

УДК 551.248.2 (477.75)

PACS 91.55. Вc continental neotectonics

## ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОПОДОБИЯ СИСТЕМЫ ВОДОТОКОВ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© 2019 г. В.С. Захаров<sup>1,2\*</sup>, Д.А. Симонов<sup>1</sup>, Г.В. Брянцева<sup>1,2</sup>, Н.И. Косевич<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия<sup>2</sup>Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

\* e-mail: zakharov@geol.msu.ru

**Аннотация.** Проведено сопоставление результатов фрактального анализа восстановленной по цифровой модели рельефа гидросети и структурно-геоморфологического анализа рельефа для Керченского полуострова. По результатам структурно-геоморфологического анализа выделены три сектора, имеющие различное геоморфологическое выражение, и приуроченные к ним поднятия и впадины. При этом новейший структурный план не совпадает со структурным планом, развивавшимся до позднего плиоцена. По результатам структурно-геоморфологического анализа выделяются неотектонические структуры нескольких порядков. Выявлена связь величины фрактальной размерности  $D$  гидросети с направлением движений: поднятиям соответствуют большие, а опусканиям – меньшие значения. Это связано с тем, что в зонах неотектонических поднятий идет активная перестройка дренажной системы, формирование новых русел и долин, ветвление потоков. Усложнение характера речной сети проявляется в больших значениях фрактальной размерности  $D$ , которая является количественной мерой сложности объектов. При этом повышенные значения поля  $D$  коррелируют с достаточно крупными структурами первого порядка. Выявлена также подверженность результатов фрактального анализа масштабному эффекту и чувствительность к точности и масштабу данных, что необходимо учитывать при дальнейших исследованиях. Показана перспективность применения фрактального подхода для количественного анализа рисунка гидросети при исследовании новейших тектонических структур.

**Ключевые слова:** гидросеть, фрактальный анализ, структурная геоморфология, неотектоника, Керченский полуостров, самоподобие, цифровая модель рельефа.

<https://doi.org/10.21455/GPB2019.1-5>

**Цитирование:** Захаров В.С., Симонов Д.А., Брянцева Г.В., Косевич Н.И. Характеристики самоподобия системы водотоков Керченского полуострова и их сопоставление с результатами структурно-геоморфологического анализа // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 1. С. 50–60. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.1-5>

### ВВЕДЕНИЕ

Рисунок гидросети формируется под влиянием множества различных факторов, включающих в себя климатические и гидрологические факторы, особенности геологического строения и литологического состава пород, трещиноватости и т.д. Вместе с тем гидросеть является одним из наиболее чувствительных маркеров новейших и современных вертикальных тектонических движений, которые также оказывают значительное влияние на формирование ее рисунка.

Различными исследованиями [Федер, 1991; Turcotte, 1997; Pelletier, 1999; и др.] показано, что рисунок гидросети обладает выраженным свойством самоподобия в достаточно широком диапазоне масштабов. В указанных работах рассмотрены основные соотношения, связывающие ряд базовых характеристик бассейнов водостока: длину бассейна, площадь водосбора, рельеф бассейна, количества потоков определенного порядка, наклон вдоль потока, расход воды и площадь водосбора. Эти соотношения имеют степенной характер вида  $X \sim Y^q$  и т.п., где  $q$  – параметр самоподобия, что позволяет, помимо качественного анализа, исполь-

зовать и количественное описание особенностей гидросети на основе фрактального анализа.

*Фракталы* – объекты, которые обладают масштабной инвариантностью, или скейлингом, когда каждый элемент несет информацию в целом об объекте. Фрактальная геометрия занимается изучением свойств самоподобия, выражаемых степенными законами, что делает ее мощным средством для анализа огромного количества геологических и геоморфологических процессов и объектов, таких как эрозионные системы и речные сети, которые, как отмечено выше, также описываются законами подобного вида. Таким образом, фрактальный анализ может быть использован как дополнительный независимый количественный метод исследования в геоморфологии. Помимо того, что результаты фрактального анализа характеризуют сами водные и эрозионные системы, они сопоставляются с новейшими движениями, что позволяет использовать их в неотектонических исследованиях [Калуш и др., 2005; Dombradi et al., 2007; Мельник, Поздняков, 2007, 2008; Чутикова, 2010; Сидорчук, 2014].

Целью нашего исследования является сопоставление результатов фрактального анализа гидросети с новей-

шими тектоническими структурами, выявленными в результате применения известного и хорошо зарекомендовавшего себя структурно-геоморфологического анализа, разработанного Н.П. Костенко [Корчуганова и др., 2001].

Тестовым регионом выбран Керченский полуостров, современный рельеф которого начал формироваться с конца плиоцена [Макарова и др., 1994]. Литологический состав пород Керченского полуострова преимущественно терригенный, песчано-глинистый. Здесь распространены осадочные породы меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем общей мощностью до 5 км. Наиболее распространены отложения олигоцена – нижнего миоцена, известные как майкопская серия, мощностью до 3 км. Они представлены преимущественно бескарбонатными глинами с горизонтом песчаников в нижней части [Муратов, 1960] и перекрываются глинами, переслаивающимися с известняками, конгломератами, брекчиями среднего и верхнего миоцена мощностью до 550 м. Данные породы играют основную роль в формировании рельефа северо-востока полуострова.

### ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОСЕТИ

Как отмечено выше, между параметрами гидросети установлен целый ряд степенных зависимостей, характеризующихся своими показателями (подробнее см., например, в [Turcotte, 1997; Pelletier, 1999] и ссылки в этих работах). Важное место в теории фракталов занимает понятие фрактальной размерности  $D$ , которая является показателем в степенном законе вида

$$N \sim \delta^{-D}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – масштаб рассмотрения;  $N$  – количество элементов данного масштаба.

Фрактальная размерность показывает меру самоподобия рассматриваемой иерархической совокупности и степень сложности структуры. Мера подобия оценивается диапазоном масштабов, в котором выполняется однородный степенной закон, а относительная степень сложности определяется величиной фрактальной размерности. Например, у прямой или гладкой линии фрактальная размерность будет равна 1. Чем более «изломанным», или разветвленным, сложным будет объект на плоскости, тем ближе его размерность к 2. Для природных объектов, в том числе систем водотоков, характерна не целочисленная, а дробная размерность, принимающая значения в диапазоне от 1 до 2.

Для практического вычисления  $D$  часто используют метод подсчета клеток [Федер, 1991], в этом случае размерность носит название клеточной (box dimension). Для ее вычисления исследуемый объект покрывается клетками со стороной равной  $\delta$ , причем при каждом акте покрытия  $\delta$  изменяется, например в 2 раза, и подсчитывается число необходимых для этого клеток  $N$  при различных значениях  $\delta$  (рис. 1, а). Обычно строят график в двойном логарифмическом масштабе, а затем область скейлинга, т.е. диапазона значений  $\delta$ , для которого зависимость имеет вид (1), аппроксимируют прямой линией (рис. 1, б):

$$\lg N = -D \lg \delta + c, \quad (2)$$

угловой коэффициент которой является оценкой фрактальной размерности  $D$ ;  $c$  – постоянная.

