На правах рукописи

Чупикова Светлана Алексеевна

ФРАКТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТОЙ РЕГУЛЯРНОСТИ В ЭРОЗИОННОМ РАСЧЛЕНЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ (на примере анализа Саяно-Тувинского нагорья, Республика Тува)

25.00.25 – «Геоморфология и эволюционная география»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Томск - 2010

Российская академия наук
Сибирское Отделение
Учреждение РАН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов
Учреждение РАН Институт мониторинга климатических и экологических систем

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Поздняков Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Бураков Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент
Хиценко Владимир Евгеньевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет»

Защита состоится июня 2010 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.15 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а

Автореферат разослан « » мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук,
доцент **В.С.Хромых**

Введение

Актуальность исследования. Изучение природных условий в целях их рационального использования предполагает анализ большого объёма разносторонней, в том числе картографической, информации, с применением современных информационных технологий. Для раскрытия особенностей развития геосистем как во временном, так и пространственном отношениях, в условиях сложного строения ландшафтов, особенно горных территорий, в последние десятилетия учеными все более стали привлекаться фрактальные методы анализа, позволяющие выявлять скрытую регулярность и упорядоченность геосистем (Мирлин, 2001; Поздняков и др., 1996; Пузаченко, 1997; Васильев, 1992). В результате проведенных нами исследований (Чупикова и др., 2000; 2002; 2004; 2005) установлено, что применение фрактальных методов совместно с известными геоинформационными технологиями (ГИС) упрощает вычисление количественных характеристик речных систем – протяжённости рек и их порядков, среднегодового расхода воды и потенциальной энергетической мощности водотоков. Фрактальный анализ позволил обнаружить общие закономерности сложной динамики развития и структуры речной сети. На основе полученных результатов и научной интерпретации известных положений фрактальной методологии, нами разработан алгоритм построения модели и программы для расчета фрактальных показателей (***Патент № 2006611604 от 12.05.06 г.***).

В настоящее время ГИС совместно с фрактальными методами анализа становятся основой выполнения комплексных системных исследований в различных областях, в том числе для прогнозирования состояния водных объектов и подземных вод в связи с как их естественным развитием, так и изменениями вследствие антропогенных воздействий.

Практическое применение авторских научно-теоретических выводов (апробирована программа для ЭВМ "Фрактальная размерность речной сети"), выполненное на примере фрактального анализа пространственно-морфометрических закономерностей эрозионной сети Саяно-Тувинского нагорья в пределах территории Республики Тува, подтверждает актуальность и научно-теоретическую и практическую значимость проведенного исследования.

Цели и задачи диссертационного исследования. Основной целью диссертационного исследования является совершенствование методов фрактального анализа эрозионно-расчлененного рельефа и структуры речной сети, разработка алгоритма построения модели и программы для расчета фрактальных показателей, создание на базе современных геоинформационных технологий цифровых моделей речных бассейнов Республики Тува.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи:

- охарактеризовать структуру речных бассейнов с позиции фрактальной теории и провести фрактальный анализ речной сети Саяно-Тувинского нагорья;
- разработать и апробировать программу «Фрактальная размерность речной сети» для расчета фрактального показателя речной сети;
- оценить возможности использования имеющихся гидроресурсов Тувы для развития малой гидроэнергетики с помощью методов современных геоинформационных систем.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выбрано Саяно-Тувинское нагорье в пределах территории Республики Тува, характеризующееся сложнорасчлененным горным рельефом, сложным рисунком гидросети, где традиционные методы исследования недостаточно эффективны, а применение ГИС-технологий и фрактального анализа позволяет выявить скрытые особенности структурной организации эрозионного рельефа.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертационной работы положены результаты аналитических исследований, проводившихся по плановой тематике Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН с 1998 г., в том числе: Базовый конкурсный проект 4.5.2.5. «Фундаментальные проблемы управления ресурсным потенциалом Тувы и сопредельных трансграничных регионов с использованием геоинформационных систем и технологий» (2006-2009), Интеграционный проект № 16.7 «Экстремальные гидрологические явления на водных объектах Сибири: анализ, моделирование и изучение связей с климатическими условиями» (2007-2008). Изучение территории Тувы с позиции фрактальной методологии проводилось на базе электронной карты масштаба 1:1000000 территории Республики Тува, созданной Роскартографией в формате F1M (4 листа),

преобразованной автором во внутренние форматы PC ArcInfo 3.4.2, ArcView GIS 3.0, с последующей проверкой топологии, исправлением ошибок оцифровки, склейкой листов и актуализацией данных. Полученные результаты использованы в дальнейшем для топографической основы построения информационной модели объекта.

Для проведения фрактального анализа использовались оригиналы топографических карт масштаба 1:100 000 на всю территорию Тувы, составленных по материалам съёмки 1959, 1965 гг. масштаба 1:50000, изданных Восточно-Сибирским аэрогеодезическим предприятием ГУГК СССР.

Методология исследования опирается на современные теоретические концепции геоморфологии и фрактальной геометрии, изложенные в работах Б. Мандельброта (1982, 1988); Х.-О. Пайтгена, П. Х. Рихтера (1993); Е. Федера (1991); Е.Г. Мирлина (2001); А.В. Позднякова (1996, 2007); Ю.Г. Пузаченко (1997); А.В. Позднякова, И.Г. Черванева (1989) и др.

