

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ РЕЧНОЙ СЕТИ И НЕОТЕКТОНИКА ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ

В.С. Захаров¹, Д.А. Симонов¹, Г.З. Гильманова², А.Н. Диденко^{2,3}

¹ФГБОУВО МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы 1, г. Москва, 119991;
e-mail: zakharov@geol.msu.ru; dsim_0@mail.ru

²ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: gigulya@yandex.ru

³ФГБОУВО Тихоокеанский государственный университет, Тихоокеанская 136, г. Хабаровск, 680035

Поступила в редакцию 20 ноября 2019 г.

Предложен новый комплексный параметр для характеристики самоподобия гидросети (PRNS – Parameter of River Networks Self-similarity), являющийся комбинацией степенного показателя в распределении русел по длинам, фрактальной размерности русел и фрактальной размерности точек смены порядка русел, который более корректен при сопоставлении с неотектоническими движениями. Проведен комплексный анализ самоподобия модели гидросети южной части Сихотэ-Алиня, построенной по результатам обработки цифровой модели рельефа SRTM. Проведено сопоставление результатов морфоструктурного и фрактального анализов, которое показало хорошую корреляцию этих двух методов. Ареалы относительных максимумов PRNS совпадают с областями наибольших восходящих неотектонических движений (приращение рельефа), а минимумов – с областями наименьших приращений рельефа или с областями наиболее значительной эрозии. При этом к граничным зонам между относительными максимумами и минимумами ареалов PRNS приурочено положение большинства эпицентров коровых землетрясений, то есть вытянутые сейсмические области огибают поднятия, что связано с блоковым характером неотектонических вертикальных движений.

Ключевые слова: речная сеть, неотектоника, фрактальный и морфоструктурный анализы, южный Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

В двух предыдущих статьях [6, 33] нами был проведен комплексный анализ характеристик самоподобия сейсмичности и сети разломов в пределах Сихотэ-Алиньского орогенного пояса и прилегающих территорий. Необходимым этапом для выявления общей структурной организации и характера сеймотектонических движений в сейсмоопасных регионах, один из которых – юг Дальнего Востока России, является сопоставление данных о сейсмичности, с одной стороны, и новейших и современных тектонических движениях, с другой. Это тем более важно, так как такое сопоставление позволит дифференцировать роль вековых неотектонических (эпейрогенез, изостазия) и «мгновенных» сеймотектонических процессов при вертикальном и горизонтальном смещениях блоков земной коры.

GPS-наблюдения, активно проводившиеся на юге Дальнего Востока России в последние 15 лет, подтверждают и существенно дополняют представления о новейшей тектонике региона. После землетрясения Тохоку-2011 с магнитудой 9.1 для 10 станций GNSS-сети ДВО РАН было установлено, что «величины косейсмических смещений в континентальной части Дальнего Востока России достигают максимальных значений (около 4 см) на юге Приморья и уменьшаются к северу от него» [5]. Речь в вышеуказанной работе шла о горизонтальных движениях, впоследствии, после накопления данных и их обработки, было установлено и вертикальное смещение. Северная, восточная и вертикальная составляющие косейсмического смещения для пункта ZMEY (координаты 48.10° с.ш. и 135.59° в.д.) оказались равными -10 ± 2 , $+5 \pm 2$ и -8 ± 4 мм, соответственно [20]. Как указывается в специальных работах [20, 27], область необратимых ко-

сейсмических смещений распространяется на более чем тысячу километров при землетрясениях с магнитудой 8 и более. Выборка сильнейших землетрясений на площади 35–55° с.ш. и 130–150° в.д. (рис. 1, *a*) с начала прошлого века по 19 октября 2019 г., произведенная нами из [29], показала, что на этой площади произошло 105 землетрясений с магнитудой 7 и более, среди них 11 коровых землетрясений с магнитудой 8 и более. Полагаем, что отклик крупнейших сейсмических событий, и зафиксированных, и произошедших до эпохи инструментальных наблюдений, в виде деформационных волн существенно влияет на неотектонический режим Сихотэ-Алиньского региона.

В последние 20 лет изучению неотектонических движений Сихотэ-Алиньского орогена было посвящено незначительное количество исследований – это работы С.В. Гаркуши с соавторами [4], А.М. Короткого с соавторами [10], Ф.С. Онухова и Т.В. Меркуловой [15], а также небольшой по объему раздел, написанный Е.А. Мясниковым, в коллективной монографии [3]. Во всех этих работах указывается, что после завершения мезозойских этапов развития региона, определявшихся субдукционными и аккреционными процессами, в кайнозойское время территория была вовлечена в процесс горообразования, наиболее интенсивно протекающий в плиоцен-четвертичное время и связанный с новейшими блоковыми движениями [4].

Во многих работах показано, что фрактальный анализ рисунка речной сети может быть использован как дополнительный независимый метод исследования неотектонических движений [12, 13, 16, 23, 24, 30]. Гидросеть вполне закономерно и быстро реагирует на новейшие и современные тектонические движения; при положительных вертикальных движениях река будет врезаться в коренные породы, при отрицательных – аккумулировать речные осадки, при стабильности территории будут образовываться многочисленные меандры. Установлено, что величина показателя самоподобия (фрактальной размерности) речной сети отражает ее густоту [12, 13, 16, 24], выявлены тенденция к общему увеличению фрактальной размерности с высотой рельефа [16, 23, 24], а также определенная корреляция с направлением вертикальных движений [12, 13, 24, 25]. Фрактальный подход существенно увеличивает возможности количественного описания речных и эрозионно-руслых сетей. В то же время, существует ряд неопределенностей при применении данного вида анализа, в том числе в методическом плане, в выборе масштабов рассмотрения, в установлении корреляции с неотектоникой, что делает работу в этом направлении важной и актуальной.

Целью предлагаемого исследования является анализ характеристик самоподобия речных сетей Южного Сихотэ-Алиня (рис. 1, *b*) и сопоставление его результатов с особенностями неотектонического развития региона. Это, в совокупности с другими данными (сейсмичность, крутизна склонов, литологическая характеристика горных пород и грунтов и др.), в дальнейшем можно будет использовать для прогноза схода обвалов и оползней, что, как показали недавние события – сход оползня объемом более 24 млн м³ на р. Буряя 11 декабря 2018 г. – , для горных районов Дальнего Востока весьма актуально.

МЕТОДИКА РАБОТЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Гидросеть формируется под влиянием множества различных факторов, включающих в себя климатические и гидрологические, особенности геологического строения и литологического состава пород, трещиноватости и т.д. [1]. Значительное, если не определяющее, влияние на формирование сети водотоков оказывают новейшие и современные вертикальные тектонические движения, что делает рисунок гидросети одним из наиболее чувствительных маркеров этих процессов.

Рисунок гидросети обладает выраженным свойством самоподобия в достаточно широком диапазоне масштабов. В работах [8, 11, 21, 28, 30, 31] рассмотрены основные, связывающие ряд базовых параметров речных бассейнов, соотношения – длина бассейна данного порядка L , площадь водосбора A , рельеф бассейна для потока данного порядка R , количество потоков N определенного порядка, наклон вдоль потока данного порядка S :

$$N \sim A^p, L \sim A^q, S \sim A^r, R \sim A^s, \quad (1)$$

где p, q, r, s – степенные показатели. В обобщающей работе [28] даны оценки их величин: p варьируется от -0.99 до -0.95, q – от 0.5 до 0.55, r – от 0.3 до 0.4, s – от 0.20 до 0.35. Поскольку эти соотношения носят степенной характер, это позволяет, помимо качественного анализа, использовать и количественное описание особенностей гидросети на основе применения подходов фрактальной геометрии.

Для прямой количественной оценки связи интенсивности неотектонических вертикальных движений с рельефом существует ряд методик. Однако большинство из них способно отражать только кумулятивные эффекты направленности и амплитуды движений за весь неотектонический этап. При этом неотектонические структуры могут развиваться не только одновременно, но и неравномерно. Амплитуда и направленность новейших движений может меняться во времени, скорость воздымания на различных участках и