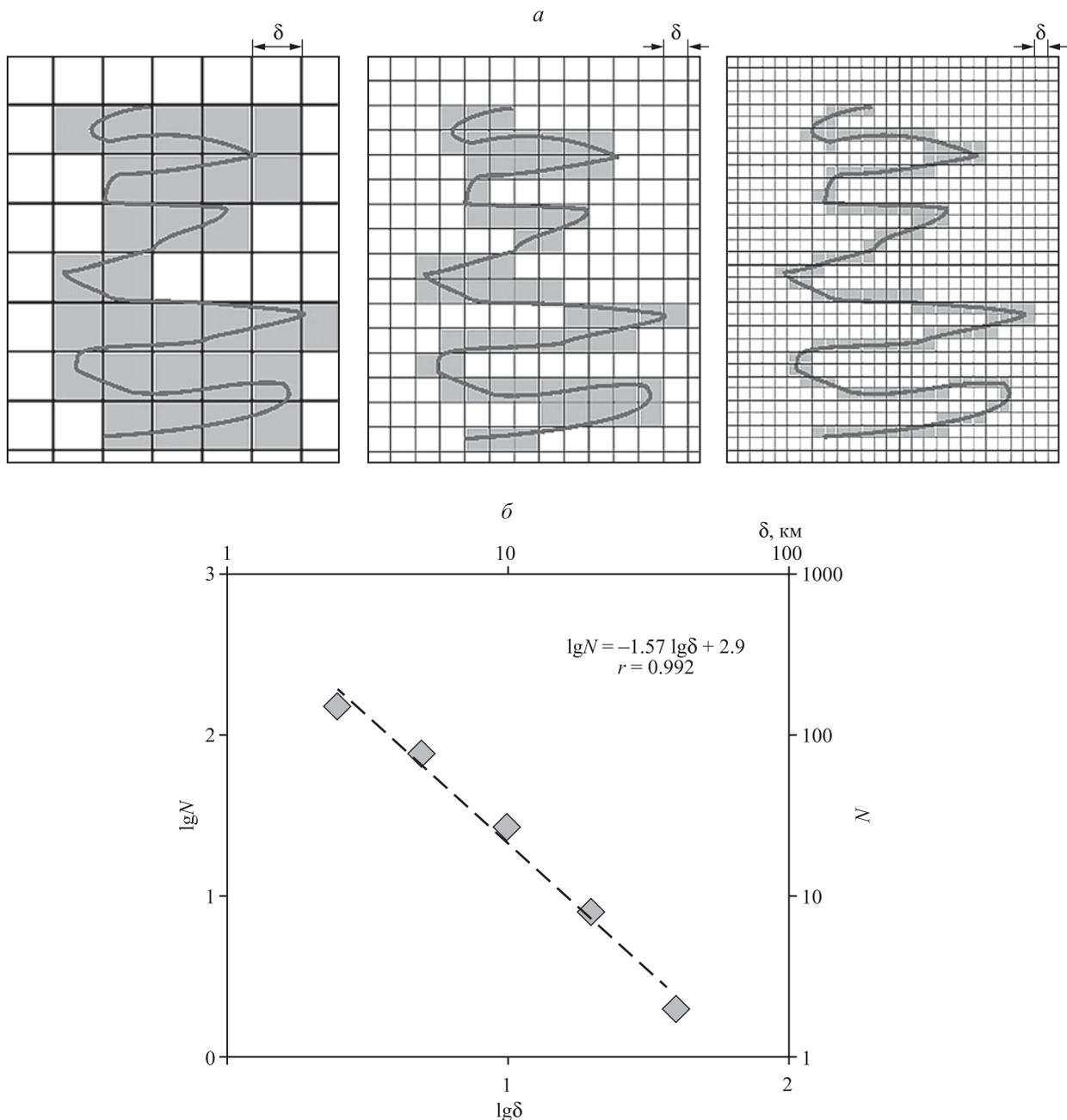
Отметим, что диапазон размеров окна при фрактальном анализе для надежного определения  $D$  должен быть не меньше порядка 1. В нашей работе мы используем именно этот вид размерности. На рис. 1, б приведен пример такого построения для всего района исследования – Керченского полуострова – в диапазоне масштабов 40–2.5 км,  $D = 1.57 \pm 0.11$ .

Анализ самоподобия речных и эрозионных систем в последние годы находит все большее применение. Так, в глобальной по охвату статье [Сидорчук, 2014] проведен анализ фрактальных размерностей речных сетей более чем 200 бассейнов крупных рек Северной Евразии. Установлено, что фрактальная размерность тесно связана с плотностью гидросети. Показано, что на территории бывш. СССР фрактальная размерность речных сетей изменяется в диапазоне 1.1–1.7. Кроме того, выявлено, что у речных сетей (как и у большинства природных объектов и систем) нет полного самоподобия: оно всегда ограничено некоторым диапазоном масштабов, и, кроме того, фрактальная размерность меняется с изменением масштаба рассмотрения. В указанной работе использован диапазон масштабов порядка 1 – первые десятки километров. Этот же важный аспект отмечен в работах [Мельник, Поздняков, 2007, 2008], где показано, что существуют пределы масштабной инвариантности конкретных рассматриваемых объектов и только в задаваемых ими границах можно производить анализ (и сопоставление), не теряя и не искажая информацию.

В работах [Dombradi et al., 2007; Чутикова, 2010; Сидорчук, 2014] для разных регионов (Северная Евразия [Сидорчук, 2014], Тува [Чутикова, 2010], Карпатско-Паннонский регион [Dombradi et al., 2007]) выявлена важная закономерность, а именно, тенденция к общему увеличению фрактальной размерности гидросети с высотой рельефа. Важные результаты получены также при сопоставлении фрактальных характеристик речной сети с интенсивностью и направлением вертикальных движений в [Dombradi et al., 2007; Мельник, Поздняков, 2007, 2008]: структуры, испытывающие поднятие, в целом характеризуются большими значениями фрактальной размерности, а опускающиеся структуры – меньшими. Выявляется определенная корреляция между фрактальными характеристиками речных сетей и активных разломов [Чутикова, 2010]. Геотектонические процессы, обуславливающие разломообразование земной поверхности, являются одним из важнейших факторов формирования долинных систем.

Кроме неотектонических и современных движений, на значение фрактальной размерности, несомненно, влияют литология и различия в эрозионной (абразионной) устойчивости пород. Однако относительно степени их влияния мнения расходятся. По мнению [Dombradi et al., 2007], именно тектонические движения главным образом влияют на  $D$ , а вклад литологических характеристик менее значим, в то время как в работах [Мельник, Поздняков, 2007, 2008] вклад обоих факторов полагается сопоставимым.

