

УДК 551.248.2 (477.75)

Д.А. Симонов¹, В.С. Захаров², Г.В. Брянцева³

КОМПЛЕКСНЫЙ СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ, СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ И ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НОВЕЙШИХ ДВИЖЕНИЙ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

ГБОУ ВМОУ Университет «Дубна», 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

University "Dubna", 141980, MO, Dubna, University st., 19

Для Керченского полуострова был выполнен комплексный анализ с применением морфоструктурного, структурно-геоморфологического методов и определения фрактальной размерности D гидросети. Выявлено, что повышенные значения поля фрактальной размерности D хорошо коррелируют с суммарной амплитудой воздымания за плейстоцен и голоцен и хуже с новейшими структурами, сформировавшимися за конэрозионный этап развития. Можно заключить, что фрактальный подход для количественного анализа рисунка гидросети дает хорошие результаты при выявлении новейших движений и менее результативен для выявления новейших структур. Перспективна дальнейшая разработка метода фрактального анализа с обязательным включением в него других параметров гидросети, широко используемых при структурно-геоморфологическом анализе.

Ключевые слова: неотектоника, фракталы, морфометрия, структурная геоморфология, гидросеть, Керченский полуостров.

A comprehensive analysis was carried out for the Kerch Peninsula using morphostructural, structural and geomorphological methods as well as determining the fractal dimension D of the driangle system. It has been discovered that increased values of the field of fractal dimension D correlate well with the total uplift amplitude during the Pleistocene and Holocene, and worse with the latest structures formed during the conerosion stage of development. It can be concluded that the fractal approach for the quantitative analysis of the driangle system pattern gives good results in identifying the latest movements, and is less effective in identifying the latest structures. The further development of the fractal analysis method is promising, with the inclusion of other driangle system parameters widely used in structural-geomorphological analysis.

Key words: neotectonics, fractals, morphometry, structural geomorphology, driangle system, Kerch Peninsula.

Введение. Новейшие тектонические движения неразрывным образом связаны с формированием рельефа поверхности земли и развитием гидросети. Существует множество методов исследования и выделения новейших структур. Один из известных методов структурной геоморфологии — метод, разработанный Н.П. Костенко [Корчуганова, Костенко и др., 2001], но он предполагает выявление новейших деформаций и их суммарных поднятий за весь конэрозионный этап развития. С помощью другого метода — структурно-морфометрического, который разработан М.Ф. Философовым [Философов, 1975], можно рассматривать новейшие структуры во времени. Стадийность новейших тектонических движений возможно определить

на основании предположения о том, что водотоки высших порядков развиваются длительное время и отражают алгебраическую сумму движений за промежуток от их заложения до настоящего времени, тогда как водотоки низших порядков отражают неотектонические движения за меньший промежуток времени и более молодые, чем водотоки высших порядков. Таким образом, в результате комплексного анализа базисных поверхностей разных порядков можно проследить стадии развития рельефа, что в свою очередь отражает эволюцию роста выраженных в рельефе новейших структур.

Гидросеть представляет собой наиболее чувствительный маркер новейших вертикальных тектонических движений, которые значительно

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ст. н. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: dsim_0@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии; университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: zakharov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, университет «Дубна», кафедра экологии и наук о Земле, доцент, канд. геол.-минер. н.; e-mail: bryan.bryan@yandex.ru

вливают не только на формирование рельефа, но и на рисунок гидросети. Определенная сложность связана с тем, что водотоки формируются под влиянием множества разнообразных процессов, включающих климатические и гидрологические факторы, особенности геологического строения, состав пород, трещиноватость и т.д. Анализ рисунка гидросети достаточно широко используется при определении направленности новейших тектонических движений, однако в настоящее время такой анализ проводится в основном качественно.

Ряд исследователей [Федер, 1991; Turcotte, 1997] показали, что рисунок гидросети обладает выраженным свойством самоподобия в относительно широком диапазоне масштаба, что позволяет помимо качественного анализа использовать и количественное описание особенностей сети водотоков на основе фрактального анализа, что может быть использовано в качестве одного из вспомогательных методов исследования новейших движений. Фрактальная геометрия занимается изучением свойств самоподобия, выражаемых степенными законами, что делает ее мощным средством для анализа огромного количества геологических и геоморфологических процессов и объектов, в том числе таких, как эрозионные системы и гидросети, описываемых также степенными законами [Федер, 1991; Turcotte, 1997; Pelletier, 1999]. Несмотря на то что в настоящее время фрактальному подходу в геологии уделяется все большее внимание [Donadio et al., 2015; Fac-Beneda, 2013], его возможности при анализе новейших тектонических движений изучены еще недостаточно. Представляется, что развитие этого направления может способствовать разработке и совершенствованию методов автоматического компьютерного анализа новейших тектонических движений.

Цель наших исследований — комплексный анализ новейших вертикальных движений в районе Керченского п-ова, проведенный методами структурно-геоморфологического, структурно-морфометрического анализов и одного из методов фрактального анализа для выявления принципиальных возможностей последнего.

Материалы и методы исследований. Структурно-геоморфологический метод исследования рельефа и проведенный на его основе анализ Керченского п-ова подробно описаны в статье [Захаров и др., 2019]. Исследование выполнено на основе цифровой модели рельефа SRTM в масштабе 1:200 000. Сеть водотоков для морфоструктурного [Симонов, Брянцева, 2018] и фрактального анализов [Захаров и др., 2019] построена по той же цифровой модели рельефа SRTM, с использованием алгоритма, описанного С. Дженсоном и И. Домиником [Jenson, Domingue, 1988], и применяемого в большинстве ГИС-пакетов. Для выделения водотоков определяли направление стока в элементарных ячейках раstra согласно модели

восьминаправленного стока, когда из восьми возможных направлений из ячейки выбирается одно, с наибольшим значением градиента рельефа. Затем определяется величина суммарного стока для каждой ячейки раstra и отсекаются пороговые значения. При построении модели гидросети локальные понижения заполнялись полностью, что привело к некорректному выделению некоторых водотоков в пределах этих впадин, однако их число не превышает 1% и существенно не влияет на полученные результаты. Построенные водотоки разделяли на порядки согласно методу, предложенному А. Страхлером и М.В. Философовым [Strahler, 1957; Философов, 1975]: если два водотока одного порядка сливаются и образуют новый, то его порядок возрастает, при слиянии водотоков разного порядка это не происходит.

При морфоструктурном и фрактальном анализе рассматривались все водотоки, в том числе сухие, площадь водосборного бассейна которых не менее 250–300 тыс. м². Отметим, что построенная гидросеть расположена ниже остаточного рельефа, обусловленного в рассматриваемом регионе не только современными вертикальными движениями, но в значительной мере литологическим составом пород. На Керченском п-ове наиболее распространены отложения олигоцена–нижнего миоцена мощностью до 3 км, известные как майкопская серия и представленные преимущественно бескарбонатными глинами с горизонтом песчаников в нижней части [Муратов, 1960]. Они перекрыты глинами, переслаивающимися с известняками, конгломератами, брекчиями среднего и верхнего миоцена, мощность до 550 м. Эти породы играют главную роль в формировании рельефа северо-восточной части полуострова. Наличие мощных прослоев известняков в глинах среднего миоцена, мшанковых рифов и прослоев ракушечных известняков среди глин эоценового яруса значительно влияет на характер рельефа, что проявляется в формировании характерных узких гряд, которые оконтуривают антиклинальные складки в центральной части полуострова и гряды, сложенные мшанковыми рифами на северо-востоке полуострова. Многие мелкие формы рельефа обусловлены именно литологической неоднородностью и проявляются в остаточном рельефе, который исключается при фрактальном анализе гидросети. Последний заключался в вычислении фрактальной размерности D , которая служит показателем в степенном законе вида

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

где δ — масштаб рассмотрения, N — число элементов данного масштаба.