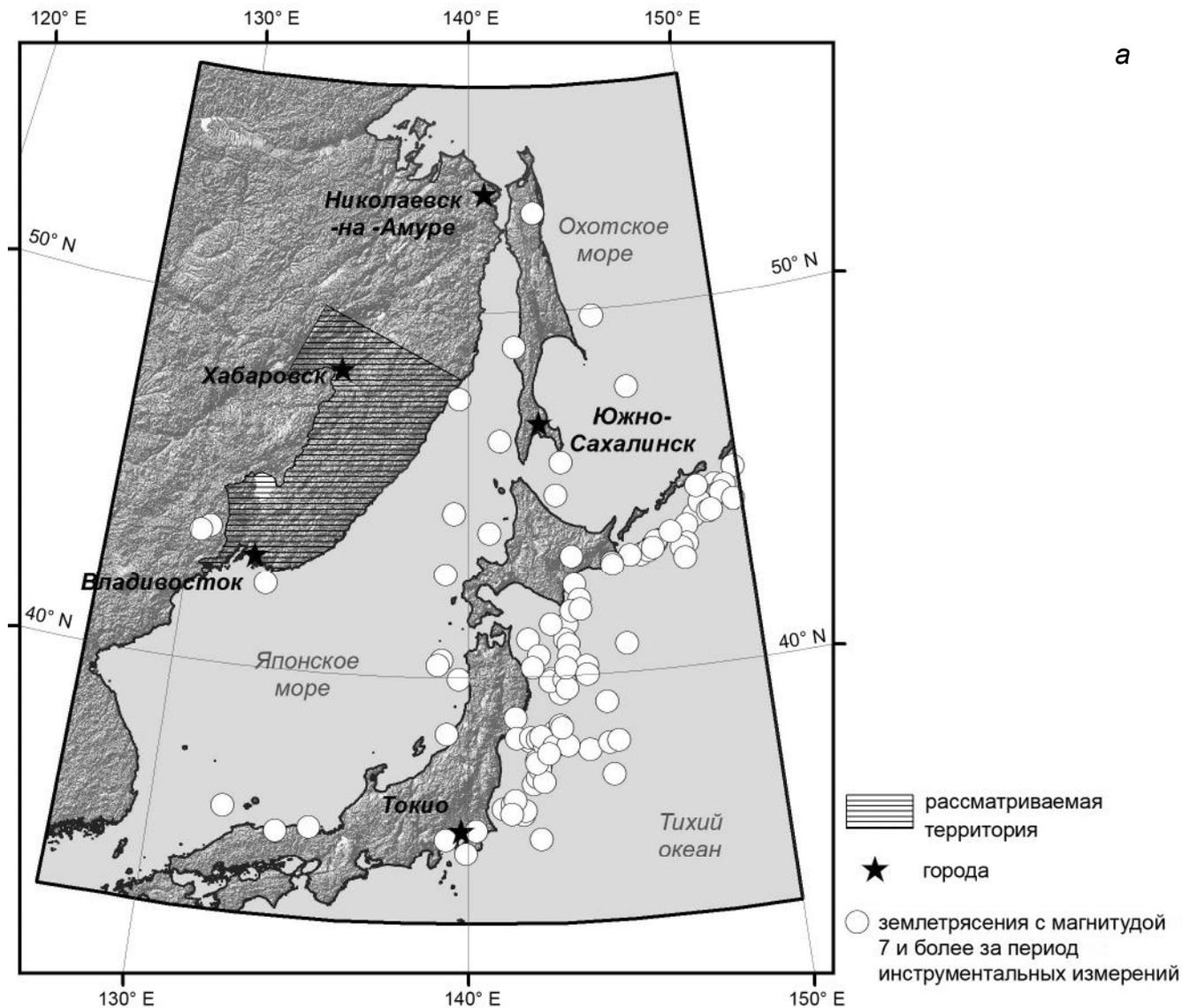
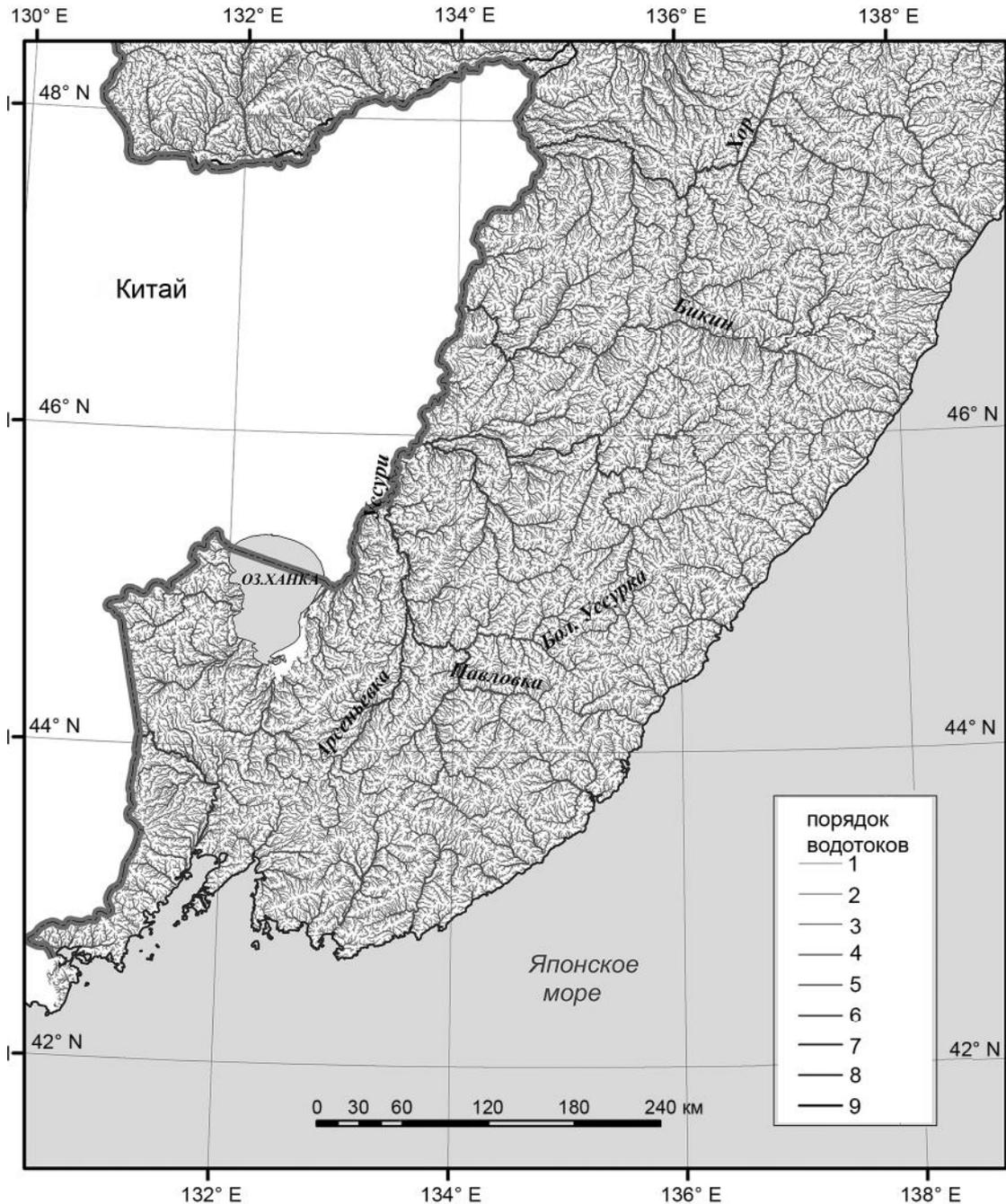


Рис. 1. Схема расположения (а) и модель гидросети (б) района исследований.

в разные интервалы времени может быть разной, что оказывает значительное влияние не только на рельеф, но и на рисунок гидросети. Структурно-морфометрический метод, разработанный М.Ф. Философовым [22], позволяет не только выявлять развивающиеся тектонические структуры, но и рассматривать их развитие во времени. В результате комплексного анализа монобазисных поверхностей водотоков разных порядков, представляющих собой интерполированные поверхности, построенные по тальвегам водотоков каждого порядка, можно проследить стадии развития рельефа, которые отражают эволюцию роста выраженных в рельефе новейших структур. Такой подход, на наш взгляд, позволяет более точно определить соотношение новейших движений и новейших струк-

тур с рисунком гидросети. При изучении новейших вертикальных тектонических движений нами был выбран метод структурно-морфометрического анализа, адаптированный для неотектонических исследований [17].

Рисунок речной сети региона (рис. 1, б), использовавшийся для последующих фрактального и морфоструктурного анализов, был рассчитан нами на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM с разрешением 90 метров [32] с применением алгоритмов определения направления стока в элементарных ячейках согласно так называемой модели восьми-направленного стока – алгоритма, применяемого в большинстве современных геоинформационных систем [24, 26].



б

Рассчитанные таким образом водотоки (рис. 1. б) были классифицированы на порядки согласно схеме, по которой порядок долины повышается только при слиянии двух водотоков, имеющих порядок на единицу меньше (рис. 2), а пересечение двух водотоков разных порядков не приводит к увеличению порядка [22, 30]. В ходе анализа рассматривались все водотоки, водосборный бассейн которых составляет не менее 1300–1400 тысяч м² (200 элементарных ячеек ЦМР SRTM). Первый порядок присваивался водотокам с минимальным, указанным выше водосборным бас-

сейном. Всего при заданных параметрах выделения водотоков в пределах изучаемой области было выделено 9 порядков. Реке Амур искусственно и условно был присвоен 10-й порядок. Данное допущение не влияет на результат, поскольку водоток 10-го порядка является единственным и не включается в дальнейшую обработку и анализ.

ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНОЙ СЕТИ

В ходе нашего анализа мы определяли несколько характеристик, описывающих самоподобие гидросе-

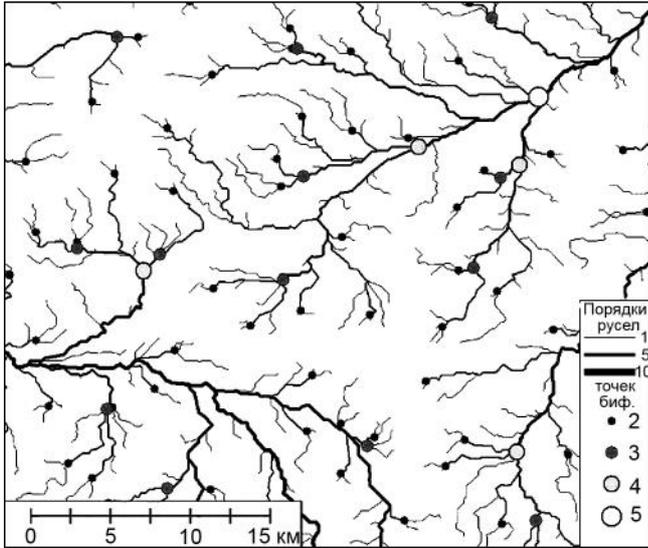


Рис. 2. Пример классификации водотоков на порядки согласно схеме, по которой порядок долины повышается только при слиянии двух водотоков.

Толщина линий пропорциональна порядку русла, круги обозначают точки смены порядка русел (бифуркации), где больший радиус соответствует большему порядку (2, 3, 4, 5).

ти, а также был предложен новый комплексный параметр.

1. Длина водотоков. Одной из часто определяемых характеристик является степенной показатель α в распределении водотоков по длинам:

$$N \sim L^{-\alpha}, \quad (2)$$

где N – количество потоков данного порядка (или диапазона порядков), L – их длина. При вычислении α зависимость $N(L)$ строят в двойном логарифмическом масштабе, а затем область скейлинга, т.е. диапазона значений L , для которого зависимость имеет вид (2), аппроксимируют прямой линией:

$$\lg N = -\alpha \lg L + c, \quad (3)$$

Параметр α позволяет характеризовать соотношение длин русел. В случае, когда относительно много коротких русел, будет проявляться значительный максимум в области малых значений L , а затем распределение будет быстро спадать, что выражается в больших значениях параметра α . А в случае если относительно велика доля длинных русел, распределение будет более пологим, что выражается в меньших значениях параметра α . Поскольку длины русел разных порядков связаны с неотектоническими движениями (относительно большое количество коротких русел с частой сменой порядка указывает на режим поднятия), данный параметр позволяет дать количественную характеристику проявлений неотектоники в особенностях рисунка гидросети.

Отметим некоторые особенности методики. В качестве L при анализе берем длины *связных отрезков* русел данного порядка, ограниченных точками смены порядков (или границами области анализа). При построении гидросети по рельефу по описанной выше методике результирующие русла могут состоять из отдельных отрезков, в том числе и русел одного порядка. Поэтому перед анализом длин необходимо провести предварительную процедуру объединения русел одного порядка в связные отрезки. В случае анализа распределения длин в небольшой области (или в скользящем окне), связные участки русел высоких порядков не уместятся в размер окна, и происходит их отсекание. Это приводит к искажению распределения по длинам: наблюдается некоторый «недостаток» в области больших длин. Поэтому данный анализ целесообразно проводить для русел с порядками, длины которых в среднем не превышают размеров окна осреднения. При этом, как отмечено выше, доля русел высоких порядков крайне мала.

Вычисление параметра α для всего региона исследований в диапазоне масштабов 2–100 км представлено на рис. 3, $\alpha = 3.07 \pm 0.08$ (коэффициент корреляции $r = 0.98$).

2. Самоподобие речной сети. Для характеристики самоподобия речной сети проводится вычисление фрактальной размерности D , которая является показателем в степенном законе вида:

$$N \sim \delta^{-D}, \quad (4)$$

где δ – масштаб рассмотрения, N – количество элементов данного масштаба, которое 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 абсолютной величиной фрактальной размерности.

Меру самоподобия можно оценивать как у линейных, так и у точечных объектов и их совокупностей (множеств). Для совокупности линейных объектов на плоскости характерна дробная размерность в диапазоне от 1 до 2, для точечных множеств на плоскости возможный диапазон значений D варьируется от 0 до 2. Чем более сложный характер имеет фрактал, тем плотнее его элементы заполняют пространство, тем ближе его размерность к 2.

При выполнении данной работы мы проводили оценку фрактальной размерности гидросети в двух вариантах, дополняющих друг друга: 1) самого рисунка речной сети (D_r) и 2) множества точек бифуркации русел (D_b). Для вычисления фрактальной размерности D нами использовался клеточный (box dimension) ме-

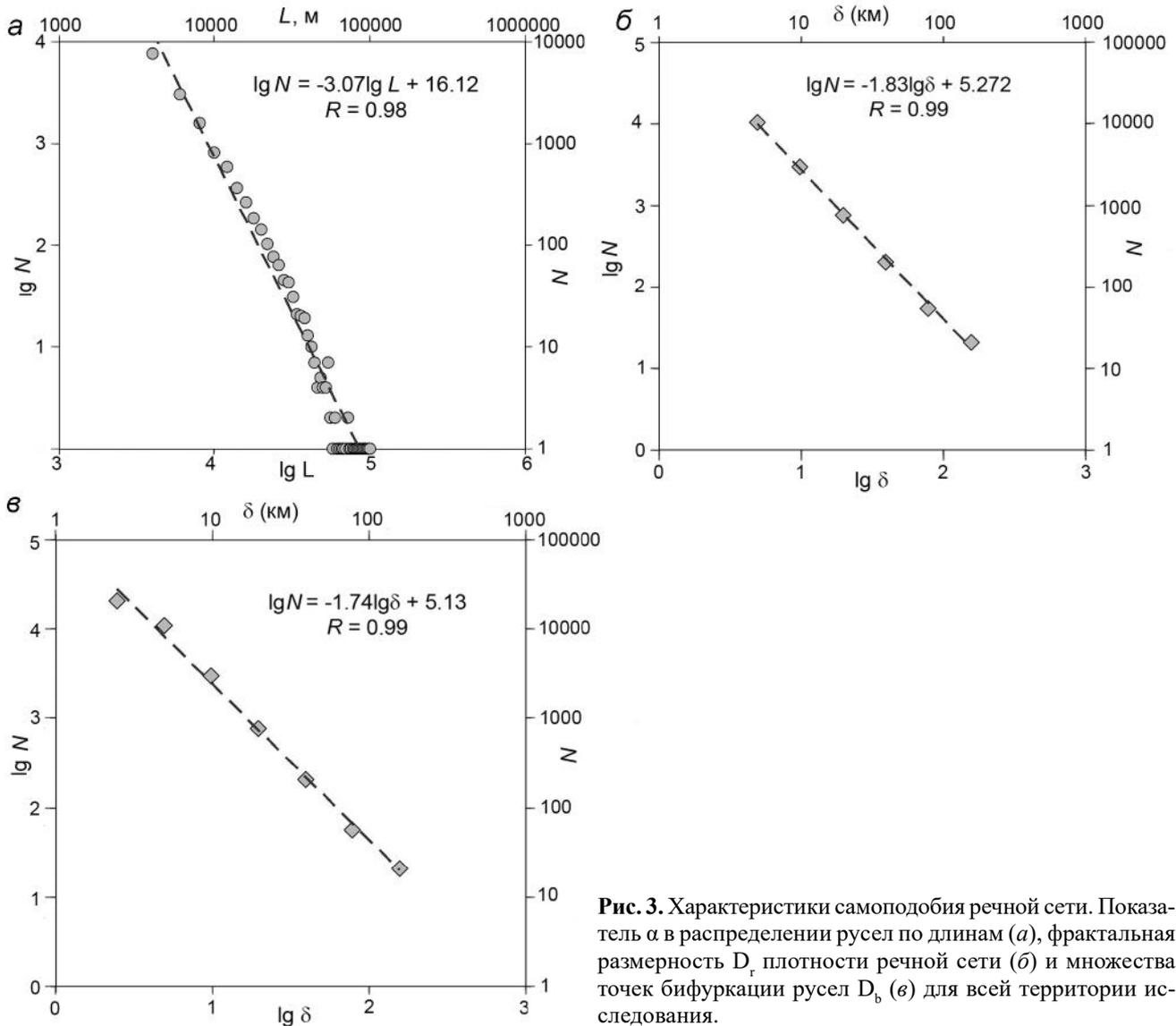


Рис. 3. Характеристики самоподобия речной сети. Показатель α в распределении русел по длинам (а), фрактальная размерность D_f плотности речной сети (б) и множества точек бифуркации русел D_b (в) для всей территории исследования.

тод [11, 21], когда исследуемый объект покрывается квадратами со стороной равной δ . При каждом следующем покрытии δ изменяется (например, в 2 раза), и подсчитывается число необходимых для этого клеток N при различных значениях δ . Аналогично вычислению α , строят зависимость $N(\delta)$ в двойном логарифмическом масштабе, область скейлинга аппроксимируют прямой линией:

$$\lg N = -D \lg \delta + c, \tag{5}$$

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

При расчете и анализе фрактальной размерности самого рисунка гидросети каждый участок русла считался линейным объектом, не имеющим структуры. Фрактальная размерность D_f для всего региона исследований в диапазоне масштабов 5–160 км

равна 1.83 ± 0.05 с коэффициентом корреляции $r = 0.99$ (рис. 3, б). Повышенная величина фрактальной размерности самого рисунка сети русел может быть связана как с извилистостью и изломанностью линий, так и с густотой самой сети, связанной с ее ветвлением. С точки зрения формирования систем водотоков и их связи с современными и неотектоническими движениями – это два разных случая, которые необходимо разделять: извилистый рисунок формируется в относительно стабильных режимах, в то время как формирование разветвленной речной сети характерно для тектонических поднятий. В обоих этих случаях значения фрактальной размерности D_f будут повышенными, и с помощью только этого параметра не получается достаточно уверенно различить тектонические режимы поднятий и опусканий.