Выявлена также зависимость значения показателя фрактальной размерности речной сети (для однородных орографических единиц), расположенных в различных природно-климатических условиях: для влаж-



**Рис. 1.** К методике вычисления фрактальной размерности

*а* – процедура покрытия объекта клетками разного размера и подсчет количества клеток  $N$ ; *б* – построение зависимости  $N(\delta)$  и оценка фрактальной размерности по соотношению (2) для гидросети Керченского полуострова ( $D = 1.57 \pm 0.11$ )

ных условий фрактальная размерность больше, для сухих – меньше [Чутикова, 2010; Сидорчук, 2014].

Таким образом, установлено, что фрактальный подход существенно увеличивает возможности количественного описания речных и эрозионно-русловых сетей. В то же время существуют значительные неопределенности при применении данного вида анализа, в том числе в методическом плане, при выборе масштабов рассмотрения и установления корреляции с неотектоникой, что делает работу в этом направлении весьма важной и актуальной.

Для нашего района исследований (Керченский полуостров) значение фрактальной размерности речных сетей согласно работе [Сидорчук, 2014] составляет 1.21, однако в силу глобального масштаба анализа в указан-

ной работе вариации этого показателя внутри района не установлены. На выявление этих особенностей и направлено наше исследование.

#### ПОСТРОЕНИЕ СЕТИ ВОДОТОКОВ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Поскольку собственно речная сеть на Керченском полуострове развита слабо, но зато широко развита сеть сухих водотоков и балок, сеть водотоков, использовавшихся для фрактального анализа гидросети, была построена по цифровой модели рельефа SRTM в масштабе 1 : 200 000 с использованием алгоритмов, применяемых в большинстве ГИС-пакетов. В нашем случае была использована демонстрационная версия ArcMap.

В данном программном продукте применен наиболее распространенный алгоритм, описанный С. Дженсоном и Дж. Домиником в работе, посвященной выделению топографических структур по цифровым высотным моделям [Jenson, Domingue, 1988]. Указанная методика выделения водотоков основана на выявлении направления стока в элементарных ячейках раstra согласно так называемой модели восьминаправленного стока, когда из восьми возможных направлений стока из ячейки выбирается направление с наибольшим значением градиента. Затем проводится определение величины аккумуляции стока или суммарного стока для каждой ячейки раstra и отсечение пороговых значений. Фактически величина суммарного стока определяется как количество ячеек вверх по уклону, с которых осуществляется сток в каждую ячейку. Поскольку разрешение цифровой модели известно, то, отсекая пороговые значения минимального количества ячеек суммарного стока, определяется минимальный размер водосборного бассейна для выделяемых водотоков. Локальные понижения при построении гидросети заполнялись полностью, что приводит к тому, что некоторое количество водотоков в пределах этих впадин было построено некорректно, однако количество таких водотоков не превышает 1 %.

Таким образом, при анализе рассматривались не только постоянные водотоки, но все водотоки, в том числе временные и сухие, водосборный бассейн которых не менее 250–300 тыс. м<sup>2</sup> (рис. 2). Кроме этого, следует отметить, что построенная гидросеть располагается ниже остаточного рельефа, обусловленного в данном регионе не только современными вертикальными движениями, но в значительной мере литологиче-

ским составом пород. То есть при дальнейшем анализе этой гидросети исключаются наиболее мелкие структуры, связанные с остаточным рельефом.

#### ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОСЕТИ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

В нашей работе при проведении фрактального анализа водотоков каждый участок русла считался линейным объектом, не имеющим поперечного размера и структуры. Выше (см. рис. 1, б) уже приводились результаты оценки фрактальной размерности  $D$  гидросети для всего Керченского полуострова. Для выявления пространственных особенностей вариации  $D$  проводился ее расчет по соотношению (2) клеточным методом в скользящем окне с помощью авторской программы FrAnGeo [Захаров, 2011]. Поскольку при выборе максимального окна осреднения, как было указано выше, имеют значение масштаб и размер изучаемой области, было проведено два варианта расчета распределения фрактальной размерности. Сначала проводился анализ максимального окна осреднения, обусловленного размером изучаемой области и детальностью данных. Такой выбор максимального окна позволяет добиться осреднения фрактальной размерности и разрешения результатов для выявления основных особенностей вариации фрактальной размерности для области. Размер окна в этом случае составлял 24×24 км, перекрытие – 12 км, диапазон размеров клеток, которые использованы при вычислении – от 24 до 1.6 км. Выбор параметров окна здесь обусловлен следующими факторами: максимальный размер скользящего окна должен быть таким, чтобы обеспечить достаточное количество ячеек, в которых производятся вычисления, для того что-