Фрактальная размерность показывает меру самоподобия рассматриваемой иерархической совокупности и степень сложности структуры. Для природных линейных объектов характерна дробная

размерность в диапазоне от 1 до 2, и чем более сложный, «изломанный» фрактал, тем ближе его размерность к 2.

Для практического вычисления D использовали метод подсчета клеток (box dimension) [Федер, 1991]. Для вычисления D исследуемый объект покрывается клетками со стороной, равной δ , причем при каждом акте покрытия δ изменяется, и подсчитывается число необходимых для этого клеток N при разных значениях δ . На графике, построенном в двойном логарифмическом масштабе, область скейлинга, т.е. диапазона значений δ , для которого зависимость имеет вид (1), аппроксимируется прямой линией:

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

Угловой коэффициент этой зависимости — оценка фрактальной размерности D , c — постоянная.

Фрактальные свойства речных сетей исследованы в большом количестве работ как отечественных, так и зарубежных исследователей [Мельник, Поздняков, 2007; Сидорчук, 2014; Pelletier, 1999]. В них показано, что в масштабе около нескольких десятков километров фрактальная размерность тесно связана со сложностью и густотой речных сетей, а также что есть общая тенденция к росту фрактальной размерности при увеличении высоты и увлажненности территории. В работе [Dombradi et al., 2007] выявлена связь фрактальной размерности с направлением и (грубо) со скоростью неотектонических движений.

При проведении фрактального анализа водотоков каждый участок русла реки считался линейным объектом. Для выявления пространственных особенностей вариации фрактальной размерности речных сетей региона проводился ее расчет в скользящем окне с помощью авторской программы FrAnGeo [Захаров, 2011].

Структурно-геоморфологический и морфоструктурный анализ. В пределах Керченского п-ова выделены 3 крупных тектонических структуры: Юго-Западная равнина, которая представляет собой область периклинального замыкания Крымского мегантиклинория на востоке, южный борт Индо-Кубанского прогиба и Керченско-Таманский поперечный прогиб [Муратов, 1960; Геология..., 1969], которые в той или иной степени по-разному выражаются в рельефе. Важно, что современный структурный план, образованный в неотектонический этап развития Керченского п-ова, не совпадает с более древними структурами. В частности, антиклинальные складки в северо-восточной части полуострова в настоящее время не развиваются, а их выражение в рельефе связано с литологией слагающих их пород. Осложняет структурно-геоморфологический анализ и широкое развитие песчано-глинистых пород, что приводит к слабому проявлению в рельефе новейших структур.

В результате выполненного нами структурно-геоморфологического анализа [Захаров и др., 2019] выделены структуры 1-го порядка (здесь и далее новейшим структурам даны условные названия): Северо-Западный (I), Центральный (II) и Восточный (III) секторы (рис. 1), которые отличаются рядом параметров, главным образом простираемостью структур и их суммарными конэрозионными поднятиями.

Северо-Западный сектор (I) в современной структуре занимает западную часть южного борта Индо-Кубанского прогиба, а также южную часть Юго-Западной равнины. В его пределах выделяются несколько более мелких структур 2-го порядка. *Акташская впадина* (I_1) протягивается вдоль Сивашского залива. Ее высота постепенно увеличивается от уровня моря на северо-востоке до 50–60 м на западе. Прямолинейные очертания береговой зоны позволяют предположить наличие разрывных нарушений. *Арма-Элинское поднятие* (I_2) слабо выражено в рельефе и представляет собой несколько отдельных возвышенностей субширотного и северо-восточного простирания с высотой 45–60 м. *Каменско-Казантипское поднятие* (I_3) протягивается вдоль берега Азовского моря и включает в себя хорошо выраженные в рельефе за счет литологического фактора *Каменский* (2), *Белокаменский* (3) и *Мысовой* (4) хребты. В центральной части хребтов, склоны которых сложены известняками, наблюдается понижение, где вскрываются сарматские глины. В результате образовался обращенный рельеф. Склоны *Караларского поднятия* (I_4) довольно крутые, сложенные известняками сармата и миоцена, а в центральной части хребта находится впадина, наследующая вдавленную синклиналь с майкопскими глинами в центральной части. Суммарная высота конэрозионных поднятий не превышает 100 м. Рельеф береговой зоны сложный, с многочисленными мысами и полуовальными бухтами, образование которых может быть связано с системой разломов.

Центральный сектор (II) представляет собой поднятие 1-го порядка, имеющее сложное строение и протягивающееся в центральной части Керченского полуострова с юго-запада на северо-восток. Его ширина меняется, увеличиваясь к югу. В Центральном секторе можно выделить несколько структур 2-го порядка. *Джау-Тепское поднятие* (II_1) расположено южнее Парапачского гребня (1). Высота отдельных возвышенностей редко превышает 100 м. Эти возвышенности разделяются как древними широкими, протяженными балками позднеплейстоценового возраста преимущественно субмеридионального простирания, так и молодыми балками незначительной протяженности с крутыми склонами и плоским днищем, имеют преимущественно субширотное, северо-западное и запад-северо-западное простирание. Возвышенности чаще всего имеют изометричные очертания