Для характеристики степени разветвленности гидросети вычислялась фрактальная размерность множества точек ветвления (бифуркаций) русел. При этом учитывались только такие точки, в которых происходит смена порядка русел, т.е. точки слияния русел одинакового порядка и рождения русла более высокого порядка (рис. 2). Фрактальная размерность D_b для всего региона исследований в диапазоне масштабов 5–160 км равна 1.74 ± 0.05 с коэффициентом корреляции $r = 0.99$ (рис. 3, в). Повышенные значения этого параметра будут соответствовать областям, где происходит частое ветвление (смена порядков) русел, что соответствует поднятиям.

3. Распределение фрактальных характеристик по площади исследования. Следующим шагом наших исследований явился подбор масштабов и размера окон для расчета фрактальных размерностей α , D_r и D_b по площади района исследований. При анализе всех трех характеристик самоподобия гидросети мы подобрали параметры окон и масштабов с учетом следующих обстоятельств:

1) для надежного определения параметра самоподобия его диапазон масштаба δ должен быть не меньше 1 порядка;

2) нижняя граница масштабов должна принадлежать области скейлинга;

3) для создания детальной картины пространственных вариаций анализируемых характеристик верхняя граница масштабов должна быть такой, чтобы окно анализа помещалось в размер региона не сколько раз;

4) количество точек смены порядка русел значительно меньше, чем общее количество точек слияния водотоков в рисунке гидросети, так как не каждое слияние меняет их порядок (рис. 2), и рисовка таких водотоков представляет собой ломаную линию;

5) возможность адекватного сравнения характеристик самоподобия речной сети с результатами фрактального анализа сейсмичности и сети активных разломов. Детальность последних намного меньше, чем детальность первых.

По результатам проведения тестовых расчетов для анализа выбраны следующие параметры: а) для всех порядков размер окна составлял $0.5 \times 0.5^\circ$ (~40×40 км на данной широте); б) сдвиг окна (перекрытие) составлял 0.25° (~20 км); в) диапазон размеров клеток, которые использованы при вычислении, составлял от 0.05 до 0.5° (~4–40 км). Для выявления пространственных особенностей вариации фрактальной размерности речных сетей региона проводился ее расчет в скользящем окне с помощью авторской программы FrAnGeo v.3.3 [7], модернизированной для проведения настоящей работы.

Распределение степенного показателя длин русел (α) по площади исследований характеризуется линейными практически меридиональными зонами чередующихся повышенных и пониженных его значений (рис. 4, а). Как указывалось выше, повышенные значения этого параметра соответствуют режиму поднятия, пониженные – или опускания, или относительной стабильности.

Распределение фрактальной размерности рисунка речной сети (D_r) по площади исследований характеризуется также линейными зонами чередующихся повышенных и пониженных его значений, но их ориентировка не субмеридиональная, как у параметра α , а СЗ-ЮВ простирания (рис. 4, б). Напомним, что извилистый рисунок гидросети формируется в относительно стабильных режимах, в то время как формирование разветвленной речной сети характерно для тектонических поднятий. В обоих этих случаях значения фрактальной размерности D_r будут повышенными.

Распределение фрактальной размерности множества точек бифуркации русел (D_b) по площади характеризуется, в отличие от двух выше представленных α и D_r , мозаичным рисунком (рис. 4, в). Напомним, что повышенные значения этого параметра соответствуют областям с более частым ветвлением русел (смена порядков), то есть поднятиям. Отметим, что пониженные значения размерности D_r и D_b в восточной части региона у побережья Японского моря являются артефактом и связаны с тем, что реки здесь заканчиваются.

4. Комплексный параметр самоподобия. Представленные выше фрактальные характеристики в той или иной степени отражают вертикальные движения того или иного направления, но по отдельности они не позволяют напрямую проводить сопоставление с неотектоническими движениями и различать четко обстановки поднятия и опускания (см. выше). Представляется, что более корректный результат можно получить при комплексном анализе всех 3-х параметров, но простое наложение их полей, технически легко реализуемое при помощи ГИС-технологий, достаточно сложно для восприятия и анализа в печатном варианте. Это побудило авторов искать пути объединения 3-х параметров самоподобия речной сети.

При сопоставлении результатов фрактального анализа с амплитудами неотектонических движений нас интересуют не столько сами значения параметров, сколько их вариации. Мы предлагаем использование комплексного (комбинированного) параметра самоподобия PRNS (Parameter of River Network Self-similarity), вычисление которого проводится по следующей методике. Поскольку диапазоны вариаций

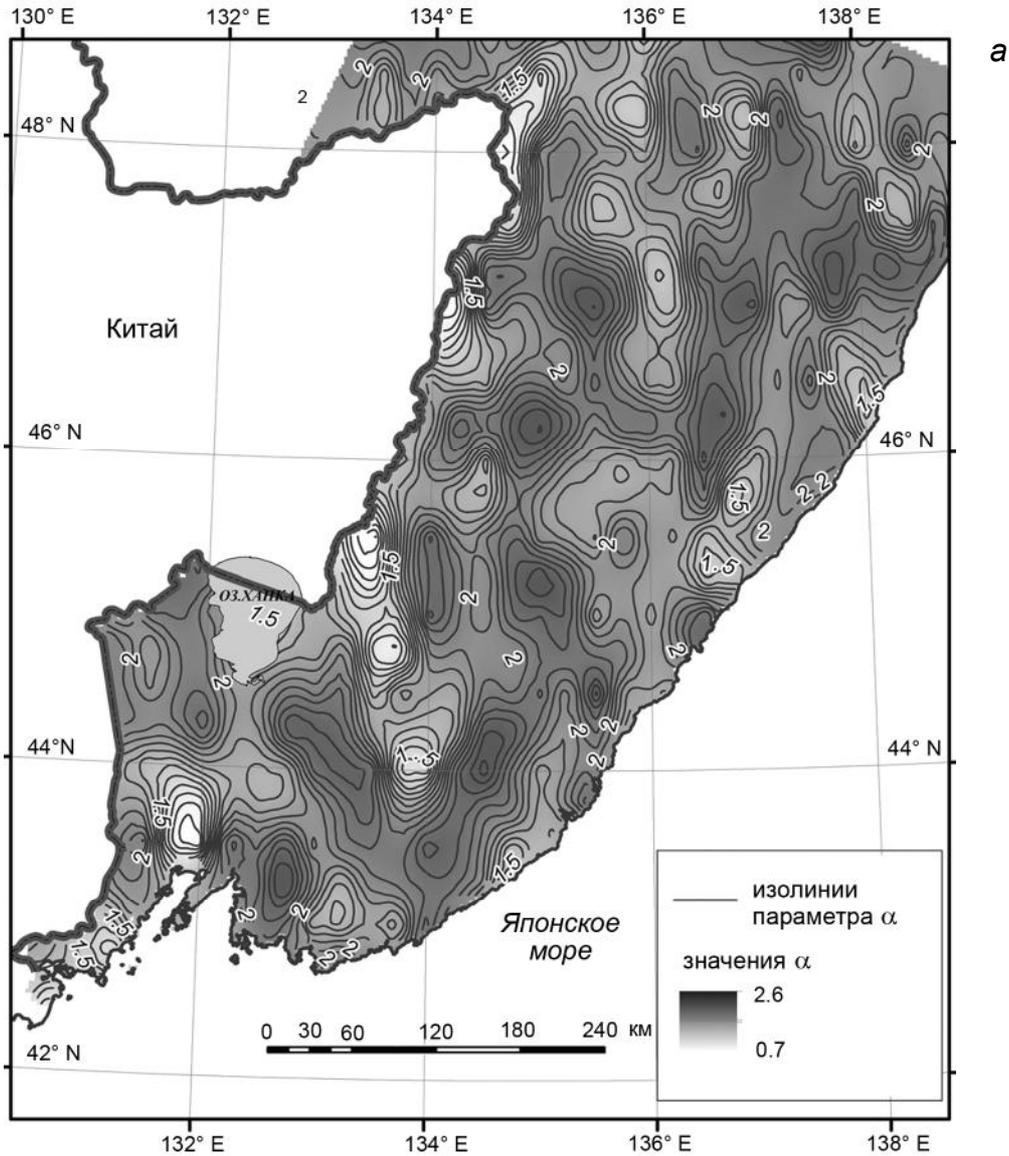


Рис. 4. Характеристики самоподобия гидросети региона, рассчитанные в скользящем окне.

a – параметр α распределения русел по длинам.