Научная новизна. В результате проведенных исследований были получены следующие основные научно-теоретические результаты:

1. Впервые для бассейна реки Енисей на территории Тувы определены показатели фрактальной размерности и проведен анализ их зависимости от высоты над уровнем моря. Установлено, что показатель размерности от высоты имеет максимум, приходящийся на пояс среднегорья.
2. В среде FoxPro разработан и апробирован программный комплекс для расчета и визуализации пространственного распределения показателей фрактальной размерности речной сети. Особенностью комплекса является возможность работы с данными ГИС.
3. Усовершенствована методика определения фрактального показателя и на её основе создана и апробирована программа для ЭВМ "Фрактальная размерность речной сети" (Патент № 2006611604, РФ от 12.05.06 г., в соавторстве с Ю.А. Калуш и В.М. Логиновым).

Практическая значимость проведенных исследований

1. Впервые для изучаемой территории разработаны цифровые модели речных систем Большого Енисея и Малого Енисея масштаба 1:100000, которые позволяют создавать новые тематические слои, изменять имеющиеся слои, производить анализ и обработку данных и др. Модели географической основы обусловливают возможность создания корректной информационной базы для решения задач геоинформационного моделирования.
2. Разработана программа «Фрактальная размерность речной сети», методика практического применения которой позволяет определять количественные характеристики геосистем – общую протяженность рек и отдельных элементов речной сети.
3. С применением ГИС и фрактальных характеристик проведён расчёт гидроэнергетического потенциала речных бассейнов в местах предполагаемого строительства малых гидроэлектростанций (МГЭС).

Достоверность проведенных исследований. Достоверность научных положений и выводов, полученных в работе, базируется на использовании классических математических методов и методов геоинформационного анализа; на использовании реальных данных; подтверждается согласованием результатов аналитических исследований и численных экспериментов, согласованием численных экспериментов с натурными данными и результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы изложены в 12 публикациях, в том числе в 2 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Диссертационная работа и ее отдельные разделы доложены на международных, всероссийских и региональных конференциях, таких как: Международная конференция «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия» (Томск, 2000); конференция «Инновационная стратегия Республики Тыва» (Кызыл, 2003); Международная конференция «Научные основы сохранения водосборных бассейнов: междисциплинарные подходы к управлению природными ресурсами» (Улан-Удэ, 2004); Научно-практическая конференция «Дальнейшее совершенствование природной, техногенной и пожарной безопасности населения и территории – устойчивое развитие Сибирского региона» (Новосибирск, 2004); Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и математическое моделирование» (Томск, 2006).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 129 наименований. Работа изложена на 134 страницах, содержит 37 рисунков, 20 таблиц и 5 приложений.

В первой главе «Методология фрактального анализа в изучении геосистем – краткая история становления» освещаются общие вопросы и методы фрактальной теории, применительно к речным системам и геоморфологическим процессам.

Во второй главе «Физико-географические особенности Саяно-Тувинского нагорья» дана физико-географическая характеристика территории исследования, описано геологическое и геоморфологическое строение.

В третьей главе «Методы фрактально-морфометрического анализа речных систем» изложены применяемые методы (на основе ГИС-технологий) и фрактальной геометрии, уточнены некоторые морфометрические характеристики речной сети.

В четвёртой главе «Фрактальный анализ основных речных бассейнов Саяно-Тувинского нагорья» изложены результаты фрактального анализа основных речных бассейнов с учетом высоты местности, для различных структурно геоморфологических комплексов; представлены результаты сравнительного анализа сети разломов и речной сети и рельефа в пределах водосборных бассейнов Большого и Малого Енисея и реки Хемчик.

В пятой главе «Фрактальный анализ и технологии ГИС в количественной оценке расходов воды на заданных участках рек» описан авторский ГИС-проект и определены оптимальные варианты использования гидроэнергетических ресурсов Тувы.

В Заключении в краткой форме изложены основные выводы и подведены итоги диссертационного исследования.

Благодарности

Автор глубоко признателен доктору физико-математических наук В.М. Логинову, кандидату физико-математических наук Ю.А. Калуш за выбор темы диссертационной работы и помощь при проведении исследований.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доктору географических наук, профессору А.В. Позднякову за помощь в научной интерпретации фактического материала, за постоянные научные консультации и добрые советы.

Большое спасибо всему коллективу лаборатории геоинформатики и моделирования процессов ТувИКОПР СО РАН, особая благодарность В.И. Котельникову, кандидату геолого-минералогических наук А.М. Сугораковой, А.Ф. Чульдум за консультации и помощь, кандидату геолого-минералогических наук С.Г. Прудникову за поддержку на разных этапах работы. Автор искренне признателен коллективу лаборатории самоорганизации геосистем ИМКЭС СО РАН за доброе, внимательное отношение и поддержку.

Положения, выносимые на защиту

Первое защищаемое положение. ***Речная сеть Саяно-Тувинского нагорья обладает фрактальными свойствами. Значение показателя длины реки заданного порядка может определяться с использованием фрактального показателя размерности***

В основе фрактального анализа лежат два главных критерия его применимости к изучаемым объектам: самоподобие и наличие фрактальной размерности. Для временной фрактальности (фрактальности динамики) определяющую роль играет свойство самоподобия, тогда как для пространственной фрактальности (фрактальности формы) наиболее важна дробная размерность. В своей работе мы рассматривали аспекты пространственной фрактальности речной сети.

К настоящему времени существует достаточное количество способов определения фрактальной размерности, применение которых обусловливается спецификой поставленной задачи. Все они основываются на уже имеющихся методах, принадлежащих другим наукам, определяющим те или иные черты пространственно-временной структуры объекта исследования. В работе определение показателя фрактальной размерности рек проводилось различными способами: из соотношения длина русла – площадь водосбора, емкостным методом и с использованием теории порядка рек.

