко, В.Н. Суртаева, М.М. Хасанова «Новый подход в моделировании строения природных нефтяных резервуаров речного генезиса» // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2007. – Т. 15. – № 3. – С. 87-94.
118. *Abraham R.H., Christopher D.S.* Dynamics: The Geometry of Behavior. – New York, NY: Addison-Wesley, 1992.
119. *Barbera L.P., Rosso R.* On the fractal dimension of stream networks // Water Resour. Res. – 1989. – Vol. 25. – № 4. – P. 735-741.
120. *Berquist T.S., Snow, R.S.* Fractal analysis of the planforms of rivers in Indiana and Kentucky, Geol. Soc. America Abstracts with Programs 17. – 1985. – P. 280.
121. *Claps P., Oliveto G.* Reexamining the determination of the fractal dimension of river networks // Water Resour. – 1996. – Vol. 32. – № 10. – P. 3123-3135.
122. Fractals and chaos / *A.J. Crilly, R.A. Earnshaw, H. Jones*, editors. – New York: Springer-Verlag, 1991. – 277 p.
123. *Koronovskiy A.A., Minyuhin I.M., Yashkov I.A., Ivanov A.V.* Definition of the fractal dimension of Saratov ravine network // Problems of Geocosmos. – St. Petersburg, 2006. – P. 159-160.

124. *Mandelbrot B.* The Fractal Geometry of Nature. – New York, N.Y.: W.H. Freeman and Company, 1977.
125. *Mandelbrot B.* Les objets fractals: forme, hasard, et dimension. – Paris: Flammarion, 1975.
126. *McNamara J.P., Kane D.L., Larry D., Hinzman L.D.* An analysis of an arctic channel network using a digital elevation model // *Geomorfology*. – 1998. – № 29. – P. 339-353.
127. *Oancea S.* Analiza fractala – Aplicatii in stiintele naturii. – Iasi, Editura Pim, 2006.
128. *Pozdnyakov A.* Geosystems as Self-organising Binary Structures // *Studying, Modeling and Sense Making of Planet Earth: International Conference*. 1-6 June, 2008. University of the Aegean, Mytilene, Greece. – 2008. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.aegean.gr/geography/earth-conference2008/papers/papers/B011D064.pdf>.
129. *Richardson L. F.* The Problem of Contiguity: An Appendix of Statistics of Deadly Quarrels // *General Systems Yearbook*. – 1961. – № 6. – P. 139-188.
130. *Snow R.S.* Fractal Sinuosity of Stream Channels // *Rare and App. Geophys.* – 1989. – Vol. 131. – № 1-2. – P. 99-109.

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



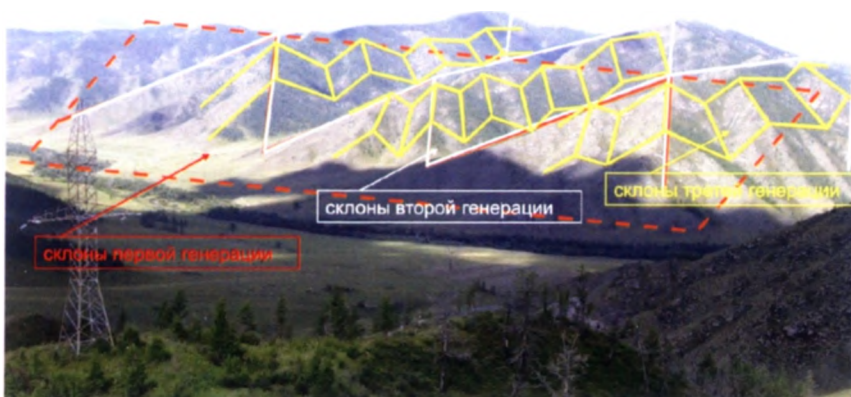
Фиг. 1. Фрактальные закономерности форм рельефа



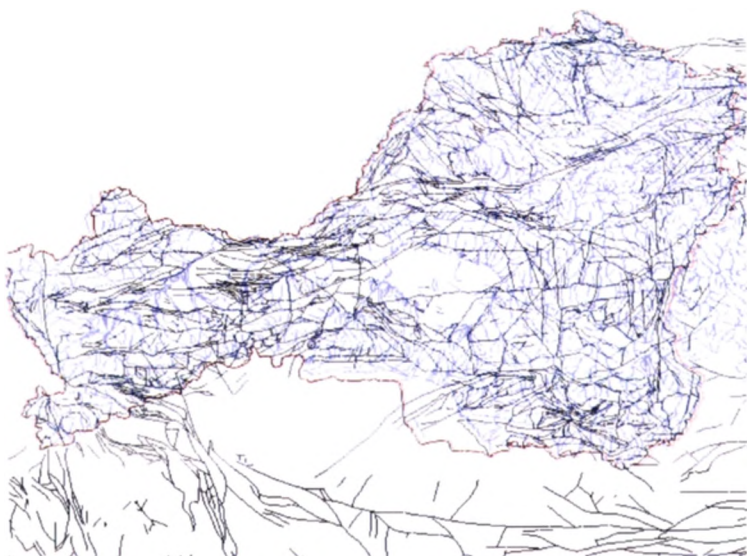
Фиг. 2. Самоподобное образование отдельностей в базальтах (Курильские о-ва. фото С.П. Горошкевич)