каждого из параметров D_r , D_b и α различаются, для их корректного комбинирования необходимо привести нормировку. Для этого для каждого из параметров D_r , D_b и α проводится следующее преобразование:

$$\langle D_r \rangle = \frac{D_r - \min(D_r)}{R(D_r)}; \langle D_b \rangle = \frac{D_b - \min(D_b)}{R(D_b)}; \langle \alpha \rangle = \frac{\alpha - \min(\alpha)}{R(\alpha)} \quad (6)$$

где \min – минимальные, \max – максимальные значения каждого параметра, $R = \max - \min$ – размах значе-

ний. В качестве параметра $PRNS$ предлагается сумма нормированных вариаций параметров:

$$PRNS = \langle D_r \rangle + \langle D_b \rangle + \langle \alpha \rangle \quad (7)$$

Такое комбинирование нужно для того, чтобы более корректно отразить выраженность тектонических движений того или иного знака в результирующих значениях параметра $PRNS$. На качественном уровне зависимость следующая:

- в случае опусканий $\langle D_r \rangle$ будет относительно повышенным, а $\langle D_b \rangle$ и $\langle \alpha \rangle$ – пониженными, и выражение (7) будет принимать относительно небольшие значения;

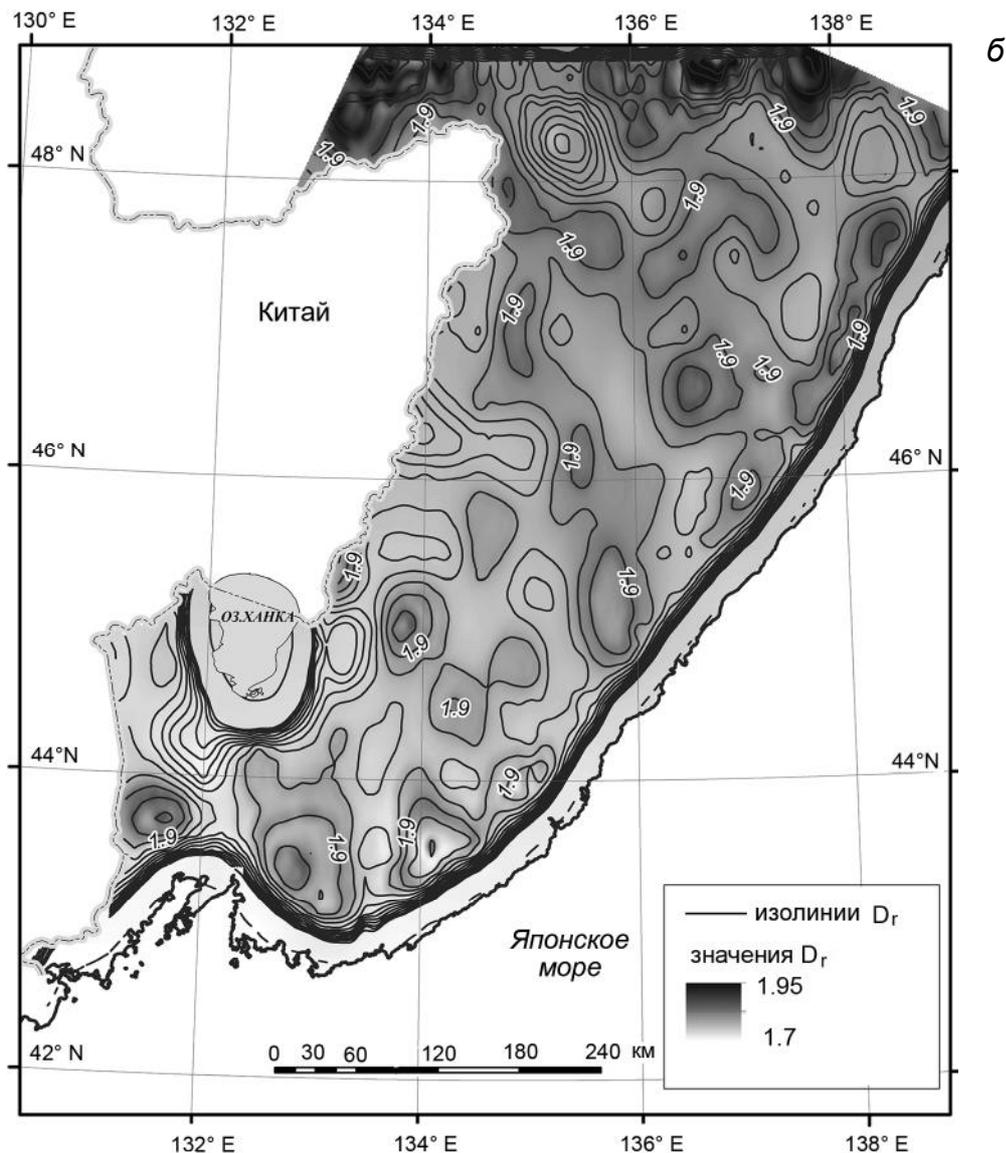


Рис. 4. Характеристики самоподобия гидросети региона, рассчитанные в скользящем окне.
б – фрактальная размерность гидросети D_f .

- для поднятий все три параметра будут иметь повышенные значения, и в результате (7) будет принимать бóльшие значения.

Поскольку каждый из нормированных параметров находится в диапазоне от 0 до 1, то и их сумма теоретически может варьироваться от 0 до 3. Однако практические значения следует ожидать в диапазоне 0.5–2.5, близкие к 3 – маловероятны. В нашем случае диапазон изменений $PRNS$ составляет от 1 до 2.3, его распределение по площади исследования показано в изолиниях на рис. 5. Отметим, что предлагаемый параметр является новым, и в настоящей работе мы тестируем возможность и эффективность его применения.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФРАКТАЛЬНОГО И МОРФОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗОВ

На основании имеющихся исходных данных по алгоритму, описанному И.И. Нгумановым с соавторами [14], модифицированному нами для ГИС ArcMap, был построен набор монобазисных и разностных поверхностей, отражающих развитие рельефа в период между заложением водотоков разных порядков [22]. Монобазисные поверхности интерполировались линейно со сглаживанием методом ближайшего окружения. Анализ проводился только по водотокам 1–6-го порядков, поскольку водотоки старших порядков являются преимущественно транзитными, с вырабо-

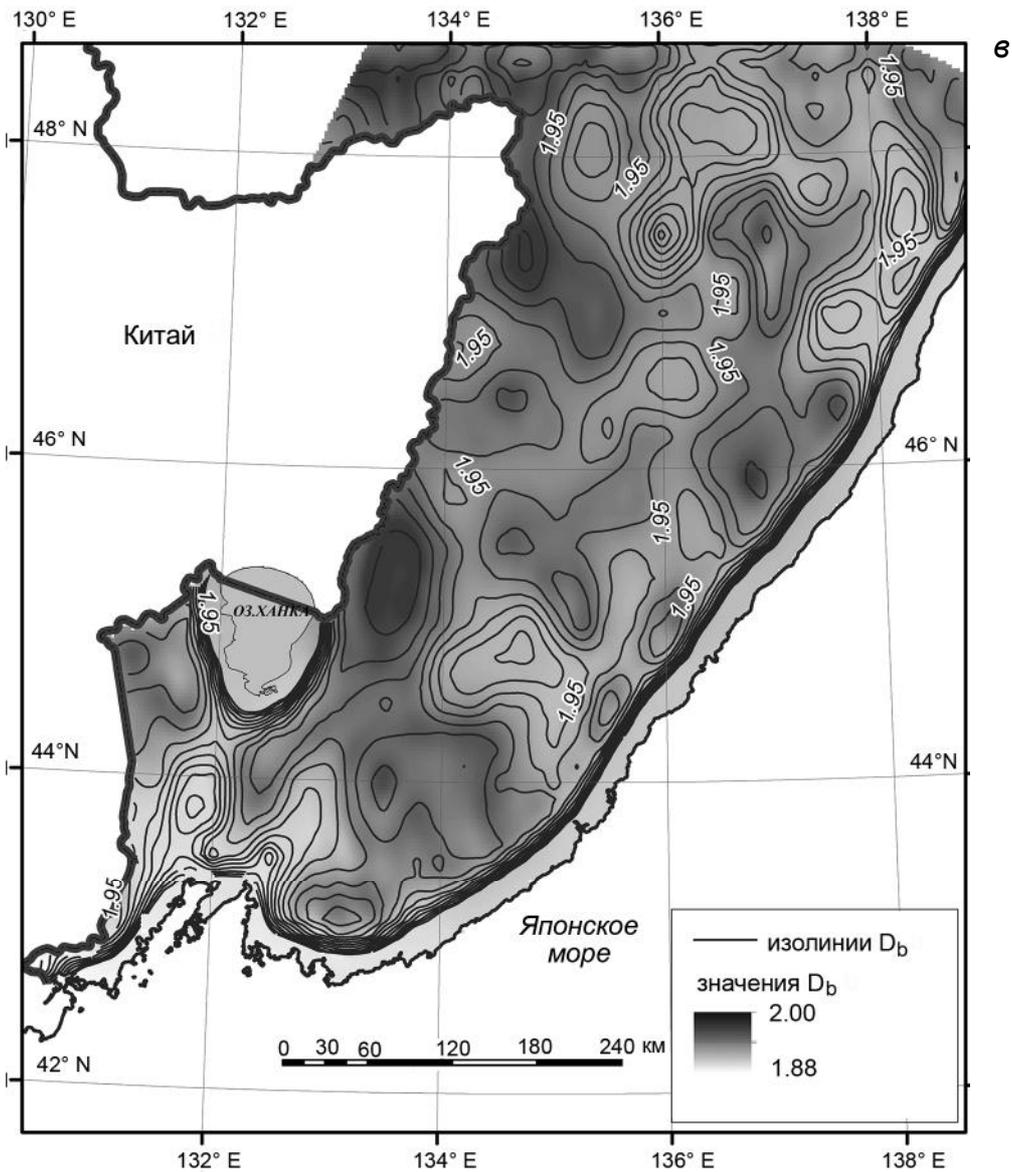


Рис. 4. Характеристики самоподобия гидросети региона, рассчитанные в скользящем окне.