Вычисленные вышеназванными способами значения показателя D для бассейнов рек Большой Енисей, Малый Енисей и Хемчик являются дробными $1{,}13 < D < 1{,}27$ (таблица 1), что свидетельствует о наличии фрактальных свойств исследуемых бассейнов. Фрактальный показатель отражает как размерность пространства, где функционируют изучаемые объекты, так и характеристики самих объектов.

Таблица 1 – Показатели фрактальной размерности, рассчитанные различными методами

Наименование речной системы	Фрактальный показатель D (зависи-мость длины от площади бассейна)	Фрактальный показатель D_S (с учётом порядка рек)	Фрактальный показатель D_K (метод квадратов)	Относительная погрешность $\delta = \frac{\lvert D - D_s \rvert}{D}$
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

**) для реки Хемчик фрактальный показатель не рассчитывался из-за отсутствия справочных данных показателей r_l и r_b. (объяснения далее в тексте)*

Как видно из таблицы 1, 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.

Оценка показателя длины r_l в теории порядка рек может быть легко произведена с использованием фрактального показателя D, полученного по методу квадратов. Важную роль при этом играет разработанная геоинформационная система речной сети Тувы, позволяющая автоматизировать и упростить многие трудоёмкие процессы вычисления характеристик речных сетей, в сравнении с классическими методами. Для определения показателя фрактальной размерности системы линий на плоскости часто применяется так называемый «метод квадратов» (Мандельброт, 2002; Федер, 1991; Мельник, 2007 и др.). В своей работе мы использовали алгоритм расчета, на основе которого создана программа “Фрактальная размерность речной сети” (Патент №2006611604 от 12.05.2006. Калуш Ю.А., Логинов В.М., Чупикова С.А.) Программа написана для машин класса PC Pentium 4, на языке Visual FoxPro 8.0 в среде Windows XP (рисунок 1).

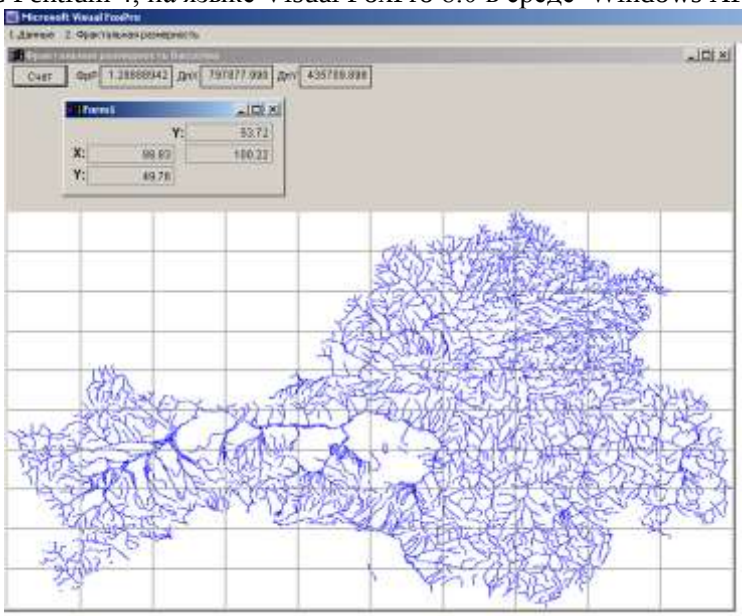


Рисунок – 1 Пример изображения окна программы «Фрактальная размерность речной сети»

Структура речного бассейна определяется закономерностями строения речных долин, вследствие чего одним из наиболее важных показателей структуры речного бассейна является порядок входящих в него рек. Расчёт фрактальной размерности речной сети с использованием теории порядка рек основывается на модели системы рек, построенной Хаком с учётом анализа структуры речных систем, предложенной Хортоном (Поздняков, Черванев, 1989). Согласно классификации Хортона, каждому руслу приписывается некоторый порядок. Так, 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. Показатель

длины r_l определяется как отношение средней длины рек одного порядка к средней длине реки ближайшего меньшего порядка. Средняя длина реки порядка i определяется по формуле:

$$L_i = r_l L_{i-1} = r_l^i L_0 , \qquad (1)$$

где L_0 – средняя длина самых коротких потоков.

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

$$N_i = r_b N_{i+1} = r_b^{s-i} N_s$$

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 одного и того же 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 равна для бассейна с порядком s:

$$S = \sum_{i=1}^{S} L_i dN_i = S_0 r_b^S \sum_{i=1}^{S} \left(\frac{r_l}{r_b} \right)^i \equiv S_0^{(ef)} r_b^S , \qquad (2)$$

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

Отсюда нетрудно записать выражение для порядка реки s:

$$s = \frac{1}{\ln r_b} \ln \frac{S}{S_0^{(ef)}} \qquad (3)$$

Полагая в (1), что $i = s$, имеем:

$$L_s = r_l^s L_0 . \qquad (4)$$

Заменяя здесь s выражением (2), получаем зависимость вида (1), где

$$D = D_S \equiv \frac{2 \ln r_l}{\ln r_b}$$

Основные водные артерии Тувы: реки Большой Енисей, Малый Енисей, Верхний Енисей и Хемчик, - по данным, приведённым в монографии Л.М. Корытного, Снытко и др. (2003), отнесены, согласно классификации Хортона – Штралера, к седьмому порядку.

Показатель ветвления r_b слабо зависит от порядка русла и остается в среднем постоянным (таблица 2). Вычисление показателя длины r_l (отношение суммарной длины рек одного порядка к суммарной длине рек, на порядок меньше), связано с определенными трудностями, нарастающими при изменении масштаба карты в сторону увеличения. Для исследуемой территории значение r_l рассчитывались двумя способами: в первом случае использовались данные из справочника «Гидрологическая изученность». Во втором случае значения r_l определялись с использованием ГИС по электронной карте масштаба 1:1000000. Использовалось отношение десяти рек, не имеющих притоков (для данного масштаба карты), к длинам рек, имеющих один приток для того же масштаба.