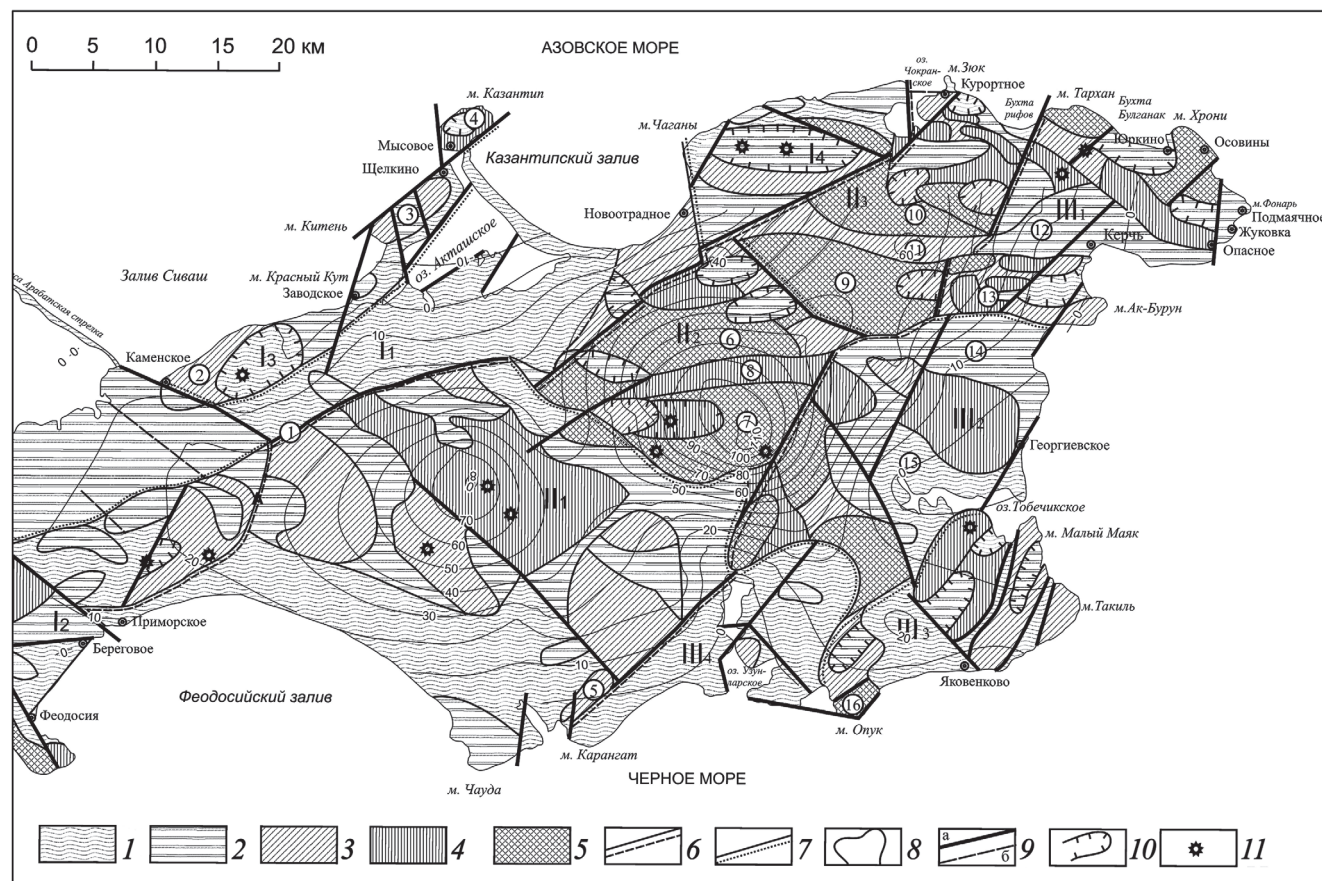


Рис. 1. Сопоставление структурно-геоморфологической схемы Керченского п-ова, по [Захаров и др., 2019], с изобазитами монобазисной поверхности, построенной по долинам 4-го порядка (гипсометрические отметки современные, м), по [Симон, Бранцева, 2018]: 1–5 — суммарные конэрозионные поднятия, м: 1 — <30, 2 — 3–60, 3 — 61–90, 4 — 91–120, 5 — > 121; 6 — границы структур 1-го порядка; 7 — границы структур 2-го 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.

Цифры на карте: I — Северо-Западная структура 1-го порядка: I₁ — Акташская впадина, I₂ — Арма-Элинское поднятие; I₃ — Каменско-Казантипское поднятие; I₄ — Каларарское поднятие; II — Центральная структура 1-го порядка: II₁ — Джау-Тепское поднятие, II₂ — Слюсаревско-Новошепетеевское поднятие, II₃ — Новониколаевско-Тарханское поднятие; III — Юго-Восточная структура 1-го порядка: III₁ — Булганак-Осовинские поднятия, III₂ — Тобечикские поднятия, III₃ — Такильские поднятия; III₄ — Узунларская равнина. Цифры в кружках на схеме: 1–16 — хребты: 1 — Парапачский, 2 — Каменский, 3 — Белокаменский, 4 — Мысовый, 5 — Дюрменский, 6 — Слюсаревский, 7 — Новошепетеевский, 9 — Новониколаевский, 10 — Бурашский, 13 — Восходовские, 16 — Опухский; 8–15 — впадины: 8 — Ленинская, 11 — Багеровская, 12 — Керченская, 14 — Арцишевская, 15 — Тобечикская

и общее северо-западное простираие. На юге дешифрируются незначительные локальные поднятия третьего ранга, наиболее крупным из них является *Дюрменский хребет* (5) высотой более 90 м, хорошо выраженный в рельефе. Прибрежные районы этой структуры, протягивающиеся вдоль Феодосийского залива, имеют выровненный рельеф. *Слюсаревско-Новошепетеевское поднятие* (II₂), расположенное в центральной части сектора, образовано *Слюсаревским* (6), *Новошепетеевским* (7) и другими более мелкими хребтами 3-го порядка северо-восточного простираия и подразделяющей их *Ленинской впадиной* (8). Суммарные конэрозионные поднятия хребтов достигают 170 м. *Новониколаевско-Тарханское поднятие* (II₃) образовано несколькими хребтами 3-го порядка практически субширотного простираия — *Новониколаевским* (9), *Бурашским* (10) и другими,

которые подразделяются впадинами разного размера, в том числе *Багеровской* (11). В пределах впадин наблюдается рост локальных поднятий с высотой до 90 м. На севере расположена система кулисообразных возвышенностей, ограниченных разломами северо-восточного простираия. Они хорошо выражены в рельефе, но в современной структуре плохо разделяются между собой. Их суммарное конэрозионное поднятие достигает 100–120 м и более.

Юго-Восточный сектор (III) наследует Керченско-Таманский поперечный прогиб. В его пределах можно выделить несколько структур 2-го порядка. *Булганак-Осовинские поднятия* (III) расположены на крайнем северо-востоке Керченского п-ова, они представлены серией кулисообразных хребтов с разделяющими их впадинами. Крупная *Керченская впадина* (12), ширина которой значи-