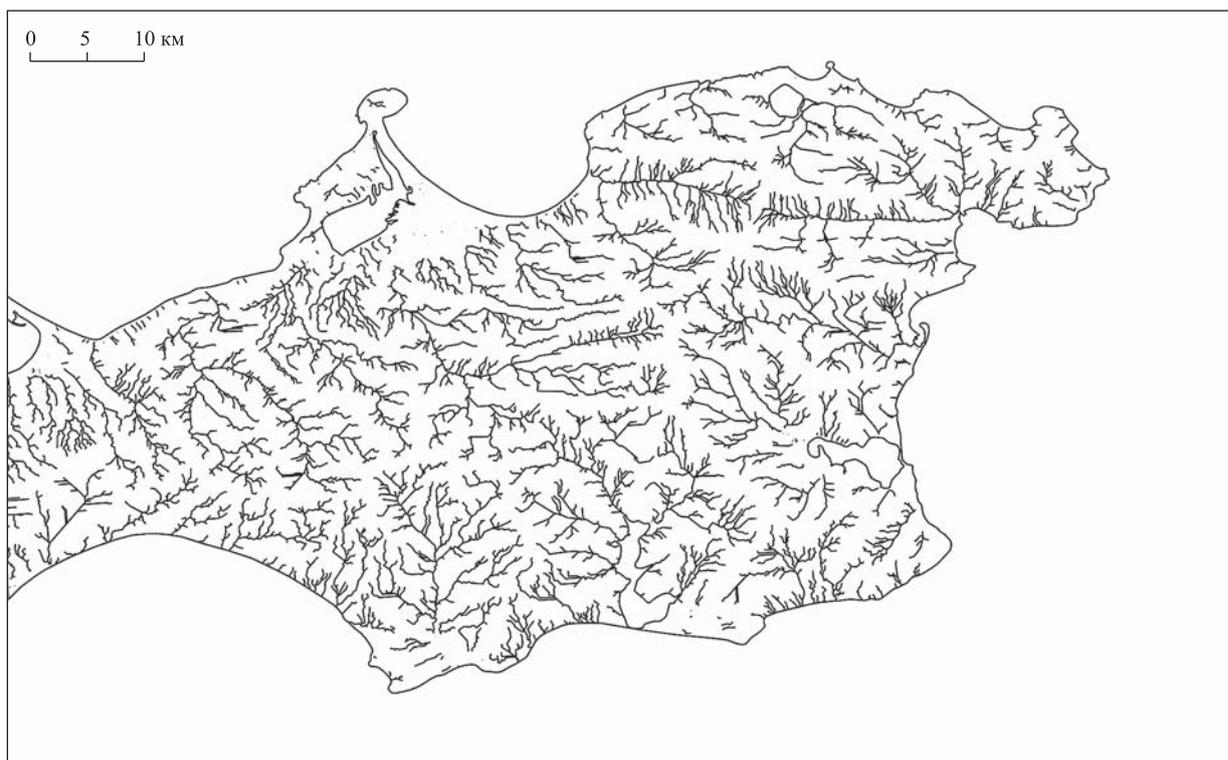
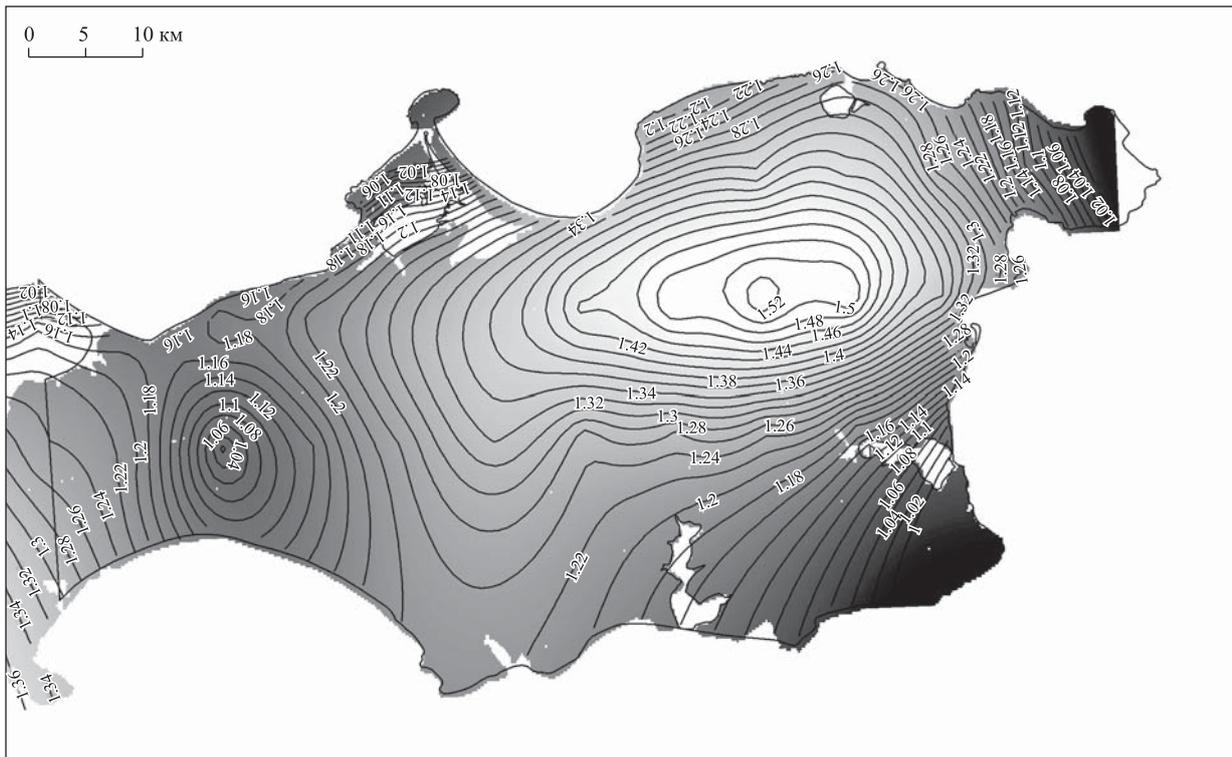
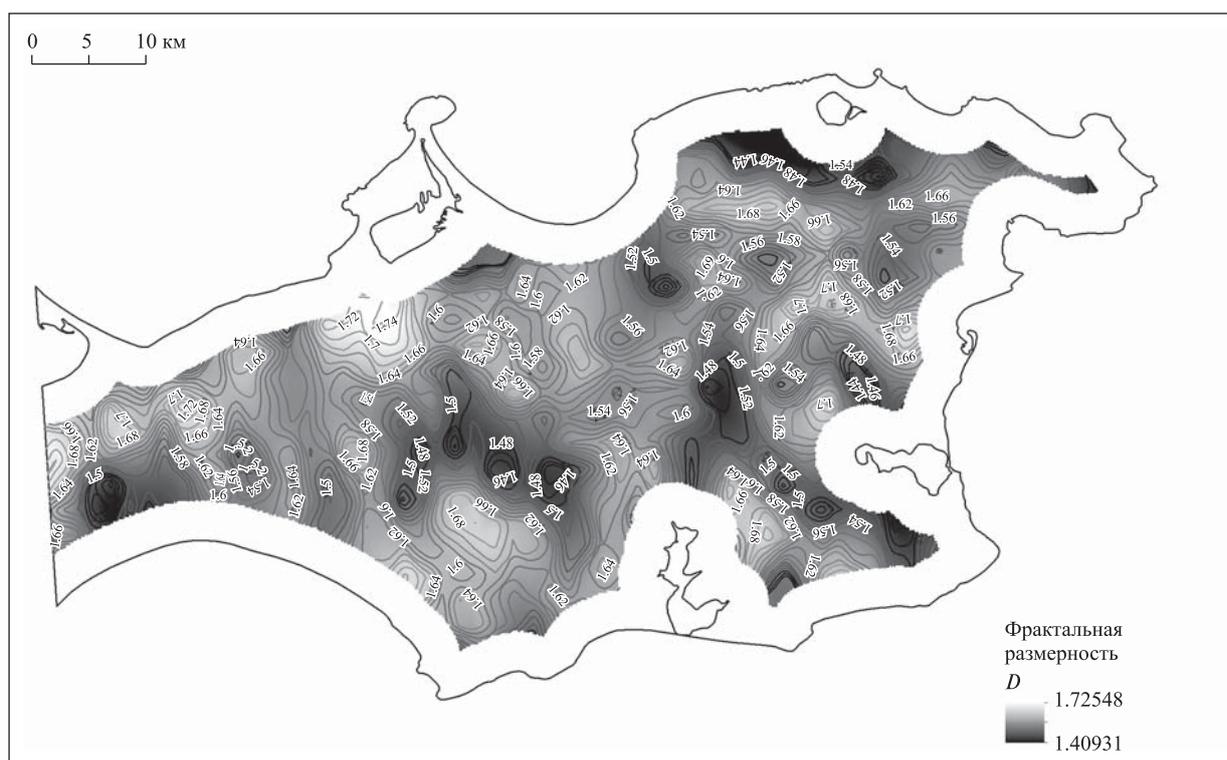


Рис. 2. Гидросеть Керченского полуострова, восстановленная по цифровой модели рельефа