Применение ГИС-технологий (используются слои, отвечающие притокам разных порядков) значительно ускоряет процесс классификации рек по их порядкам и определения длины соответствующих водотоков.

Таблица 2 – Показатели ветвления r_b 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

Также была решена обратная задача – оценка показателя длины r_l, при условии, что величина фрактального показателя D известна и показатель ветвления r_b слабо зависит от порядка русла, оставаясь в среднем постоянным (Корытный и др., 1990, 2003).

Значение r_b для рек разных порядков берется из таблицы 2 и рассчитывается искомое значение параметра длины r_l (таблица 3).

Таблица 3 – Рассчитанные показатели длины

Река	r_l							
	I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-VII	Среднее	По данным «Гидрологической изученности »
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	*

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

Фрактальный анализ геометрии речной сети территории Тувы показал, 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, показателя длины, генерализации рек, расхода воды в реках на любом заданном ее отрезке.

Второе защищаемое положение. ***Пространственное распределение значений показателей фрактальной размерности речных бассейнов позволяет определять их скрытую регулярность***

Рисунок речной сети содержит информацию о климатических, геологических, геоморфологических и гидрологических аспектах ее зарождения и развития. Саяно-Тувинское нагорье (Тува) характеризуется резкой континентальностью климата, полноводностью большинства горных рек территории, молодостью рельефа и неотектонической активностью и пр., являющихся основными естественными факторами, которыми может быть обусловлена эрозионная деятельность.

С применением программы «Фрактальная размерность речной сети» и электронных карт автором проведён расчёт значений показателя фрактальной размерности речной сети Саяно-Тувинского нагорья с учётом высотной стратификации, для различных морфоструктурных единиц и систем тектонических разломов. Данные для вычислений получены с использованием программы ArcView, MapInfo.

По электронным картам рельефа и речной сети масштабов 1:1000000 и 1:100000, используя слои «Гидрография» и «Рельеф», последовательно выбирались отрезки реки, которые расположены между соседними горизонталями, высота сечения рельефа 100 метров и 40 метров соответственно. Полученные файлы, содержащие координаты кривых, преобразовывались в текстовый формат *.txt файл и импортировались в программу «Фрактальная размерность речной сети». По окончании работы программы происходит отображение множества кривых и расчёт фрактального показателя для определённой высоты рельефа.

Вычисленные значения показателя фрактальной размерности речных бассейнов Саяно-Тувинского нагорья позволили выявить следующие скрытые регулярности геосистем.

• Установлено, что максимальные значения показателя фрактальной размерности для речных бассейнов Большой Енисей, Малый Енисей и Хемчик, а также отдельных рек, входящих в эти бассейны, являются согласованными и подобными и приходятся на высоты от 1000 до 1200 м над уровнем моря, что соответствуют среднегорному поясу (рисунок 2).

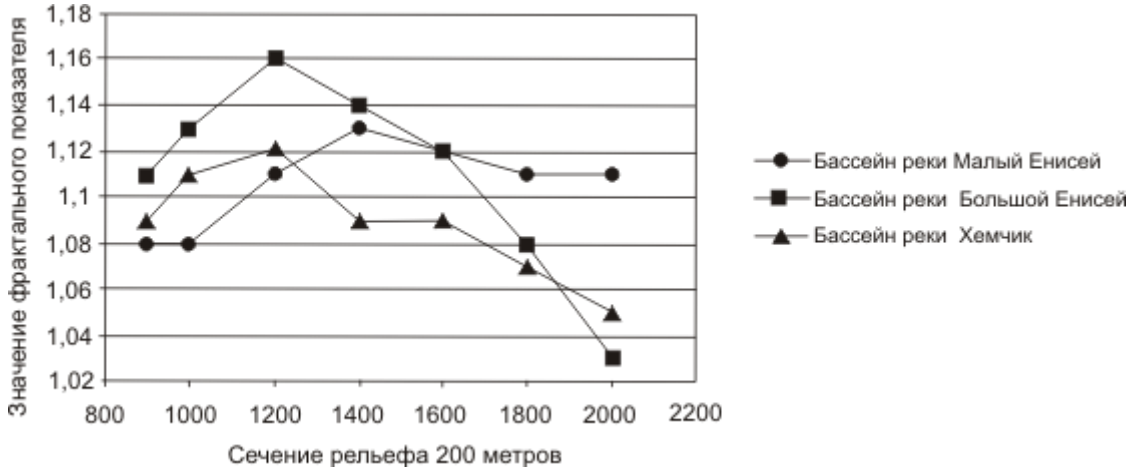


Рисунок 2 – Зависимость значения показателя фрактальной размерности от высоты рельефа.

• Были определены показатели фрактальной размерности речных бассейнов для различных орографических единиц Саяно-Тувинского нагорья. Полученные значения представлены на рисунке 3. Как видно из рисунка, степень разветвлённости речной сети на возвышенных участках больше, чем на равнинной территории, что нашло подтверждение в полученных результатах.