в – фрактальная размерность множества точек бифуркации D_b .

таным профилем равновесия, и их количество недостаточно для достоверной интерполяции базисных поверхностей.

Поскольку рисунок гидросети формировался на протяжении всего неотектонического этапа развития, наиболее обоснованным представляется сопоставление результатов анализа самоподобия с разностной поверхностью 1–6-го порядков, отражающей суммарное изменение рельефа с олигоцена до конца плейстоцена, произошедшее как вследствие вертикальных неотектонических движений, так и в результате процессов эрозии и денудации (рис. 5, цветной фон). Данная разностная поверхность отражает суммарный

тренд вертикальных движений за неотектонический этап, демонстрирующий воздымание Сихотэ-Алиня восточнее Центрального Сихотэ-Алиньского разлома и преобладание процессов денудации и эрозии более древнего рельефа западнее него, однако не отражает истории его развития. Стадийность развития рельефа оказывает заметное влияние на формирование рисунка гидросети [18], однако ее исследование достаточно объемно, и данной проблеме посвящена отдельная работа [19].

Методика морфоструктурного анализа не позволяет корректно выявлять и оценивать отрицательные движения, однако распространение западнее

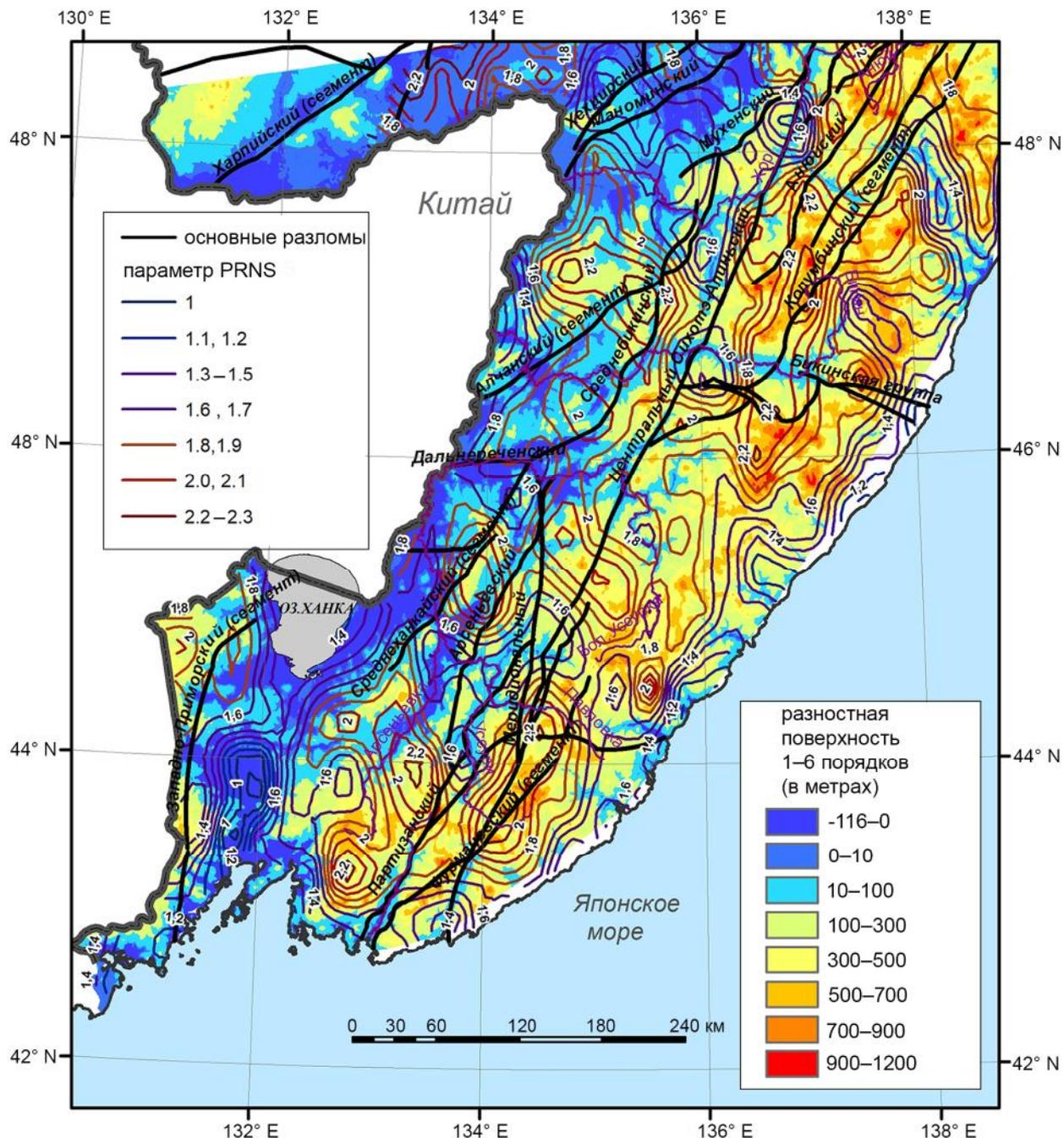


Рис. 5. Сопоставление комплексного параметра самоподобия PRNS с разностной поверхностью между монобазисными поверхностями 1-го и 6-го порядков.

Центрального Сихоте-Алиньского разлома широких долин и впадин – Средне-Амурской на севере, Суйфуно-Ханкайской на юге и Алчанской между ними, с приращением рельефа близкого к нулю – может свидетельствовать о том, что для данных территорий были характерны не только процессы денудации более древнего рельефа, но также и опускание территории с компенсационным осадконакоплением в

пределах осадочных бассейнов. Не вдаваясь подробно в историю становления мезозойско-кайнозойских осадочных бассейнов на этой территории (с севера на юг: Средне-Амурский, Алчанский, Раздольненский и Партизанско-Суходольский), укажем только, что практически все они обязаны образованию односторонних грабенов, инициированных сочетанием масштабных левосторонних сдвигов по разломам системы

Тан-Лу и изостатическим выравниванием участков зоны коллизии и акреции, обладавших повышенной мощностью земной коры [3].

Восточнее Центрального Сихоте-Алиньского разлома воздымание хребта происходило также неравномерно: более интенсивно на юге и на севере изучаемой территории – до 1 км и выше, где наравне с воздыманием проявлялись также процессы эрозии, и менее интенсивно в центральной части – в среднем до 400–600 м, между Южно-Приморской и Бикинской зонами разломов, где больше выражены процессы денудации.

Сопоставление разностной поверхности 1-го и 6-го порядков с пространственным распределением комплексного параметра *PRNS* гидросети (рис. 5) демонстрирует, что в целом максимумы параметра *PRNS* совпадают с областями наибольшего приращения рельефа, а минимумы – с областями его наименьшего приращения или с областями наиболее значительной эрозии. Однако такое совпадение не является повсеместным, и отмечаются области, для которых характерна обратная корреляция. На наш взгляд, это может быть объяснено именно стадийностью развития рельефа, на которую мы указывали выше, и тем, что на разных стадиях для одной и той же территории могла быть характерна различная интенсивность или даже инверсия неотектонического режима. Более молодая гидросеть формировала рисунок, свойственный для более молодых движений, но при этом более древняя и более развитая гидросеть оставалась консервативной и отражала направленность движений, происходивших на предшествующей стадии развития рельефа, что и отражают результаты фрактального анализа [19]. Некоторое смещение максимумов и минимумов поля *PRNS* относительно структур, особенно имеющих небольшие размеры, узких впадин и поднятий, может объясняться «размазыванием» значений при усреднении в скользящем окне.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ГИДРОСЕТИ С НЕОТЕКТОНИЧЕСКИМИ ПОСТРОЕНИЯМИ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ

Для сопоставления результатов анализа самоподобия речной сети, выполненного в настоящей работе, мы воспользовались двумя опубликованными работами: 1) неотектонической схемой юга Дальнего Востока России (рис. 6, *а*) С.В. Горкуши с соавторами [4] и 2) картой новейшей тектоники Северной Евразии (рис. 6, *б*) под редакцией А.Ф. Грачева [9]. Анализ неотектонических построений для юга Сихотэ-Алиня из этих работ показывает, что положения относительных максимумом и минимумов новейших

вертикальных движений в целом совпадают (рис. 6, *а* и 6, *б*). И если абсолютные величины отрицательных вертикальных движений также в целом совпадают – максимальные значения для Средне-Амурской впадины составляют -1 км и в том, и в другом случаях, то для положительных вертикальных движений такого согласия нет. Практически для всех положительных структур Сихотэ-Алиньского блока восточнее Центрального Сихотэ-Алиньского разлома отмечается существенная разница от 500 м на юге до 1 км на севере (рис. 6, *а* и 6, *б*). Полагаем, что это может быть связано с различным определением начала неотектонического этапа. Согласно нашим расчетам монобазисных поверхностей по водотокам 1–6-го порядков, величины максимальных положительных вертикальных движений здесь достигают 1200 м, при средней их величине 700–900 м (рис. 5).