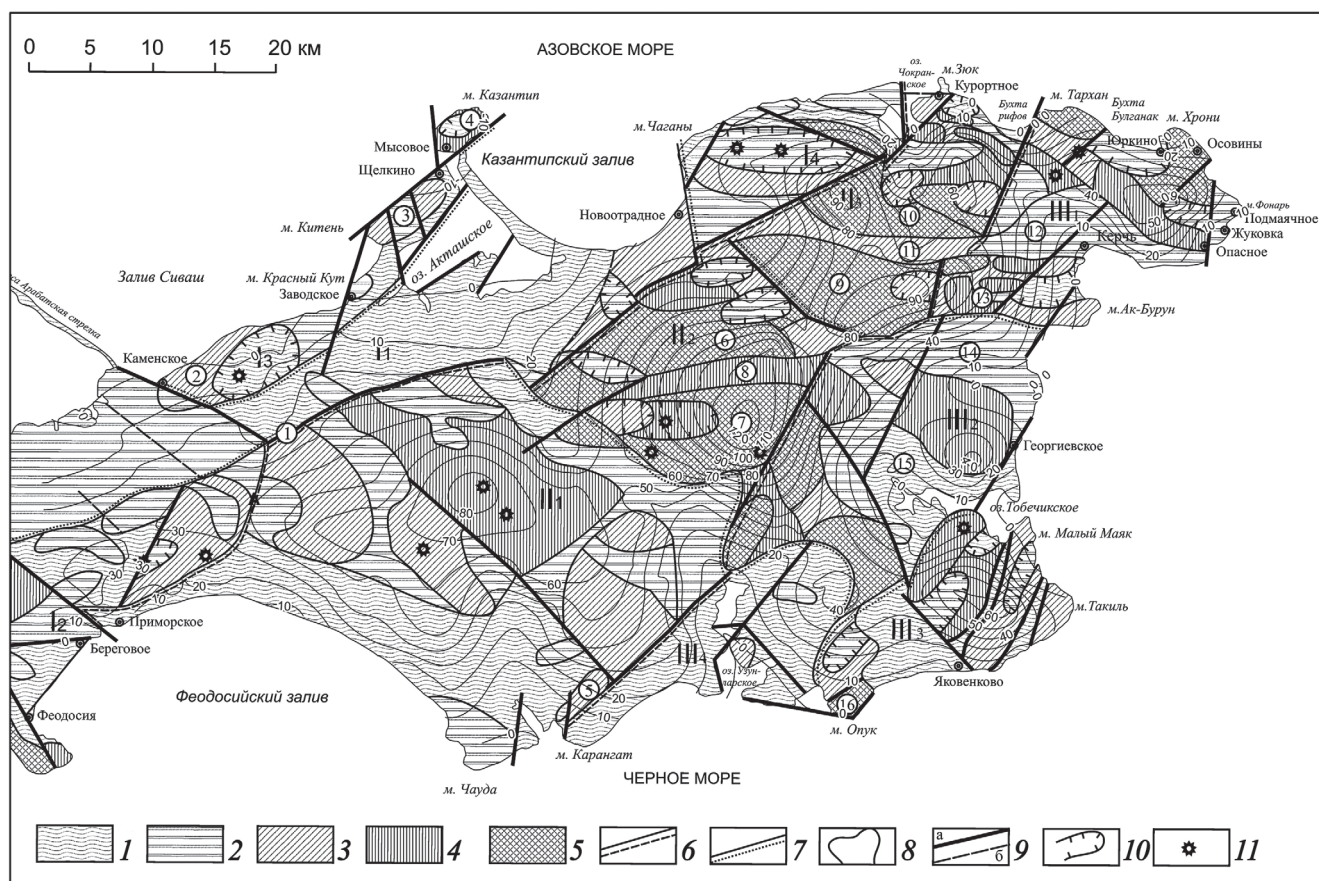


Рис. 2. Сопоставление структурно-геоморфологической схемы Керченского п-ова по [Захаров и др., 2019], с изобазитами монобазисной поверхности, построенной по долинам 3-го порядка (гипсометрические отметки современные, м) по [Симонов, Брянцева, 2018]. Условные обозначения см. на рис. 1

тельно увеличивается с запада на восток, имеет практически субширотное простирание и служит продолжением Багеровской. Эти впадины наследуют Керченскую синклиналь и разделены разломом северо-восточного простирания. Суммарное конэрозионное поднятие *Восходовского поднятия* (13), образованного несколькими хребтами, простирающимися практически субширотно, достигает 170 м. *Тобечикские поднятия* (III₂) представлены несколькими системами хребтов, имеющих северо-западное простирание, и разделяются *Арицишевской* (14) и *Тобечикской* (15) впадинами. Хребты невысокие, до 100 м, с довольно пологими склонами, которые постепенно переходят во впадины, иногда граничат с ними по разломам. *Такильские поднятия* (III₃), выраженные несколькими хребтами северо-восточного простирания, расположены на юго-востоке полуострова и хорошо выражены в рельефе. Некоторые из них ограничены согласными разрывными нарушениями того же простирания. Их высота незначительно превышает 100 м. *Опукское поднятие* (16) — самое высокое на Керченском п-ове, его суммарное конэрозионное поднятие достигает 160–180 м, а крутые склоны высотой до 50 м образованы мшанковыми известняками мезотического яруса, подстилаемыми глинами сарматского яруса. Это поднятие огра-

ничено разрывными нарушениями субширотного и северо-восточного простирания. *Узунларская равнина* (III₄), расположенная на юге полуострова, имеет высоту не превышающую 30 м. Небольшие возвышенности отмечены вдоль восточного берега Узунларского озера. Очертания береговой линии озера могут свидетельствовать о приуроченности их к разрывным нарушениям.

И на структурно-геоморфологической схеме, и на схеме, построенной при помощи структурно-морфометрического анализа (рис. 1), хорошо видно, что современные структуры 1-го порядка имеют северо-восточное простирание, а структуры 2-го и 3-го порядков — северо-западное. В то же время древние структуры имеют преимущественно субширотное простирание [Муратов, 1960]. Структурно-геоморфологический анализ хорошо зарекомендовал себя при выделении новейших структур. В то же время при помощи этого метода нельзя определить динамику их формирования во времени, что вызывает затруднения при интерпретации результатов фрактального анализа. Поэтому возникла необходимость дополнительно проанализировать новейшие тектонические движения при помощи структурно-морфометрического метода.

В результате структурно-морфометрического анализа водотоков Керченского п-ова построены