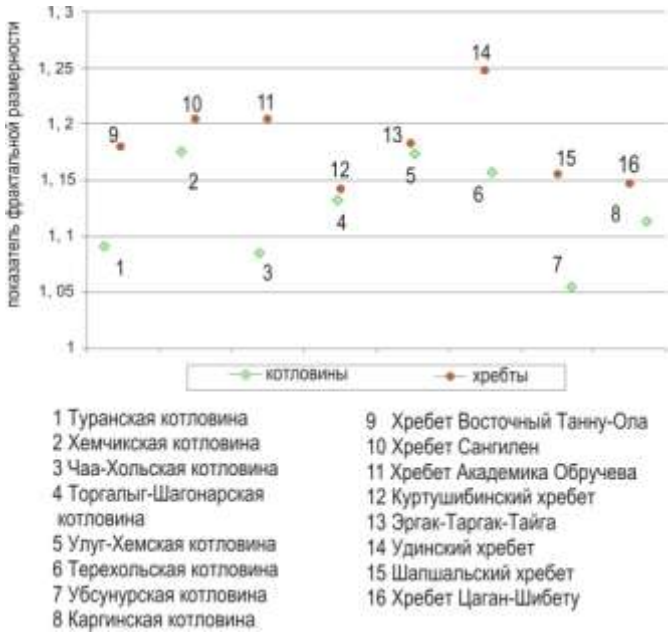


Рисунок 3 – График параметров фрактальности речной сети котловин и хребтов

• Для однородных орографических единиц, расположенных в различных природно-климатических условиях, значения показателя фрактальной размерности речной сети отличаются. Рассмотрим значения фрактальных показателей для котловин, расположенных в различных природно-климатических условиях. Из графика (рисунок 4) видно, что значение показателя фрактальной размерности для Убсу-Нурской котловины меньше, чем для Хемчикской и Улуг-Хемской (Центрально-Тувинской); наибольшее значение показателя фрактальной размерности

имеет Тоджинская котловина. Наименьшее значение показателя фрактальной размерности для Убсу-Нурской котловины определяется её расположением в степных, а местами полупустынных областях, для которых хребет Танну-Ола является природным барьером, задерживающим остатки влаги северо-западных воздушных течений, вследствие чего Убсу-Нурская котловина получает почти вдвое меньше осадков, чем соседние с севера Хемчикская и Улугхемская (Центрально-Тувинская) котловины.

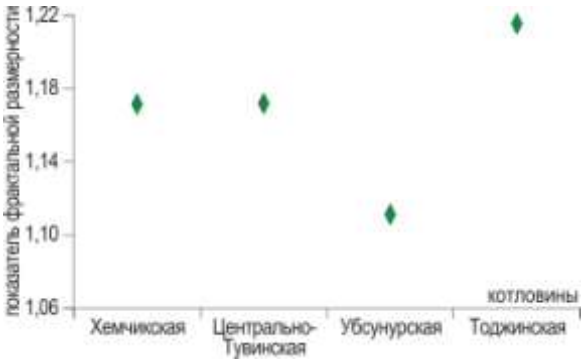
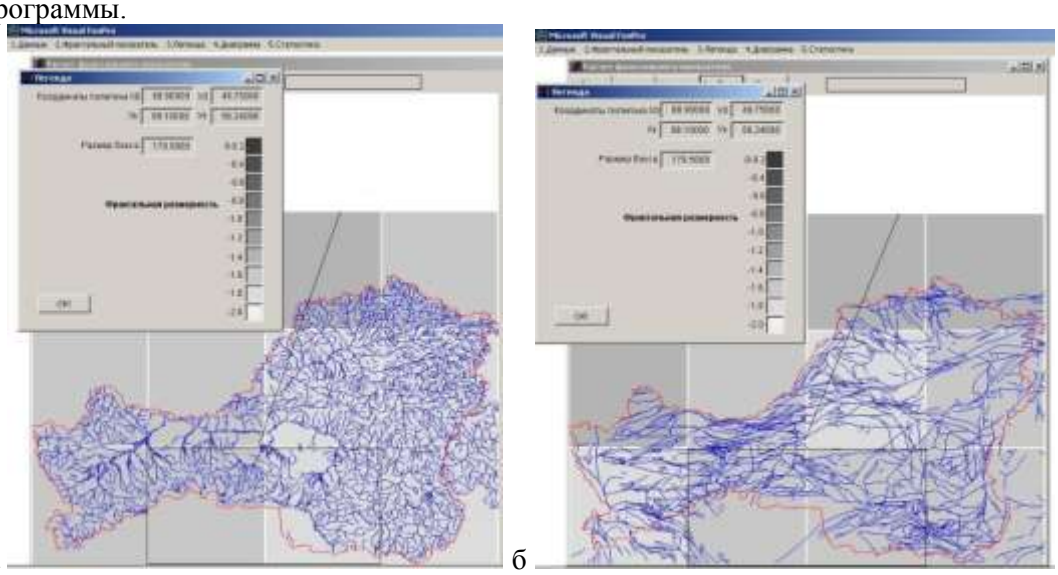


Рисунок 4 – Распределение величин фрактальной размерности речной сети котловин

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.

Сравнительный анализ выявляет высокую корреляцию между показателями фрактальной размерности речной сети и поля разломов. Новейшая тектоническая структура Тувы представляет собой систему крупных сводово-глыбовых поднятий, выраженных 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, обусловливающие разломообразование земной поверхности, являются одним из важнейших факторов формирования долинных систем, проводился совместный анализ показателей фрактальной размерности речной сети и системы тектонических разломов. На рисунке 5 представлено изображение окна программы.



а б

Рисунок 5 – Пример изображение окна программы « Фрактальная размерность разломной тектоники» а – рисунок речной сети, б – сети разломов

При расчете фрактальных показателей речной сети и разломов использовался модифицированный метод квадратов (Калуш, 2006). Вся территория Тувы разбивалась на боксы со сторонами 364, 182, 91, 45.5 и 22.75 км. Для каждого разбиения вычислялся средний коэффициент корреляции. Установлено, что для размера бокса ≥ 45.5 км наблюдается высокая (>0.8) корреляция между показателями фрактальной размерности речной сети и поля разломов. С уменьшением разбиения коэффициент корреляции резко уменьшается, так что для боксов со стороной 22.5 км коэффициент корреляции становится меньше 0.5. При дальнейшем уменьшении бокса корреляция исчезает.