Сравнительный анализ неотектонических построений предшественников (рис. 6, *а* и 6, *б*), с одной стороны, и карты *PRNS* настоящей работы (рис. 6, *в*), с другой, показывает, что в основных чертах результаты сходятся: относительные максимумы и минимумы параметра *PRNS* близки или совпадают по местоположению с центрами положительных и отрицательных вертикальных неотектонических движений. Тем не менее, следует отметить и отличия, выражающиеся в основном в деталях и конфигурации контуров максимумов. Нам представляется, что такие различия могут проявляться вследствие сложной и стадийной истории формирования сети водотоков, что существенно влияет на параметры самоподобия. В то же время, как уже отмечалось выше, в большинстве случаев на картах и схемах неотектоники отражаются амплитуды движений суммарно за весь неотектонический этап.

На рис. 6, *в*, наряду с параметром *PRNS*, показано положение эпицентров коровых сейсмических событий в регионе, согласно банку данных о землетрясениях лаборатории сейсмологии и сеймотектоники ИТиГ ДВО РАН, составленному по геоисторическим материалам и каталогам ГС РАН по 2015 год. Как видно на рисунке, положение большинства эпицентров приходится на граничные зоны между относительными максимумами и минимумами ареалов *PRNS*, то есть вытянутые сейсмические области оконтуривают поднятия, что связано с блоковым характером неотектонических вертикальных движений, о чем указывалось и ранее [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований на основании морфоструктурного анализа установлено, что формирование рельефа изучаемого региона на

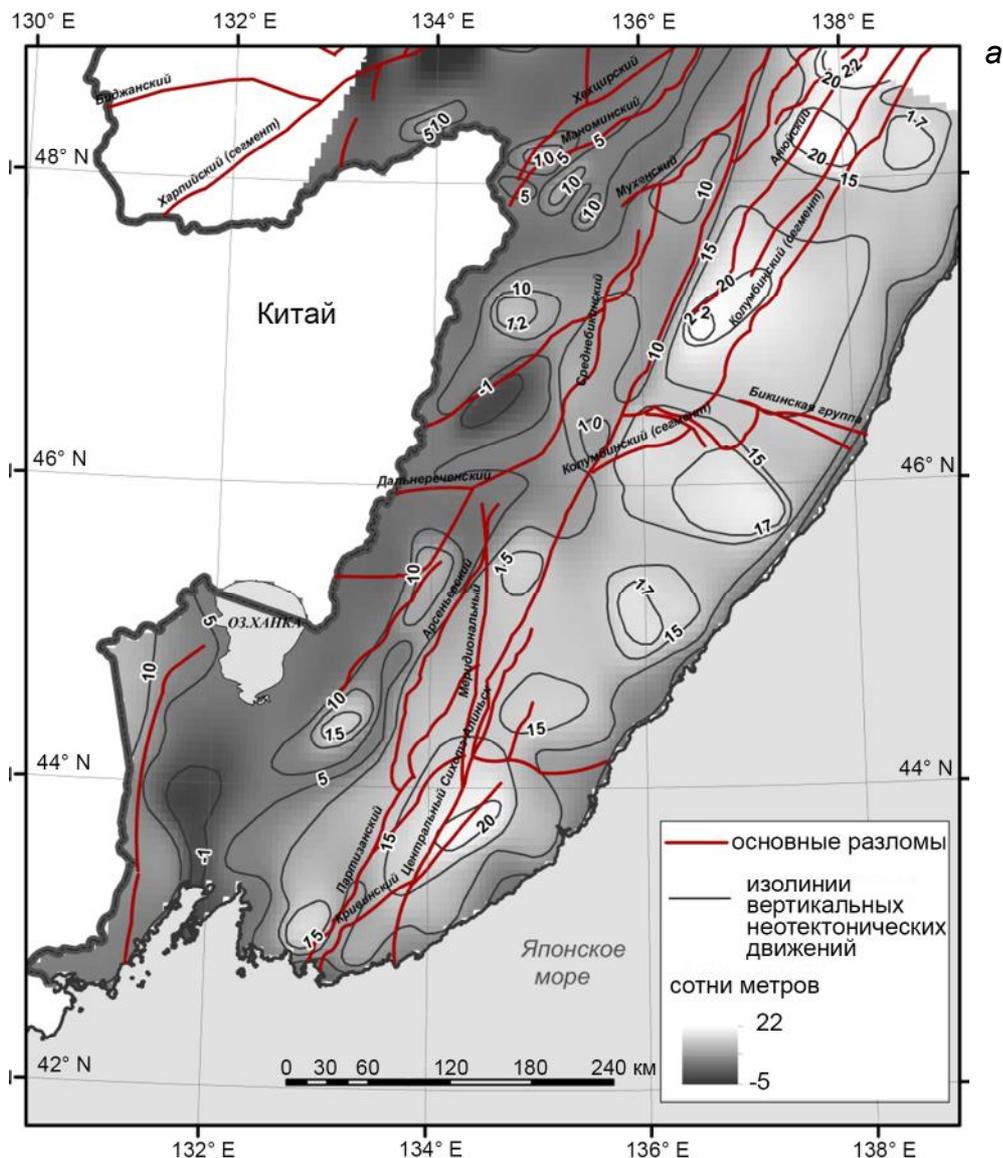


Рис. 6. Сопоставление комплексного параметра самоподобия речной сети юга Дальнего Востока России с данными неотектонической схемы [4] и карты новейшей тектоники [9].

a – фрагмент неотектонической схемы, изолинии – вертикальные движения в сотнях метров.

неотектоническом этапе происходило в несколько этапов, причем наиболее активное воздымание происходило на ранних стадиях, при этом неравномерно. Суммарное изменение рельефа с олигоцена до конца плейстоцена, произошедшее как вследствие вертикальных неотектонических движений, так и в результате процессов эрозии и денудации, отражается в разностной поверхности 1–6-го порядков. Показано, что на протяжении всего неотектонического этапа восточнее Центрально-Сихоте-Алиньского разлома преобладало воздымание, в то время как западнее него с определенного времени наиболее значитель-

ную роль имели процессы денудации и эрозии более древнего рельефа и опускание территории с компенсационным осадконакоплением в пределах осадочных бассейнов. Воздымание Сихотэ-Алинь восточнее Центрального Сихотэ-Алиньского разлома происходило также неравномерно, более интенсивно на юге и на севере изучаемой территории, где наравне с воздыманием проявлялись также процессы эрозии, и менее интенсивно в центральной части, между Южно-Приморской и Бикинской зонами разломов, где больше выражены процессы денудации. Выявлено, что стадийность неотектонического этапа существен-