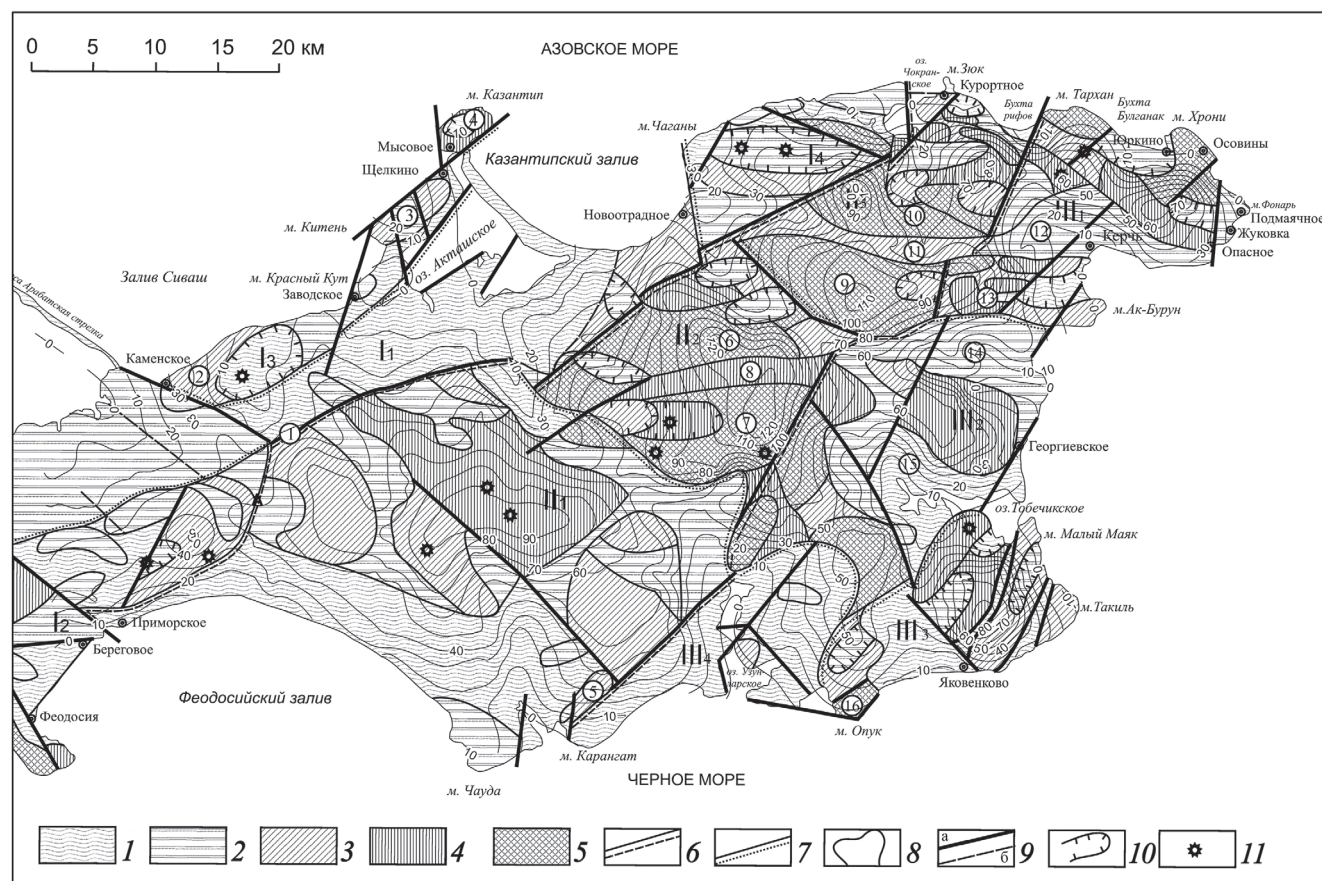


Рис. 3. Сопоставление структурно-геоморфологической схемы Керченского п-ова, по [Захаров и др., 2019], с изобазитами монобазисной поверхности, построенной по долинам 2-го порядка (гипсометрические отметки современные, м) по [Симонов, Брянцева, 2018]. Условные обозначения см. на рис. 1

схемы монобазисных и разностных поверхностей для водотоков пяти порядков [Симонов, Брянцева, 2018]. При сравнении этих схем со структурно-геоморфологической схемой [Захаров и др., 2019] можно сделать следующие выводы.

Наиболее древний рельеф Керченского п-ова, отражающийся в монобазисной поверхности, построенной по долинам водотоков 5-го порядка, замаскирован более молодыми структурами и не отражается на структурно-геоморфологической схеме. Однако наиболее крупные структуры 1-го порядка хорошо коррелируют с монобазисной поверхностью 4-го порядка (рис. 1).

На основании структурно-морфометрического анализа можно утверждать, что именно на этом этапе основное осевое поднятие Керченского п-ова, совпадающее с Центральным сектором (II) на структурно-геоморфологической схеме, приобретает вытянутую форму восток-северо-восточного простирания, причем наиболее интенсивное воздымание на этом этапе происходило в центральной и восточной частях полуострова. В это же время начали обособляться Джау-Тепское и Слюсаревско-Новошепетеевское (рис. 1) поднятия 2-го порядка, разделенные антецедентно развивающейся долиной р. Самарли и долинами крупных балок северо-западного простирания. В Юго-Восточ-

ном секторе, в районе Узунларского залива в это время, по всей видимости, происходило интенсивное размывание более древнего рельефа. На северо-востоке полуострова, в центральной части продольного профиля Керченской синклинали начало развиваться Бурашское поднятие. По периферии структуры, выделенной по водотокам 4-го порядка, вскрываются отложения средне- и позднеплейстоценового возраста. Таким образом, наиболее древний рельеф, отображающийся на структурно-геоморфологической схеме, вероятно, не древнее среднего плейстоцена.

Сопоставление структурно-геоморфологической схемы с монобазисной поверхностью, построенной по долинам водотоков 3-го порядка, показывает, что с началом их формирования неотектонический структурный план изменился. Воздымание поверхности преобладает в восточной и северо-восточной частях полуострова, в то время как в западной и центральной частях интенсивность воздымания падает (рис. 2). С этого времени формируются поднятия и впадины Юго-Восточного и северо-восточной части Центрального (Новониколаевско-Тарханское поднятие) секторов. Средне-верхнеплейстоценовые отложения в пределах Юго-Восточного сектора отмечены лишь фрагментарно — в отдельных впадинах (Керчен-

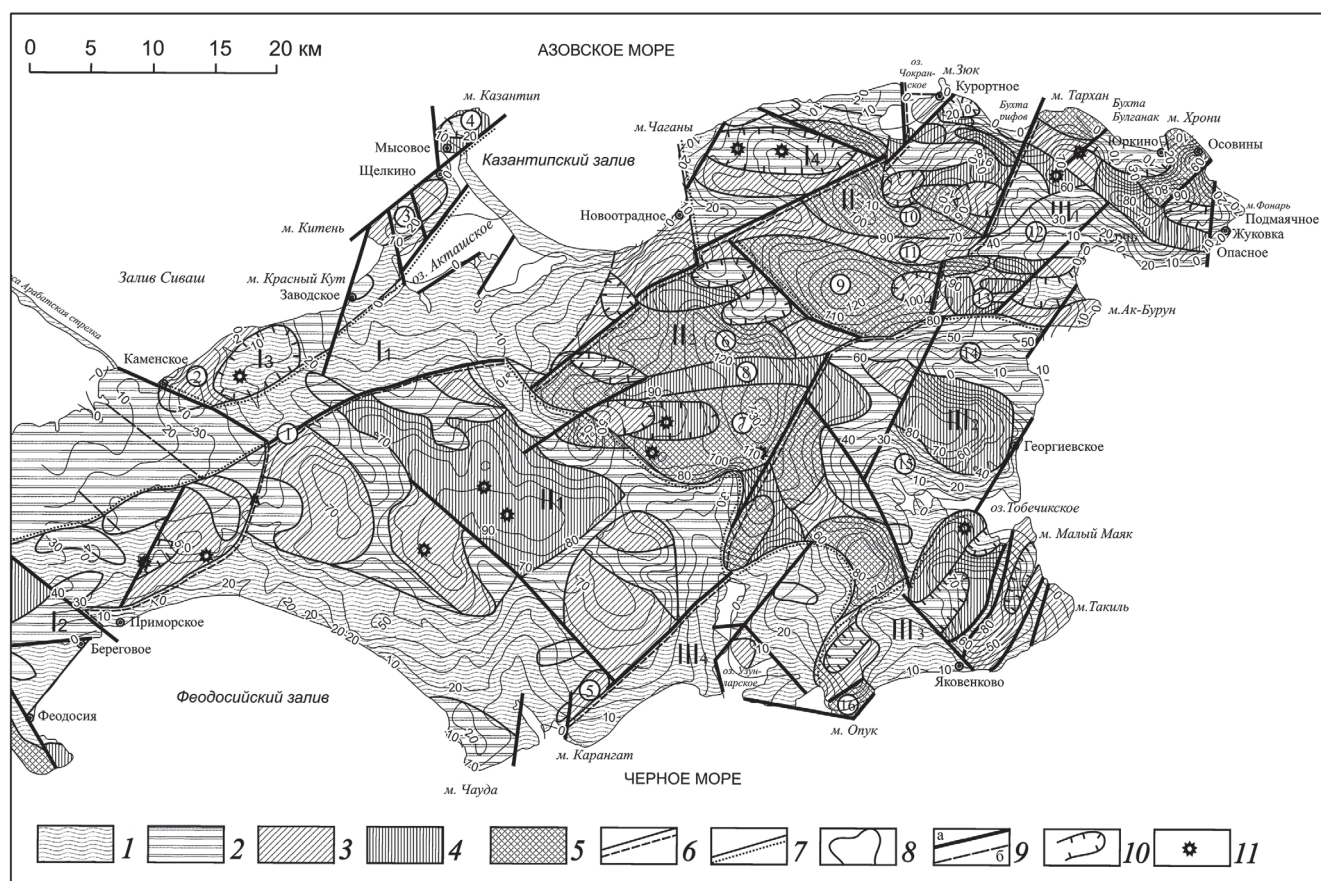


Рис. 4. Сопоставление структурно-геоморфологической схемы Керченского п-ова по [Захаров и др., 2019], с изобазитами монобазисной поверхности, построенной по долинам 1-го порядка (гипсометрические отметки современные, м), по [Симонов, Брянцева, 2018]. Условные обозначения см. на рис. 1

ской, Тобеченской и Арцишевской) и вдоль южного побережья полуострова, но при этом занимают практически всю территорию Северо-Западного сектора, это свидетельствует о том, что последний не испытывал воздымания до конца плейстоцена.