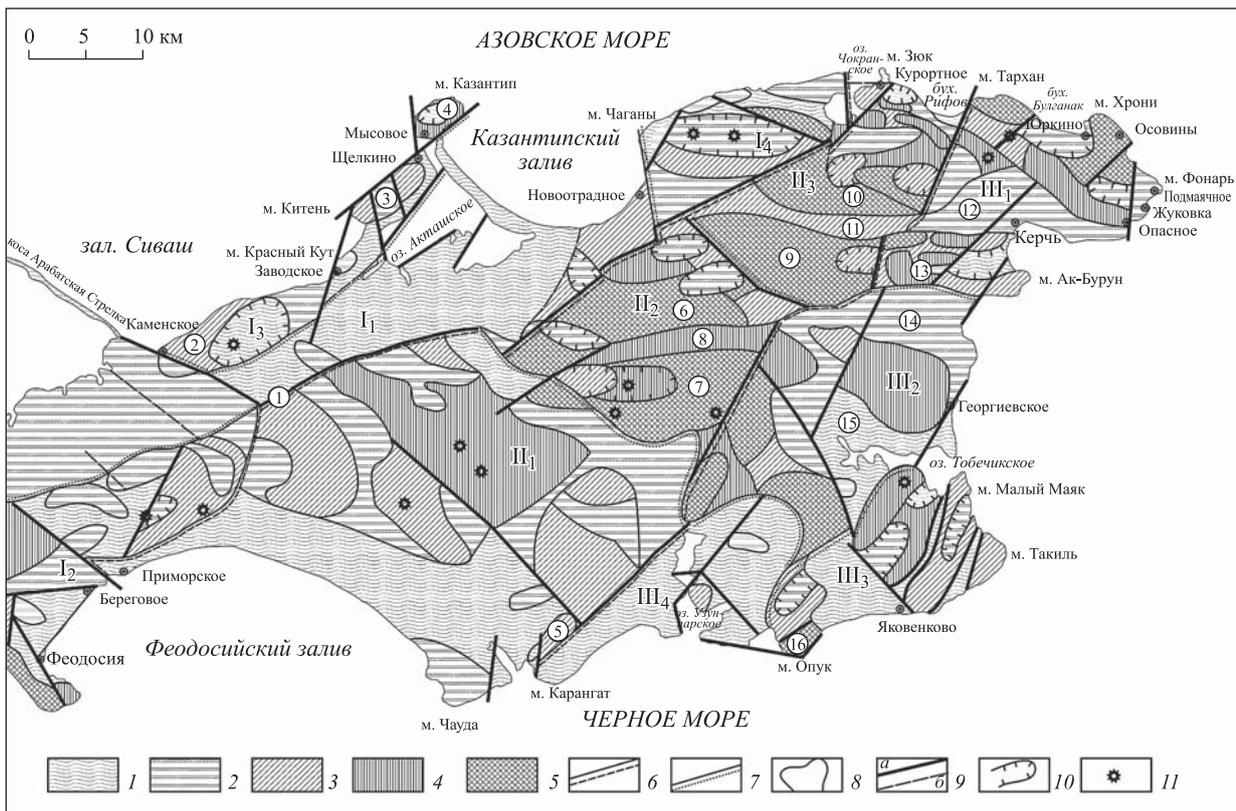
**Рис. 4.** Результаты вычисления фрактальной размерности речных сетей Керченского полуострова  $D$ , рассчитанной в скользящем окне в диапазоне размеров 4–0.16 км

отложений значительной мощности; Арма-Элинское поднятие ( $I_2$ ), образованное несколькими возвышенностями субширотного и северо-восточного простираний с высотами 45–60 м; Каменско-Казантипское поднятие ( $I_3$ ), протягивающееся вдоль берега Азовского моря и включающее в себя структуры третьего порядка: Каменский (2), Белокаменский (3) и Мысовой (4) хребты, которые хорошо выражены в рельефе за счет литологического фактора, а также субширотное Караларское поднятие ( $I_4$ ) с суммарными конэрозионными поднятиями до 100 м и располагающейся в центральной части впадиной, наследующей вдавленную синклиналь с майкопскими глинами.

*Центральный сектор* (II) представляет собой протягивающуюся с юго-запада на северо-восток структуру первого порядка, ширина которой значительно меняется по простиранию. В ее пределах можно выделить несколько поднятий – структур меньших порядков, которые подразделяются широкими балками. Древние балки верхнеплейстоценового возраста – глубокие, протяженные, значительно разветвленные чаще всего субмеридионального простирания. Молодые балки голоценового возраста, длина которых не превышает 6–8 км, с крутыми склонами и плоским дном имеют преимущественно субширотное СЗ и ЗСЗ простирание. Джау-Тепское поднятие ( $II_1$ ) образовано отдельными возвышенностями с высотами, редко достигающими 100 м. Самая крупная возвышенность – расположенный на юге Дюрменский хребет (5). Слюсаревско-Новошепетеевское поднятие ( $II_2$ ) представлено Слюсаревским (6), Новошепетеевским (7) и другими более мелкими хребтами СВ простирания и разделяющей их Ленинской впадиной (8). Суммарные конэрозионные

поднятия хребтов достигают 170 м. Новониколаевско-Тарханское поднятие ( $II_3$ ) состоит из практически субширотно протягивающихся Новониколаевского (9) и Бурашского (10) хребтов, подразделяющихся впадинами разного размера, в том числе Багеровской (11).

*Юго-восточный сектор* (III), расположенный в пределах Керченско-Таманского поперечного прогиба, имеет сложное строение. Внутри этой структуры первого порядка можно выделить несколько более мелких структур второго порядка. Булганак-Осовинские поднятия ( $III_1$ ) представлены серией кулисообразных хребтов, в том числе Восходовским (13), с разделяющими их впадинами, наследующими вдавленные синклинали. Керченская впадина (12) является продолжением Багеровской и имеет практически субширотное простирание. Эти впадины наследуют Керченскую синклиналь и разделяются разломом СВ простирания. Ширина Керченской впадины меняется от 1 км в центральной части до 4–5 км на побережье. Тобечикские поднятия ( $III_2$ ) представляют собой систему невысоких (до 100 м), имеющих СЗ простирание хребтов с пологими склонами, постепенно переходящими во впадины – Арцишевскую (14), заложенную по Камыш-Бурунской синклинали, и Тобечикскую (15), приуроченную к Эльтиген-Ортельской синклинали. Такильские поднятия ( $III_3$ ) образованы системой хребтов СВ простирания и часто ограничены согласными разрывными нарушениями. Один из них – Опукский хребет (16) – является самым высоким на Керченском полуострове, его суммарные конэрозионные поднятия достигают 160–180 м. Узунларская равнина ( $III_4$ ) с небольшими возвышенностями вдоль восточного берега одноименного озера имеет высоты, не превышающие 30 м.