Фиг. 3. Самоподобный рисунок склонов.
Горный Алтай



Фиг. 4. Самоподобие склонов различных генераций.
Приольхонье



Фиг. 5. Совмещенная карта речной сети (синий цвет) и тектонических разломов (черный цвет)



Фиг. 6. Современные трещины усыхания (в 2 км южнее с. Багаевка Саратовской области). Отчетливо видна самоподобная фрактальная структура паттерна в определенном диапазоне характерных пространственных масштабов



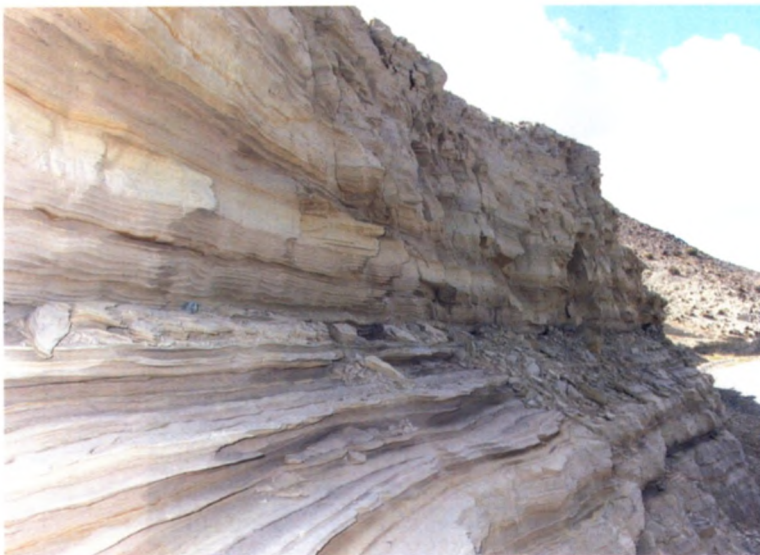
Фиг. 7. Сейсмический оползень на Алтае.
Долина р. Чаган-Узун



Фиг. 8. Оползневые процессы на бортах
овр. Караульного. Саратов



Фиг. 9. Полигональные структурные грунты. Долина р. Кызыл-Чин (Горный Алтай)



Фиг. 10. Пример циклического строения осадочной толщи.
В разрезе наблюдается самоподобие чередующихся элементов ритмов
в озерных отложениях. Долина р. Чаган-Узун (Горный Алтай)



Фиг. 11. Взаимодействие процессов абразии и эрозии на берегу Волгоградского вдхр.



Фиг. 12. Формирование первичной эрозионной сети на борту песчаного карьера. Окрестности пос. Балтай Саратовской области



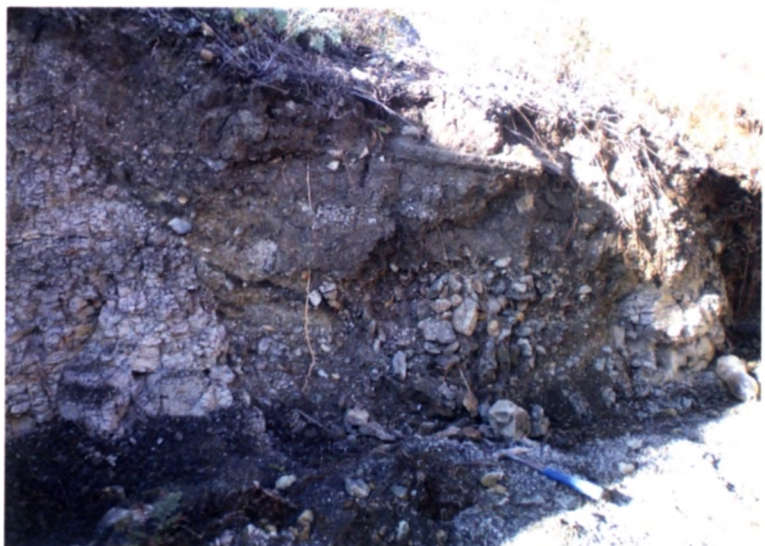
Фиг. 13. Самоподобные меандры.
Горный Алтай (фото А.В. Позднякова)



Фиг. 14. Спутниковая съемка поймы Балта-Брэйлэй (р. Дунай, Румыния)
по состоянию на 31 мая 2006 г. (www.inmh.ro)