Совместный анализ структурно-геоморфологической схемы с базисными поверхностями, построенными по водотокам 2-го и 1-го порядков (рис. 3, 4), отражает развитие неотектонических структур в конце плейстоцена—голоцене. Подчеркнем, что в большинстве случаев монобазисная поверхность, построенная по долинам 2-го порядка, отражает дальнейшее развитие структур 2-го порядка, выделяемых на структурно-геоморфологической схеме, в то время как монобазисная поверхность, построенная по долинам 1-го порядка, отражает развитие структур 3-го порядка, причем структуры широтного простирания более высоких порядков, выделяемые на структурно-геоморфологической схеме в пределах Центрального сектора, в монобазисной поверхности, построенной по долинам 1-го порядка, не отражены. Вероятнее всего, указанное связано с тем, что эти структуры выражены в основном в остаточном рельефе, который преимущественно обусловлен прочностными свойствами выходящих на поверхность пород [Симонов, Брянцева, 2018], и отражают более

древний структурный план. Для описываемых монобазисных поверхностей сохраняется общий тренд, согласно которому на заключительной стадии формирования рельефа Керченского п-ова основное воздымание происходило в восточной и северо-восточной частях полуострова. В то же время, по всей видимости, начали формироваться и поднятия Северо-Западного сектора (Каменское, Казантипское и др).

Таким образом, из краткого сравнительного анализа следует, что выделяемые на структурно-геоморфологической схеме структуры развивались не только одновременно, но и неравномерно. Большая часть водотоков Керченского п-ова заложилась и развивалась в плейстоцене—голоцене, причем суммарное изменение рельефа за это время отражает тренд общего воздымания за этот период, выявляемый по максимальным значениям суммарной разностной поверхности (рис. 5) и оказывающий решающее влияние на рисунок гидросети, за исключением факторов, связанных с литологическим составом пород, трещиноватостью, локальными формами рельефа низких порядков и др.

В результате сопоставления суммарной разностной поверхности между монобазисными поверхностями 4-го и 1-го порядков со структурно-

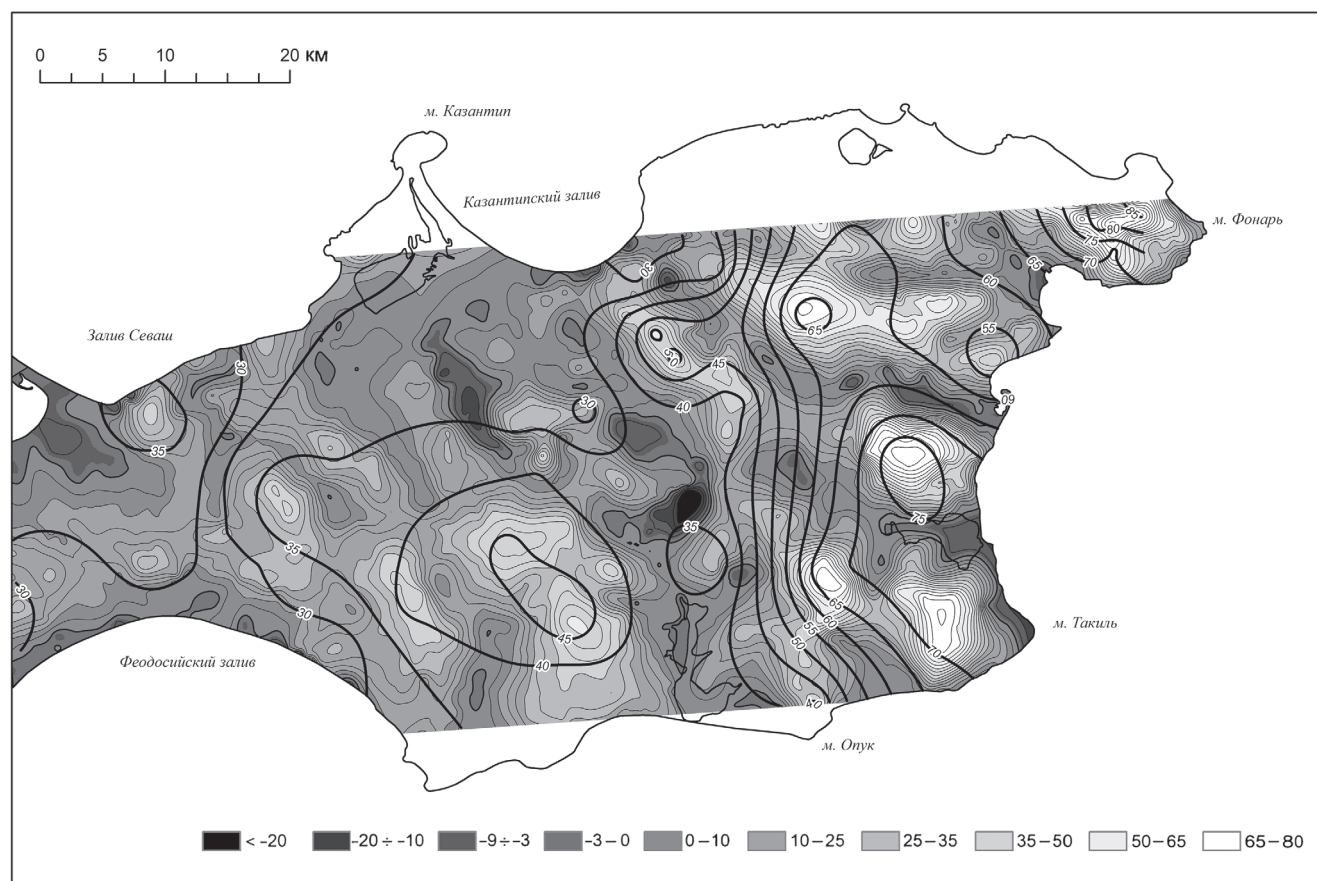


Рис. 5. Разностная поверхность между монобазисными поверхностями, построенными по долинам 1-го и 4-го порядков, отражающая суммарное изменение рельефа в плейстоцене–голоцене и суммарный тренд общего воздымания за этот же период (полуширные изолинии). Градация серого — амплитуда изменения рельефа, м

геоморфологической схемой (рис. 6) выявлено, что за весь новейший этап наиболее значительное воздымание претерпели Слюсаревско-Новошепетевское поднятие Центрального сектора, а также поднятия Юго-Восточного сектора, расположенные вдоль восточного побережья полуострова (Булганак-Осовинские, Тобечикские и Такильские).