**Рис. 5.** Структурно-геоморфологическая схема Керченского полуострова

1–5 – суммарные конэрозионные поднятия, м: 1 – менее 30; 2 – 31–60; 3 – 61–90; 4 – 91–120; 5 – более 121; 6 – границы структур первого порядка; 7 – границы структур второго и более мелких порядков; 8 – границы отдельных хребтов и впадин; 9 – разрывы и зоны трещиноватости (а – достоверные, б – предполагаемые); 10 – впадины, наследующие вдавненные синклинали и выраженные в рельефе; 11 – наиболее крупные грязевые вулканы. Цифрами обозначены: I – Северо-Западная структура первого порядка: I<sub>1</sub> – Акташская впадина (1 – Парапачский хребет), I<sub>2</sub> – Арма-Элинское поднятие; I<sub>3</sub> – Каменско-Казантипское поднятие (хребты: 2 – Каменский, 3 – Белокаменский, 4 – Мысовой); I<sub>4</sub> – Каларарское поднятие; II – Центральная структура первого порядка: II<sub>1</sub> – Джау-Тепское поднятие (5 – Дюрменский хребет); II<sub>2</sub> – Слюсаревско-Новошепетеевское поднятие (хребты: 6 – Слюсаревский, 7 – Новошепетеевский; 8 – Ленинская впадина); II<sub>3</sub> – Новониколаевско-Тарханское поднятие (хребты: 9 – Ново-Николаевский, 10 – Бурашский, 11 – Багеровская впадина); III – Юго-восточная структура первого порядка: III<sub>1</sub> – Булганак-Осовинские поднятия (12 – Керченская впадина, 13 – Восходовский хребет); III<sub>2</sub> – Тобечикские поднятия (14 – Арцишевская впадина, 15 – Тобечикская впадина); III<sub>3</sub> – Такильские поднятия (16 – Опукский хребет); III<sub>4</sub> – Узунларская равнина

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА СО СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СХемой

Сопоставление результатов фрактального анализа, проведенного с указанными выше параметрами, со структурно-геоморфологической схемой показывает (рис. 6), что максимумы фрактальной размерности гидросети в целом коррелируют с наиболее крупными структурами первого порядка, выделяемых по результатам структурно-геоморфологического анализа.

Некоторое смещение максимумов и минимумов поля  $D$  относительно структур, особенно имеющих небольшие размеры (узких впадин и поднятий) объясняется «размазыванием» значений при осреднении в скользящем окне. Вероятно, необходимо совершенствование инструмента анализа, однако тут существуют проблемы, связанные с точностью и детальностью исходных данных. Несмотря на то что примененный подход к выбору максимального окна осреднения является обоснованным конкретно для выбранного объекта исследований, он имеет значительный недостаток, обусловленный

ролью краевых эффектов, связанных с наличием береговой линии. Отсутствие гидросети в море оказывает существенное влияние на значение  $D$  для тех клеток, которые попадают на границу моря и суши. Поэтому значения  $D$  для ячеек, находящихся на расстоянии половины размера максимального окна от береговой линии, нельзя считать вполне достоверными. Поскольку при данных параметрах это расстояние составляет порядка 12 км, не представляется возможным точно определить, связаны полученные максимумы фрактальной размерности с особенностями рисунка гидросети или они в значительной мере обусловлены краевыми эффектами.

В связи с этим нами проводился более детальный анализ самоподобия речной сети в диапазоне масштабов 4–1.6 км (см. рис. 4). Анализ и сопоставление полученного при таких параметрах поля фрактальной размерности со структурно-геоморфологической схемой показало, что оно в целом коррелирует с более молодыми новейшими тектоническими поднятиями второго порядка (рис. 7). Однако при заданных параметрах осреднения эта корреляция имеет более сложный характер: к

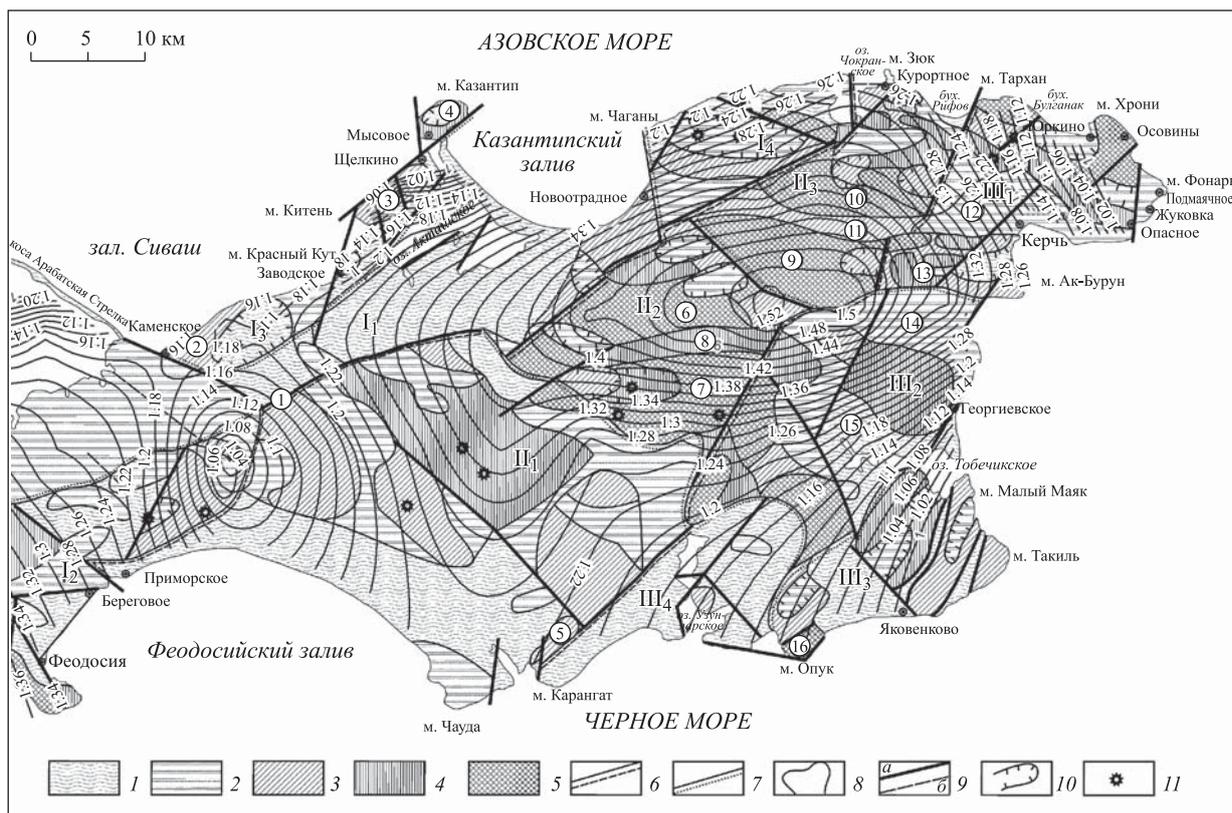


Рис. 6. Сопоставление результатов фрактального анализа, проведенного в диапазоне размеров 24–1.6 км, и структурно-геоморфологической схемы Керченского полуострова