В таблице 4 представлены результаты расчетов фрактальных показателей для двух основных речных бассейнов Енисея (Большого и Малого).

Таблица 4 – Сравнительный фрактальный анализ речной сети и разломов

Речной бассейн	Фрактальный показатель речной сети	Фрактальный показатель разломов
р.Малый Енисей (л)	1,230	1,200
р.Малый Енисей (п).	1,179	1,136
р.Большой Енисей (л)	1,171	1,159
р.Большой Енисей(п)	1,230	1,201

- Было установлено, что значения фрактального показателя разломов, приуроченных к определенным речным бассейнам, меньше величины фрактального показателя их водотоков. Это объясняется тем, что степень разветвленности, которую описывает показатель фрактальной размерности, выше у речной сети, чем у системы разломов, так как фрактальная природа разломов в основном определяется эндогенными процессами, а морфология речной сети обусловлена взаимодействием эндогенных и экзогенных процессов.

Третье защищаемое положение. ***Методы фрактального анализа и технологии ГИС позволяют количественно определять суммарную длину рек, устанавливать их связь с площадью бассейна и определять расход воды на заданных участках, с приемлемой точностью для предпроектной оценки гидроэнергетического потенциала рек.***

В соответствии с целью исследований, автором была создана геоинформационная система "Гидроэнергетические ресурсы Республики Тува" (Чупикова, Котельников, 2004).

Геоинформационная система имеет следующее строение:

- блок административно-хозяйственной информации;
- блок информации по гидрографическим объектам;
- блок климатической информации территории;
- блок информации по объектам малой гидроэнергетики.

Геоинформационная система представляет собой набор электронных карт, в основу построения ГИС положен принцип послойной организации информации.

Республика Тува располагает значительными водными ресурсами, использование которых позволяет рассматривать их в качестве источника энергии на ближайшую и отдаленную перспективу, так как, исходя из существующей экологической обстановки, строительство ТЭС в районе г. Кызыла нежелательно по условиям уже существующего загрязнения атмосферы. Положение усугубляется расположением города в котловине и отсутствием продуваемости в зимний период.

Для обеспечения энергобезопасности региона Правительством Республики Тува была принята Национальная программа "Энергообеспечение Республики Тыва за счёт использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии". На рисунке 6 показана картосхема предполагаемых к строительству малых ГЭС.

Однако существует проблема учёта экологических, экономических и других факторов размещения и стабильного функционирования малых гидроэнергетических устройств. Принятие решений по этой проблеме наиболее целесообразно проводить с использованием новых технологий, применение которых обеспечивает комплексное и наглядное представление

информации и даёт возможность отобразить и смоделировать возможные варианты и сценарии развития процессов.

Рисунок 6 – Картосхема расположения предполагаемых к строительству малых ГЭС

Речная сеть подчиняется в своем развитии определенным закономерностям, отражающим механизм взаимодействия между потоком воды и подстилающей поверхностью. Она является продуктом длительного и сложного естественно-исторического процесса, который отражает процессы влагооборота в пределах определенного водосбора, динамику тектонических движений и сопротивляемость поверхности эрозионному расчленению. Анализ имеющихся наблюдений (1974-2002 гг.) за уровнем воды в различных точках гидрографической сети бассейна реки Енисей (рисунок 7), а также проведённый фрактально-морфометрический анализ показывают, что речные системы согласованно реагируют на изменение гидрологической обстановки.

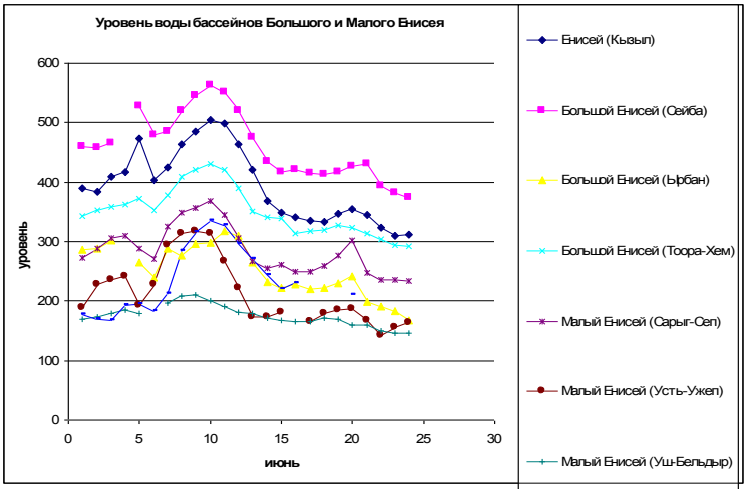


Рисунок 7 – Уровень воды бассейнов Большого и Малого Енисея

Полученные результаты подтверждаются высказываниями многих исследователей, отмечавших, что объекты природы, сформировавшиеся в одинаковых геолого-геоморфологических и зонально-климатических условиях, имеют сходные геометрические особенности (Зятькова, 1977).

Применение фрактального анализа и геоинформационных технологий является перспективным для получения и уточнения гидрографических характеристик и в дальнейшем для моделирования гидрологических процессов и явлений. Созданные цифровые модели речной сети позволяют на их основе производить соответствующие вычисления и определять необходимые параметры. Нами рассчитывался расход воды для определения потенциальной мощности водотока в заданной точке речного русла.