Фрактальный анализ гидросети Керченского полуострова. В нашей предыдущей работе [Захаров и др., 2019] приведены два варианта расчета распределения фрактальной размерности. С целью минимизации краевых эффектов, связанных с береговой линией, выполнен детальный анализ самоподобия речной сети. Поле фрактальной размерности D рассчитано в скользящем окне, выбор параметров которого обусловлен следующими факторами: минимальный размер окна определялся детальностью данных о гидросети, он составил $\sim 0,16$ км, а максимальный — отличался от минимального приблизительно на порядок и составил ~ 4 км, т.е. был выбран минимально возможным для рассматриваемого региона и качества данных максимального окна осреднения. При таких параметрах анализ продемонстрировал подверженность метода масштабному эффекту и показал пониженные значения размерности поля

D в пределах низкоранговых поднятий, что на первый взгляд противоречит данным других авторов [Мельник, Поздняков, 2007; Сидорчук, 2014; Dombradi et al., 2007]. Однако следует иметь в виду, что в пределах водоразделов плотность гидросети выбранного масштаба уменьшается независимо от того, находится ли выбранная область в состоянии воздымания или опускания. Вынужденно выбранный размер окна осреднения не позволил компенсировать этот масштабный эффект данных, что продемонстрировало определенные ограничения при применении методов фрактального анализа для оценки новейших движений.

Более корректным оказался выбор максимального окна осреднения, обусловленного размером изучаемой области, что позволило добиться осреднения фрактальной размерности и результатов для выявления основных особенностей вариации фрактальной размерности для области. В этом случае размер окна составлял $0,3^\circ \times 0,3^\circ$, перекрытие — $0,15^\circ$, диапазон размеров клеток, которые использованы при вычислениях, — от $0,3$ до $0,02^\circ$ (~ 24 – $1,6$ км) [Захаров и др., 2019]. Сопоставление результатов фрактального анализа с такими параметрами и структурно-геоморфологической схемы показал корреляцию максимумов фрактальной размерности гидросети с наиболее крупными и

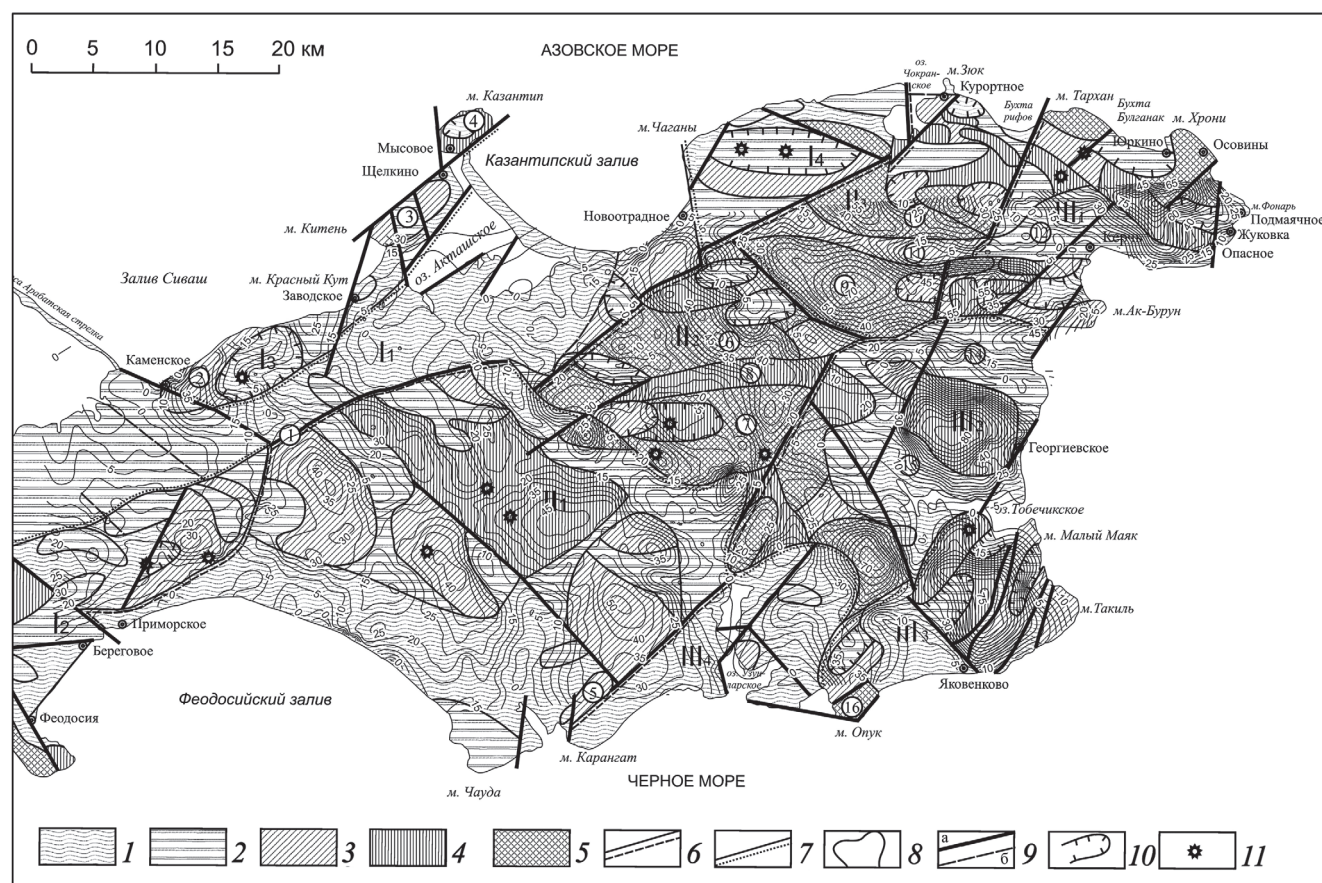


Рис. 6. Сопоставление суммарной разностной поверхности между монобазисными поверхностями 4-го и 1-го порядков со структурно-геоморфологической схемой. Условные обозначения см. на рис. 1

древними поднятиями структур 1-го порядка, выделяемыми по результатам структурно-геоморфологического анализа, что в целом соответствует результатам, полученным в работах других авторов [Мельник, Поздняков, 2007; Сидорчук, 2014; Dombradi et al., 2007]. Однако было не совсем понятно некоторое смещение максимумов и минимумов поля D относительно структур.

Выполненный нами комплексный анализ с применением морфоструктурного метода демонстрирует, что повышенные значения поля D лучше коррелируют с максимальным поднятием, которое испытало Слюсаревско-Новошепетеевское поднятие в плейстоцене и голоцене (рис. 7), т.е. за время, в течение которого, как показано выше, сформировалась большая часть водотоков Керченского п-ова. То, что в поле фрактальной размерности отражены поднятия Юго-Восточного сектора, вероятнее всего, обусловлено тем, что эти поднятия при расчете фрактальной размерности полностью попадают в область критического влияния краевых эффектов, связанных с близостью береговой линии.

Таким образом, фрактальный анализ рисунка гидросети принципиально можно применять, скорее, при выявлении новейших движений, чем структур. Несмотря на то что в фрактальный

анализ был включен только один из параметров гидросети — ее плотность, опыт такого анализа можно считать успешным. Дальнейшая разработка метода с включением в анализ других параметров гидросети, отражающих направленность новейших тектонических движений, таких, как частота смены порядка водотоков, длина водотоков разных порядков, форма водотоков и др., а также тех масштабных эффектов, которые были выявлены, с учетом появления все более детальных и объемных цифровых моделей рельефа и возникающей необходимостью хотя бы предварительной их автоматической обработки представляется весьма перспективной.