Усл. обозн. те же, что на рис. 5

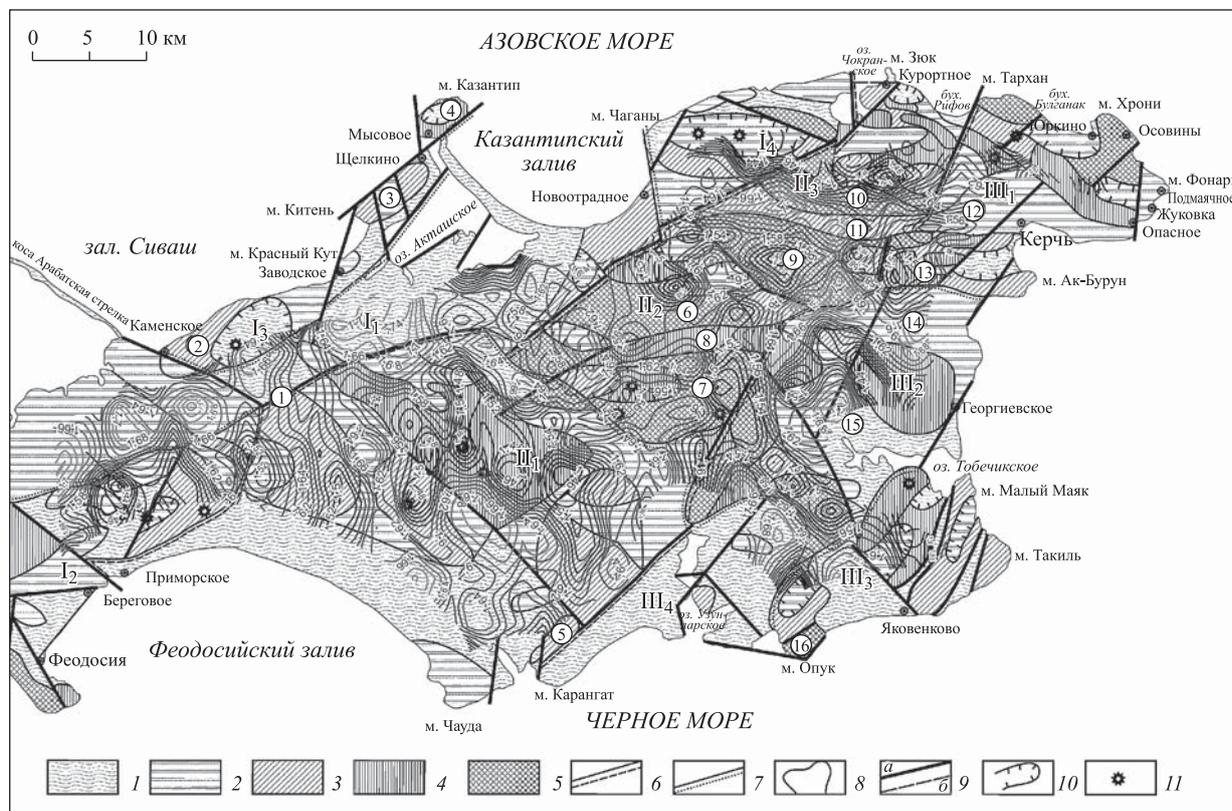


Рис. 7. Сопоставление результатов фрактального анализа, проведенного в диапазоне размеров 4–0.16 км, и структурно-геоморфологической схемы Керченского полуострова

Усл. обозн. те же, что на рис. 5

поднятиям, если они не осложнены вдобавок структурами третьего и больших порядков (как, например, Слюсаревско-Новошепетеевское поднятие, осложненное Слюсаревским и Новошепетеевским хребтами, а также Ленинской впадиной третьего порядка), приурочены минимумы поля  $D$ , а к впадинам – максимумы. Если же структуры второго порядка осложнены структурами третьего порядка, то поле  $D$  становится более сложным. Следует отметить, что впадины не обязательно являются зонами новейших опусканий. Так, в изучаемом районе такие впадины часто либо наследуют вдавленные синклинали, находящиеся в условиях новейшего поднятия, либо развиваются как антецедентные долины в пределах более крупных поднятий.

Проявление минимумов поля  $D$  в пределах поднятий, вероятнее всего, является масштабным эффектом. Действительно, в пределах водоразделов плотность гидросети выбранного масштаба понижается независимо от того, находится выбранная область в состоянии поднятия или опускания. Вынужденно выбранный нами размер окна осреднения не позволяет компенсировать этот масштабный эффект данных, однако корреляция между новейшими поднятиями и фрактальной размерностью гидросети сохраняется, хотя и носит несколько парадоксальный характер. Последнее следует учитывать в дальнейшем при использовании методов фрактального анализа для оценки новейших движений.

Отметим также, что различные значения фрактальной размерности на разных масштабах рассмотрения могут быть свидетельством (и количественным выражением) различных процессов, наиболее активно проявляющихся на этих масштабных уровнях, что также нуждается в дальнейшем изучении.

В целом по результатам нашей работы можно утверждать, что фрактальный подход существенно увеличивает возможности количественного описания параметров гидросети при анализе новейших движений. В данном исследовании в фрактальный анализ был включен только один из параметров гидросети – ее плотность. При этом, несмотря на возникающие масштабные эффекты, опыт такого анализа можно считать успешным и дальнейшие исследования с включением иных параметров гидросети, таких как частота смены порядков, длина водотоков разных порядков, количество порядков водотоков и др., – перспективными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В пределах Керченского полуострова проведен фрактальный анализ построенной по цифровой модели рельефа гидросети с использованием разных диапазонов масштабов. Выявлены локальные вариации величины фрактальной размерности в диапазоне от 1 до 1.53.

2. По результатам структурно-геоморфологического анализа для Керченского полуострова выделяются три сектора, коррелирующие с наиболее древними и крупными неотектоническими структурами первого порядка и имеющие различное геоморфологическое выражение, и приуроченные к ним поднятия и впадины определенных направлений и выраженности. При этом новейший структурный план не совпадает со структурным планом, развивавшимся до позднего плиоцена. Выделяются неотектонические структуры нескольких порядков.

3. Сопоставление результатов структурно-геоморфологического и фрактального анализов показало, что

между ними есть корреляция. Для больших (порядка 10 км) размеров окон осреднения подтверждается установленная другими авторами связь величины фрактальной размерности гидросети с направлением движений: поднятиям соответствуют большие значения  $D$ , что можно объяснить тем, что в зонах неотектонических поднятий идет активная перестройка дренажной системы, формирование новых русел и долин, ветвление потоков. Усложнение характера речной сети проявляется в значениях фрактальной размерности  $D$ , которая является количественной мерой сложности объектов. При этом повышенные значения поля  $D$  коррелируют с достаточно крупными структурами. Подобная корреляция в целом соответствует результатам, полученным в работах других авторов [Мельник, Поздняков, 2007; Dombradi et al., 2007; Сидорчук, 2014].