Фиг. 15. Развитие первичной эрозионной сети в четвертичных отложениях. Окрестности с. Карамыш Красноармейского района Саратовской области



Фиг. 16. Четвертичный палсоврез в отложения мелового возраста в борту молодого растущего оврага. Окрестности с. Елшанка Красноармейского района Саратовской области



Фиг. 17. Молодой растущий овраг в палеогеновых отложениях.
Саратовская область



Фиг. 18. Эрозионные процессы на горных склонах.
Долина р. Кызыл-Чин. Горный Алтай



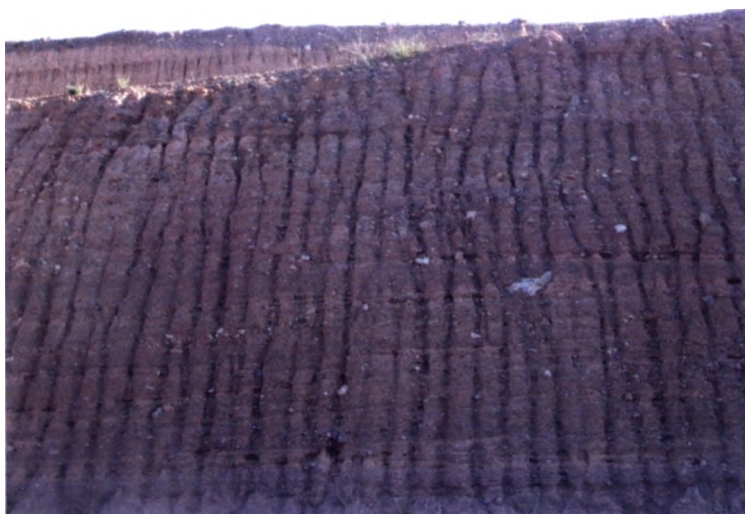
Фиг. 19. Устьевая часть Даниловского оврага. Саратовская область.
(Фото А.Н. Башкатова)



Фиг. 20. Средняя часть Даниловского оврага. Саратовская область.
(Фото А.Н. Башкатова)



Фиг. 21. Молодой растущий овраг. Окрестности с. Юнгеровка
Лысогорского района Саратовской области



Фиг. 22. Самоподобное образование эрозионных борозд ручейковыми потоками
на склонах. Испания (фото А.В. Позднякова)



Фиг. 23. Продвижение нефтепродуктов по эрозионной сети. Саратов



Фиг. 24. Техногенные разливы нефтепродуктов по эрозионной сети. Саратов



Фиг. 25. Неравномерное таяние снега по бортам молодого растущего оврага. Окрестности с. Садовка Балтайского района Саратовской области



Фиг. 26. Взаимодействие элементов эрозийной сети с дорожной сетью. Окрестности с. Садовка Балтайского района Саратовской области



Фиг. 27. Активный овраг, развивающийся у автомобильной дороги на Нижнюю Банновку Красноармейского района Саратовской области



Фиг. 28. Формирование техногенного пролювия (разлив бетона) по эрозивной сети. Саратов



Фиг. 29. Молодой овраг, развивающийся в четвертичных отложениях вдоль борта карьера. Окрестности с. Алешники Жирновского района Волгоградской области



Фиг. 30. Формирование эрозийной сети в четвертичных отложениях. Окрестности с. Нижняя Банновка Красноармейского района Саратовской области



Фиг. 31. Формирование эрозионной сети в четвертичных отложениях. Окрестности с. Синенькие Саратовского района Саратовской области



Фиг. 32. Приток р. Чай-Урья. Магаданская область (фото М.Н. Пещерова)



Фиг. 33. Долина активного оврага, разбивающаяся в коренных породах (углистые сланцы с прожилками кварца).
Долина р. Дегтекан, Магаданская область (фото М.И. Пещерова)



Фиг. 34. Склон оврага, активизирующегося в результате хозяйственной деятельности. Оползневые тела скользят по повторно-жильным льдам. Долина р. Дегдскан, Магаданская область (фото М.И. Пещерова)

Научное издание

**ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
В ФЛЮВИАЛЬНОЙ ГЕОМОРФОЛОГИИ**

Под редакцией А.В. Иванова, А.В. Позднякова

Редактор З.И. Шевченко
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой

Подписано в печать 09.08.2013

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 10,69 (11,5)

Уч.-изд. л. 11,0

Тираж 500 экз.

Заказ 133

С 45

Москва. Издательство «Университетская книга»

119991, Москва, Воробьевы горы, МГУ, корп. 20, ком. 18, а/я 587

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Тел. 24-95-70, 99-87-39. E-mail: izdat@sstu.ru



ISBN 978-5-91304-326-9



9 785913 043269