Выводы. 1. Большая часть гидросети Керченского п-ова заложилась и развивалась в плейстоцене–голоцене. Рост новейших структур, выделенных в результате структурно-геоморфологического анализа Керченского п-ова, происходил неравномерно, по-видимому, восходящие новейшие движения перемещались постепенно с запада на восток и северо-восток.

2. Результаты комплексного анализа с применением морфоструктурного, структурно-геоморфологического методов и определения фрактальной размерности D гидросети «клеточным» методом показали, что повышенные значения поля

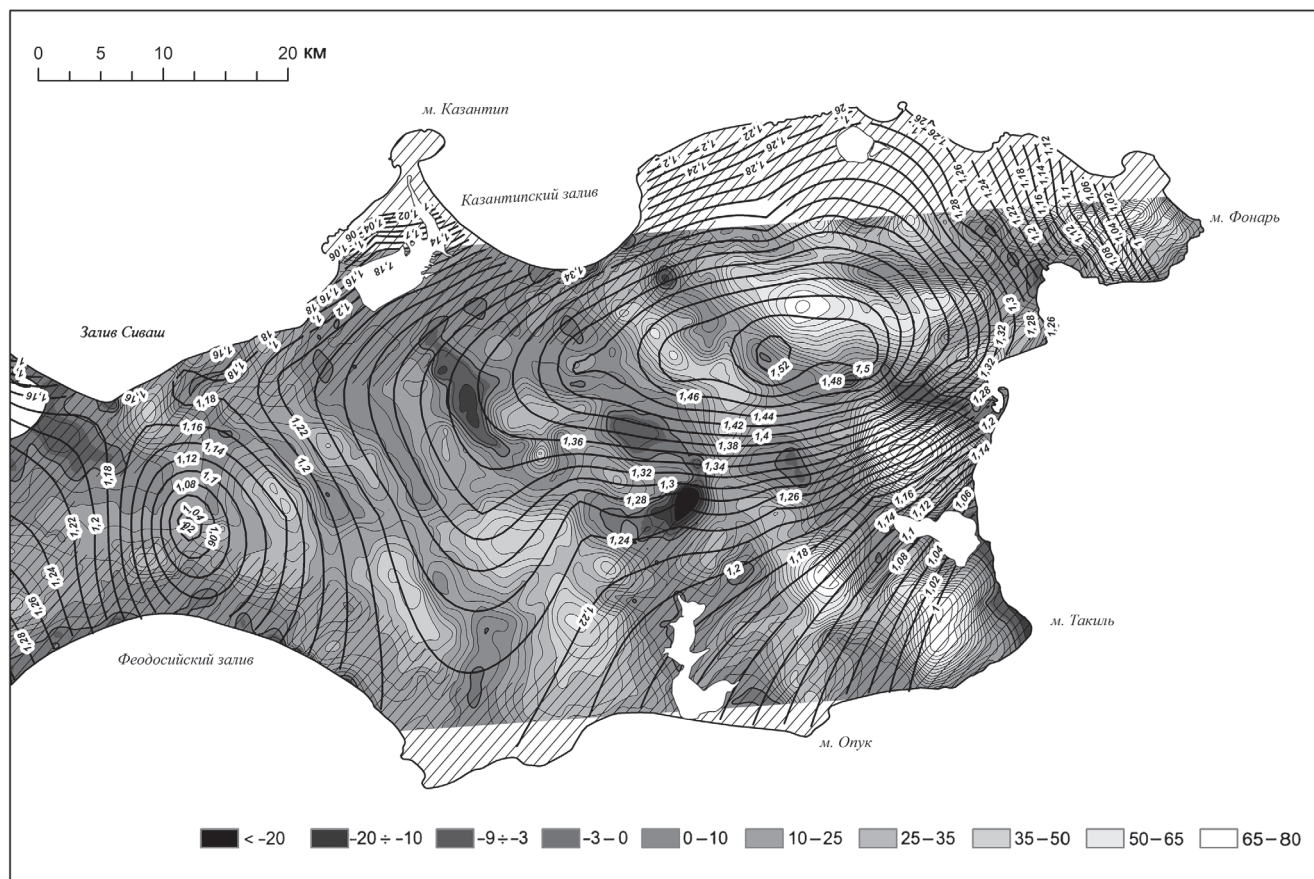


Рис. 7. Сопоставление суммарной разностной поверхности между монобазисными поверхностями 4-го и 1-го порядков и поля фрактальной размерности D (полужирные изолинии). Градация серого — амплитуда изменения плейстоцен-голоценового рельефа, м. Косая штриховка — области критического влияния краевых эффектов, связанных с береговой линией, на расчет размерности D

D лучше коррелируют с суммарной амплитудой воздымания за плейстоцен и голоцен, т.е. за время, в течение которого формировалась большая часть водотоков Керченского п-ова, чем с границами новейших структур, сформировавшихся за кон-эрозионный этап развития.

3. Применение фрактального подхода для количественного анализа рисунка гидросети дает

хорошие результаты при выявлении новейших движений, менее результативно оно для выявления новейших структур. Дальнейшая разработка метода фрактального анализа должна вестись с обязательным включением других важных параметров гидросети, широко используемых при структурно-геоморфологическом анализе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геология СССР. Т. 8. Крым. Ч. I. Геологическое описание / Ред. М.В. Муратов. М.: Недра, 1969. 576 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.
- 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. doi: <https://doi.org/10.21455/GPB2019.1-5>.
- Корчуганова Н.И., Костенко Н.П., Межеловский Н.Н. Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. М., 2001. 212 с. (МПП РФ геокарт. МГГА).
- Мельник М.А., Поздняков А.В. Фрактальный анализ эрозионного расчлененного рельефа: методологические подходы // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2007. № 301. С. 201–205.

- 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.
- Симонов Д.А., Брянцева Г.В. Морфоструктурный анализ при неотектонических реконструкциях Керченского полуострова // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2018. Т. 93, вып. 3. С. 12–25.
- Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
- Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1975. 232 с.
- Dombradi E., Timar G., Bada G. et al. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian–Pannonian system // Global and Planet. Change. 2007. Vol. 58. P. 197–213.
- Donadio C., Magdaleno F., Mazzarella A., Kondolf G.M. Fractal dimension of the hydrographic pattern of three large

rivers in the Mediterranean morphoclimatic system: geomorphologic interpretation of Russian (USA), Ebro (Spain) and Volturno (Italy) Fluvial Geometry // *Pure Appl. Geophys.* 2015. Vol. 172. P. 1975–1984. doi: 10.1007/s00024-014-0910-z.

Fac-Beneda J. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system // *J. Hydrology*. 2013. Vol. 488. P. 48–54. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.033>

Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1988. Vol. 54, N 11. P. 1593–1600.

Pelletier J.D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, B4. P. 7359–7375.

Strahler A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology // *Transact. Amer. Geophys. Union*. 1957. Vol. 38, N 6. P. 913–920.

Turcotte D.L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Second edit. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.

Поступила в редакцию 21.02.2019

Поступила с доработки 26.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019