В настоящее время сокращение сети метеорологических станций и водомерных постов на реках, озерах и водохранилищах привело к невозможности получения объективных гидрологических сведений. Так, на территории Тувы до 1991 г. существовало 22 пункта наблюдений, на сегодняшний день действует 16 водомерных постов.

В связи с этим на первый план выходят косвенные методы определения гидрологической информации. Известно (Калинин 2000; Пьянков, 2006), что топографические и тематические карты являются источником ряда важнейших гидрографических характеристик рек и их бассейнов, необходимых для анализа и выявления закономерностей гидрологического режима водных объектов.

Для определения валового гидроэнергетического потенциала естественных водотоков применялись следующие формулы (Безруких, 2002):

$$N = 9{,}81 \times Q \times H \qquad (5)$$

$$Э = N \times T, \text{ кВт.ч}, \qquad (6)$$

где Q – расчетный расход воды; м^3/с, H – расчетный напор, м; N – мощность, кВт; Т – время, часы; $Э$ – вырабатываемая энергия, кВт.ч.

Таким образом, для расчета валовых гидроэнергетических ресурсов следует знать значения H и Q.

При выборе энергетических параметров МГЭС, для обеспечения её надёжной и безаварийной эксплуатации, наибольший практический интерес представляет среднемноголетний расход $Q_{мнг}$ и максимальный паводковый расход $Q_{макс}$. Для определения расчётного расхода $Q_{расч}$ необходимо иметь значение среднемноголетнего расхода $Q_{мнг}$, позволяющего, при выбранном значении напора H, подсчитать мощность $N^{ГЭС}$ и возможную выработку энергии электростанции $Э^{ГЭС}$. Правильное решение этой задачи важно для определения экономической эффективности МГЭС.

Автором рассматривалась зависимость стока рек от некоторых определяющих факторов, количественными показателями которых явились вычисленные гидрографические характеристики. В качестве показателей стока рек выбраны среднемноголетние годовые, максимальные и минимальные (летние и зимние) расходы воды. В результате выявлены зависимости стока от длины главного водотока, площади водосбора, суммарной длины рек в пределах бассейна.

Следует отметить, что аппроксимация поведения суммы длин притоков отмечалась в работе В.Н. Синюкович и др. (2000); в нашем случае соотношение зависимости расход – длина даёт несколько лучшие показатели, чем расход – площадь. Поэтому мы используем зависимости расход – длина для определения удельного расхода воды, необходимого при вычислении потенциальной мощности водотока в определённых точках речного русла.

Определение площади водосбора, длины рек по электронным вариантам топографических карт масштабов 1:1000 000 и 1:100000 и сравнение их с опубликованными данными в "Гидрологической изученности" (Гидрологический ежегодник, 1984-1987) показало, что разница между ними в среднем не превышает 2,69 %, при этом максимальное отклонение составило 11,04%.

С использованием электронных карт определялась длина всей реки и ее притоков и рассчитывался удельный расход для всего бассейна путем деления известного расхода в самой нижней точке реки на сумму длин всех притоков данной реки на интересующем нас водотоке. Удельный расход использовался для расчета реальных расходов воды и энергетической мощности водотоков.

Вычисленные значения (Q) – расхода воды по предлагаемой методике сравнивались с имеющимися данными "Государственного Водного кадастра" (таблица 5).

Расчеты N и Q для рек, входящих в речные бассейны Большого и Малого Енисея, произведенные для проектируемых к строительству малых гидроэлектростанций на территории

республики Тува, полученные с использованием предлагаемой методики и ранее по стандартным методикам, согласуются с приемлемой точностью для предварительной прогнозной оценки гидроэнергетических ресурсов.

Таблица 5 – Сравнительная характеристика расхода воды по данным ГИС и Государственного водного кадастра

Речной бассейн	$Q_{рас}$ – рассчитанный расход воды, м^3/с	Q – расход воды по данным "Гос. Водного кадастра", м^3/с	Относительная погрешность, %
Бурен	29,59	32,0	7,53
Мизим (пос. Сизим)	4,6	5,37	14,33
Ужеп	5,49	8,25	33,45
Каргы	17,99	23,6	23,77
Бол. Енисей (пос. Тора-Хем)	158,27	176	10,07
Систиг-Хем (пос Тозан)	35,43	60,3	41,24
Хамсара (пос Хамсара)	58, 72	89,2	34,17
Тапса (с Кара-Хак)	10,37	19,53	46,9

Предлагаемая методика определения расхода воды Q позволяет производить вычисления при ограниченной исходной информации, что поможет определять перспективные в гидроэнергетическом отношении водотоки в стадии предпроектной подготовки при существующей ограниченной гидрологической информации (таблица 6).

Таблица 6 – Рассчитанная и предполагаемая мощность проектируемых ГЭС (агр. – число агрегатов)

Проектируемые ГЭС	$N_{уст}$ проектируемая мощность, кВт	$N_{рас}$ мощность, рассчитанная с использованием ГИС, кВт
«Чазылар» на р. Хамсара	165 (3 агр х 55)	332
На р Чаваш	1720 (8 агр х 216)	224.9
«Тывинская» на р. Хамсара	1720 (8 агр х 216)	1210.7
На р. Сыстыг-Хем	110 (2 агр х 55)	192.2
На р. Сейба	110 (2 агр х 55)	38.3
На р. Хут	110 (2 агр х 55)	58.3
На р. Чавач	165 (3 агр х 55)	44.7
На р. Балыктыг-Хем	440 (8 агр х 55)	69.5

Использование современных методов пространственного анализа на базе ГИС-технологий позволит решать задачи накопления, хранения, обновления, анализа гидрологической, гидрогеологической информации. Новейшие пространственно-информационные ГИС, обладая способностью обрабатывать такую информацию, обеспечивают возможность строить прогнозные модели, создавать сценарии возможных ситуаций для быстрого и научно обоснованного принятия управленческих решений.