4. В результате анализа также выявлено, что фрактальный анализ подвержен масштабному эффекту. Для окон осреднения меньшего (менее 10 км) размера выявляется корреляция со структурами меньшего масштаба, причем если масштаб анализируемой гидросети не меняется, то поднятиям соответствуют минимумы поля фрактальной размерности, а впадинам – максимумы. Это является масштабным эффектом данных, что необходимо учитывать при дальнейшей разработке метода.

В целом проведенное исследование показало перспективность применения фрактального подхода для количественного анализа рисунка гидросети при исследовании новейших движений. Анализ одного параметра гидросети, ее плотности, хотя и показал удовлетворительные результаты, но является недостаточным, а результаты чувствительны к точности и масштабу данных. Поэтому необходима дальнейшая доработка метода с включением в комплексный анализ и других параметров гидросети, например ветвления.

### ЛИТЕРАТУРА

- Геология СССР. Т. 8. Крым. Ч. I. Геологическое описание / Ред. М.В. Муратов. М.: Недра, 1969. 576 с.
- Грязевые вулканы Керченско-Таманской области: Атлас / Е.Ф. Шнюков, Ю.В. Соболевский, Г.И. Гнатенко, П.И. Науменко, В.А. Кутний. Киев: Наук. думка, 1986. 152 с.
- Захаров В.С. Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 6. С. 10–17.
- Калуш Ю.А., Логинов В.М., Чуликова С.А. Использование технологий ГИС при анализе фрактальных характеристик речной сети Тувы // Геоинформатика. 2005. № 4. С. 31–40.
- Корчуганова Н.И., Костенко Н.П., Межеловский Н.Н. Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. М., 2001. 212 с. (МПР РФ геокарт. МГТА).
- Макарова Н.В., Макаров В.И. Четвертичная тектоническая зональность Керченского полуострова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1994. № 4. С. 20–33.
- Мельник М.А., Поздняков А.В. Фрактальный анализ эрозионного расчлененного рельефа: Методологические подходы // Вестн. Том. гос. ун-та. 2007. № 301. С. 201–205.
- Мельник М.А., Поздняков А.В. Фракталы в эрозионном расчленении поверхности и автоколебания в динамике геоморфосистем // Геоморфология. 2008. № 3. С. 86–95.
- Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 207 с.
- Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. № 1. С. 3–14.

- Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
- Чуликова С.А. Фрактальные методы выявления скрытой регулярности в эрозионном расчленении поверхности (на примере анализа Саяно-Тувинского нагорья, Республика Тува): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2010. 16 с.
- Dombradi E., Timar G., Bada G., Cloetingh S., Horvath F. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian-Pannonian system // *Global and Planet. Change*. 2007. V. 58. P. 197–213.
- Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // *Photogram. Eng. and Remote Sensing*. 1988. V. 54, N 11. P. 1593–1600.
- Pelletier J.D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // *J. of Geophys. Res.* 1999. V. 104. B4. P. 7359–7375.
- Turcotte D.L. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.

## Сведения об авторах

**ЗАХАРОВ Владимир Сергеевич** – доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; профессор, Государственный университет «Дубна». 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19. Тел.: +7 (495) 939-25-51. E-mail: zakharov@geol.msu.ru

**СИМОНОВ Дмитрий Андреевич** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (495) 939-25-51. E-mail: dsim\_0@mail.ru

**БРЯНЦЕВА Галина Владимировна** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; доцент, Государственный университет «Дубна». 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19. Тел.: +7 (495) 939-20-81. E-mail: bryan.bryan@yandex.ru

**КОСЕВИЧ Наталья Игоревна** – кандидат географических наук, ассистент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (495) 939-25-51. E-mail: nkosevich@gmail.com

## SELF-SIMILARITY PARAMETERS OF THE KERCH PENINSULA WATER STREAMS SYSTEM AND THEIR COMPARISON WITH THE RESULTS OF STRUCTURAL AND GEOMORPHOLOGICAL ANALYSIS

© 2019 V.S. Zakharov<sup>1,2\*</sup>, D.A. Simonov<sup>1</sup>, G.V. Bryantseva<sup>1,2</sup>, N.I. Kosevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> State University «Dubna», Dubna, Moscow Region, Russia

\* e-mail: zakharov@geol.msu.ru

**Abstract.** A fractal analysis of the hydrological network relief constructed using a digital model was carried out within the bounds Kerch Peninsula using different ranges of scales. As a result, local variations in the fractal dimension ranging from one to 1.53 were revealed. Structural-geomorphological analysis of this territory allowed identifying the newest structures of different orders. Comparison of the results of structural-geomorphological and fractal analyzes showed correlation between them. For larger (about 10 km) averaging windows, the relationship, determined by other authors, between the value of the hydrological network fractal dimension and the direction of movements is confirmed: higher values of D correspond to the uplifts, and smaller ones correspond to the depressions. This correlation is due to the fact that within the zones of neotectonic uplifts active rebuilding the drainage system, formation of new channels and valleys, and branching of the streams take place. Our essay also revealed that fractal analysis is subjected to the effect of scale. For averaging windows of a smaller (less than 10 km) size a correlation with structures of a smaller scale is revealed. If the scale of the analyzed hydrological network does not change, the minima of the fractal-dimensional field correspond to the uplifts, and the maxima – to the valleys. This is a scale-effect of the data, which must be taken into account in the further method development. On general, the study showed the prospects of the fractal approach application for the quantitative analysis of the hydrological network pattern during investigation of the latest movements.

**Keywords:** hydrological network, self-similarity, fractal analysis, structural geomorphology, neotectonics, Kerch Peninsula, digital relief model.

*About the authors*

**ZAKHAROV Vladimir S.** – Dr. Sci. (Geol. and Min.), associate professor, professor, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia; professor, State University «Dubna». Dubna, Moscow Region, Russia. Tel.: +7 (495) 939-25-51. E-mail: zakharov@geol.msu.ru

**SIMONOV Dmitry A.** – Cand. Sci. (Geol. and Min.), senior researcher, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 939-25-51. E-mail: dsim\_0@mail.ru

**BRYANTSEVA Galina V.** – Cand. Sci. (Geol. and Min.), docent, associate professor of Dynamic Geology, geological faculty, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia; associate professor, State University «Dubna». Dubna, Moscow Region, Russia. Tel.: +7 (495) 939-20-81. E-mail: bryan.bryan@yandex.ru

**KOSEVICH Natalia I.** – Cand. Sci. (Geogr.), assistant, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 939-25-51. E-mail: nkosevich@gmail.com

**Cite this article as:** Zakharov V.S., Simonov D.A., Bryantseva G.V., Kosevich N.I. Self-similarity parameters of the Kerch Peninsula water streams system and their comparison with the results of structural and geomorphological analysis, *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2019, vol. 18, no. 1, pp. 50–60 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2019.1-5>

**English version:** *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55, iss. 7. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). URL: <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>