Заключение

Положительные результаты изучения и анализа пространственных закономерностей и скрытой регулярности сложнорасчлененного горного рельефа на примере Саяно-Тувинского нагорья (Республика Тува) 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, такими например, как длина рек и их порядки, площадь водосбора и др.

Помимо давно 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 км^2 (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 км^2 (сторона квадрата анализируемой площади 22,5 км) становится малозначащим. 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 связь показателей фрактальной размерности речной сети с высотой рельефа. Так, максимальные их значения соответствуют высотам рельефа 1000-1200 м. И выше, и ниже этих высотных отметок рельефа показатели фрактальной размерности убывают. Эта закономерность 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. 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, в частности - при определении расходов воды в реках с целью оценки их потенциальной энергии и выбора места для строительства малых гидроэлектростанций на стадии предпроектной проработки.

В слабоизученных районах, к каковым относятся Саяно-Тувинское нагорье и территория Республики Тува, 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 управленческих решений и оценки экологических последствий. Результаты исследований были положены в основу разработанного с участием автора геоинформационного проекта «***Гидроэнергетические ресурсы Республики Тува***».

Поставленные в диссертационном исследовании цели и задачи выполнены. Для их решения были созданы цифровые модели речных бассейнов Республики Тува масштабов 1:1000000 и 1:100000; различными методами определены показатели фрактальной размерности, как всей речной системы, так и отдельных бассейнов; исследована зависимость фрактального показателя речных бассейнов Саяно-Тувинского нагорья от высоты рельефа над уровнем моря. Фрактальные методы находятся на стыке современных методов исследования, включая использование новых математических моделей, современной компьютерной техники и новых методов получения информации. Следует также заметить, что еще далеко не все особенности и возможности фрактальных характеристик раскрыты.

Необходимо дальнейшее накопление фактурного материала, количественных данных, программного обеспечения, усовершенствование методов вычисления фрактальных показателей.

Основные публикации по теме диссертации

а) в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Чупикова С.А. Использование технологий ГИС при анализе фрактальных характеристик речной сети Тувы. / Ю.А. Калуш, В.М., Логинов, С.А. Чупикова. // Геоинформатика. – 2005. – № 4. – С. 31–40.

2. Чупикова С.А. Применение геоинформационных технологий в планировании развития гидроэнергетики региона на примере республики Тыва. / В.И. Котельников, С.А. Чупикова // Геоинформатика. – 2004. – №1. – С. 54 – 57.

3. Пат. 2006611604 Российская Федерация, Программа для ЭВМ «Фрактальная размерность речной сети» / Калуш Ю.А., Логинов В.М., Чупикова С.А.; заявитель и правообладатель Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирское отделение Российской академии наук – № 2006610092 ; заяв. 10.01.06 ;зарег. 12.05.06.

б) в других изданиях:

4. Чупикова С.А. Зависимость фрактальных показателей речных бассейнов Тувы от высоты рельефа / Ю.А. Калуш, В.М. Логинов, С.А. Чупикова // Информационные технологии и математическое моделирование/ Материалы V Международной научно-практической конференции, Изд-во Томского университета, 2006. – Ч. 2. – С. 14–16.

5. Чупикова С.А. Анализ фрактальных показателей природных объектов Тувы методами геоинформатики и математического моделирования /О.Д. Аюнова, Ю.А. Калуш, В.М. Логинов, С.А. Чупикова // Информационные технологии и математическое моделирование/ Материалы V Международной научно-практической конференции Изд-во Томского университета, 2006. Ч.1. – С. 7–9.

6. Чупикова С.А. Геоинформационная система «Энергетические ресурсы Республики Тыва» (Гидроресурсы) / В.И. Котельников, С.А. Чупикова // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества: Научн. тр. ТувИКОПР СО РАН /отв. ред. д.г.-м.н. В.И. Лебедев – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2004. – С.164–167.

7. Чупикова С.А. Фрактальные свойства береговой линии озера Убсу-Нур и впадающих в него рек / В.М. Логинов, С.А. Чупикова // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества: Научн. тр. ТувИКОПР СО РАН /отв. ред. д.г.-м.н. В.И. Лебедев – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2001. – С. 134–138.

8. Чупикова С.А. Анализ фрактальной размерности речной системы бассейна Енисея с использованием теории порядка рек / В.М. Логинов, С.А. Чупикова // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества: Научн. тр. ТувИКОПР СО РАН /отв. ред. д.г.-м.н. В.И. Лебедев – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2002. – С. 138–141.

9. Чупикова С.А. Сравнение фрактальных характеристик разломной тектоники и речной сети республики Тыва / О.Д. Аюнова, Ю.А. Калуш, С.А. Чупикова // Международная Конференция "Научные основы сохранения водосборных бассейнов: междисциплинарные подходы к управлению природными ресурсами" Улан-Удэ (Россия, Бурятия, Улан-Батор (Монголия), 2004 – С. 51–52

10. Чупикова С.А. Фрактальные свойства береговой линии озера Убсу-Нур и впадающих в него рек / В.М. Логинов, С.А. Чупикова // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества: Научн. тр. ТувИКОПР СО РАН / отв. ред. д.г.-м.н. В.И. Лебедев – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2001. – С. 134–138.

11. Чупикова С.А. Анализ фрактальной размерности речной системы бассейна Енисея с использованием теории порядка рек / В.М. Логинов, С.А. Чупикова // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества: Научн. тр. ТувИКОПР СО РАН /отв. ред. д.г.-м.н. В.И. Лебедев – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2002. – С. 138–141.