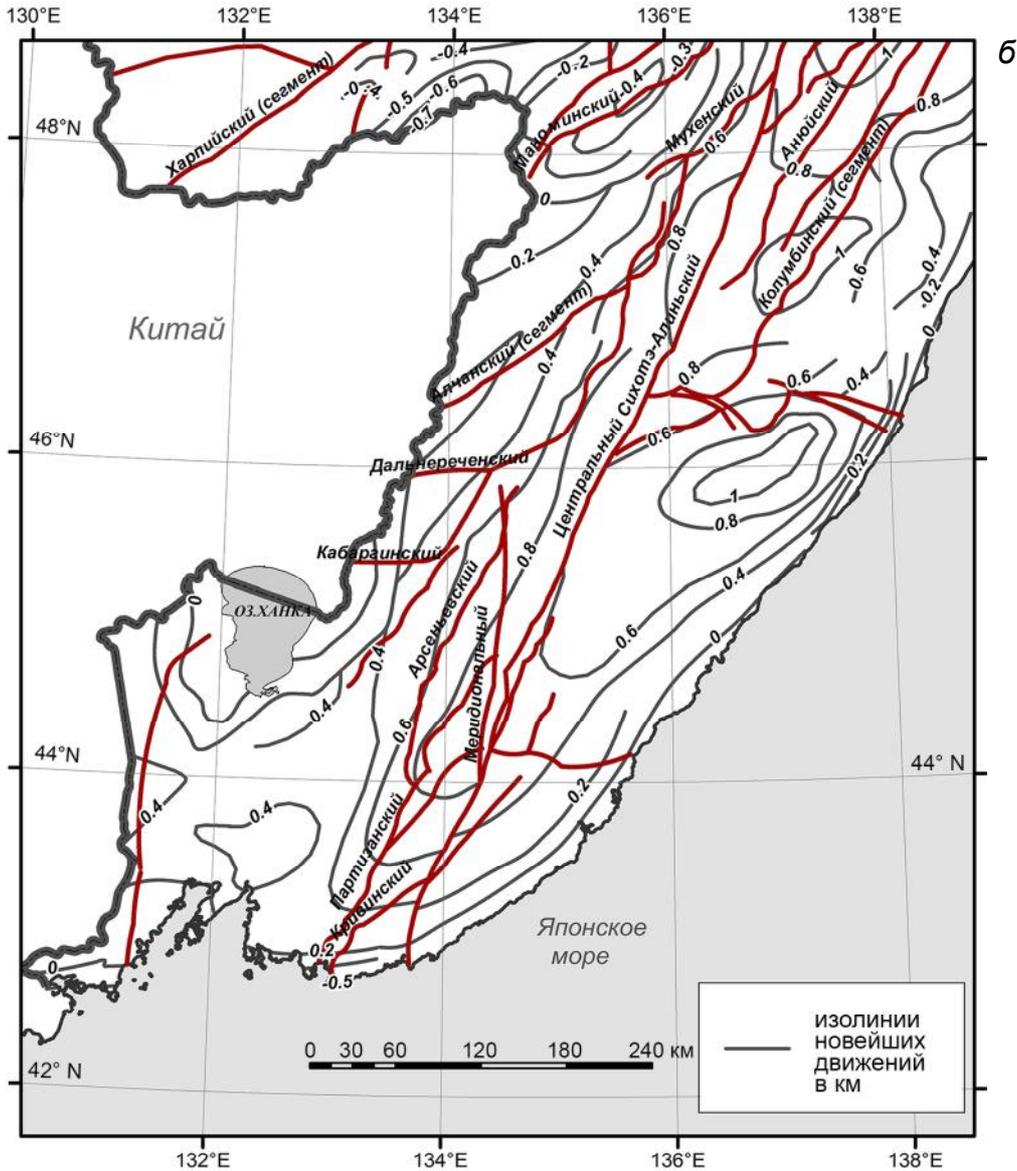


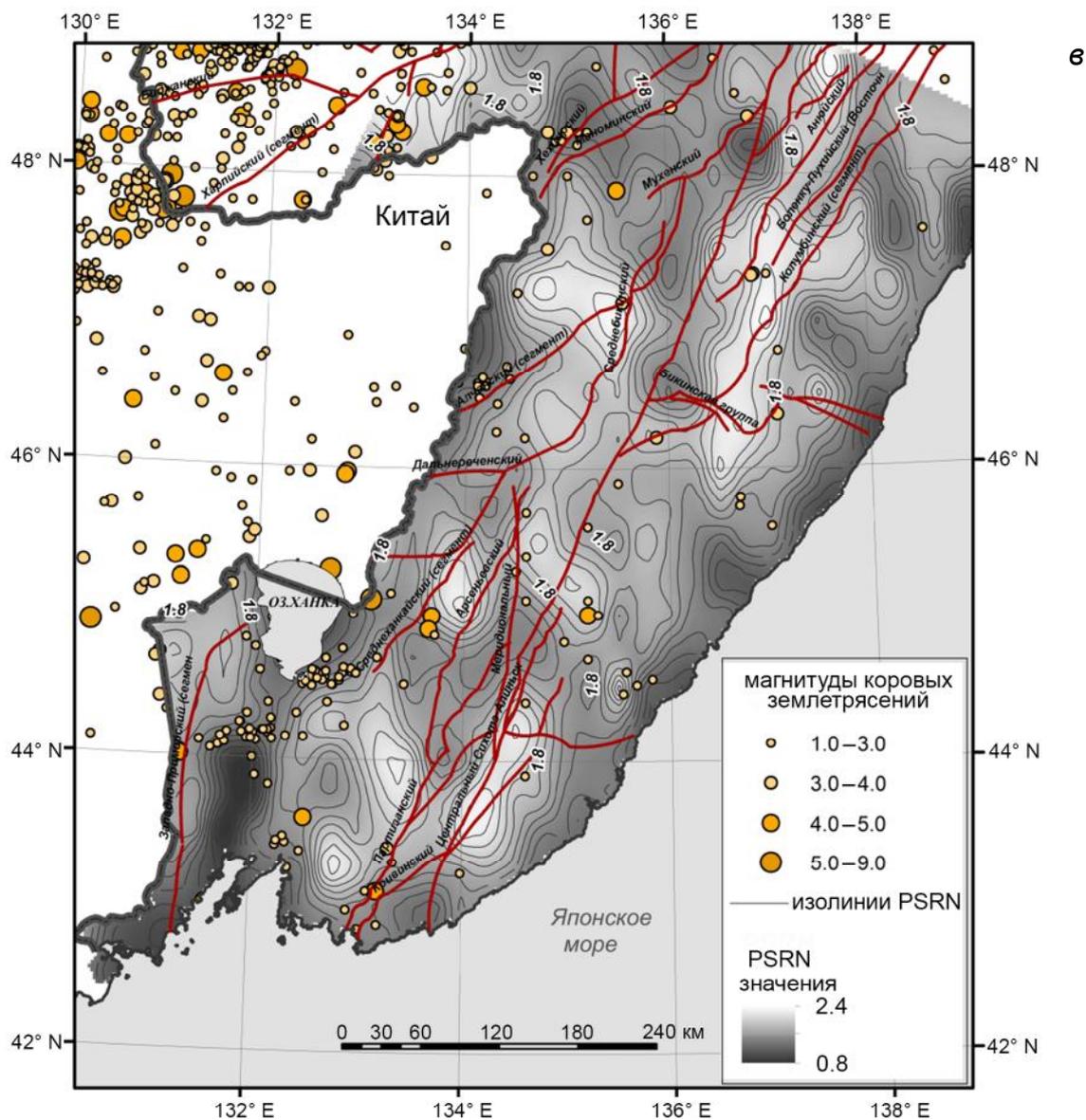
Рис. 6. Сопоставление комплексного параметра самоподобия речной сети юга Дальнего Востока России с данными неотектонической схемы [4] и карты новейшей тектоники [9].

б – фрагмент карты новейшей тектоники Северной Евразии, изолинии – новейшие движения в км.

но отразилась на формировании современного рисунка гидросети.

С целью выявления новейших тектонических движений на основании анализа рисунка гидросети предложен новый комплексный параметр *PRNS* для характеристики ее самоподобия, являющийся комбинацией степенного показателя в распределении русел по длинам, фрактальной размерности русел и фрактальной размерности точек смены порядка русел. По нашему мнению, данный параметр более корректен и нагляден при сопоставлении характеристик самоподобия гидросети с неотектоническими движениями.

Проведено сопоставление результатов морфоструктурного и фрактального анализов, которое показало хорошую корреляцию этих двух методов. Ареалы относительных максимумов *PRNS* совпадают с областями наибольших восходящих неотектонических движений (приращение рельефа), а минимумов – с областями наименьших приращений рельефа или с областями наиболее значительной эрозии. При этом к граничным зонам между относительными максимумами и минимумами ареалов *PRNS* приурочено положение большинства эпицентров коровых землетрясений, то есть вытянутые сейсмиче-



6

Рис. 6. Сопоставление комплексного параметра самоподобия речной сети юга Дальнего Востока России с данными неотектонической схемы [4] и карты новейшей тектоники [9].

v – комплексный параметр самоподобия речной сети (PRNS) юга Дальнего Востока России, рассчитанный в скользящем окне 40×40 км.

ские области оконтуривают поднятия, что связано с блоковым характером неотектонических вертикальных движений.

Проведенный комплексный анализ продемонстрировал, что в регионах со стадийным характером неотектонического развития проведение фрактального анализа гидросети с целью выявления направленности неотектонических движений сталкивается с дополнительными трудностями, обусловленными особенностями развития гидросети на каждом из этапов развития и консервативностью ее рисунка, отра-

жающего особенности развития рельефа на разных стадиях. Разрешение возникающих противоречий и неоднозначных решений требует дальнейшей более детальной и углубленной проработки методик.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов рукописи А.В. Иванова и В.И. Усикова за ознакомление с работой и сделанные замечания, существенно улучшившие ее восприятие, и Е.Ю. Диденко за помощь при техническом оформлении статьи.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00015). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бастраков Г.В. Эрозионная прочность горных пород // Геоморфология. 1977. № 2. С. 52–55.
2. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. СУБД. 2012. № 7. С. 36–39.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России (в 2 кн.) / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.
4. Горкуша С.В., Онухов Ф.С., Корчагин Ф.Г. Сейсмичность и неотектоника юга Дальнего Востока России // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 5. С. 61–68
5. Диденко А.Н., Быков В.Г., Шестаков Н.В., Бормотов В.А., Герасименко М.Д., Коломиец А.Г., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Сорокин А.А. Землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. Данные сети деформационных и сейсмологических наблюдений ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 3. С. 18–21.
6. Диденко А.Н., Захаров В.С., Гильманова Г.З., Меркулова Т.В., Архипов М.В. Формализованный анализ коровой сейсмичности Сихотэ-Алиньского орогена и прилегающих территорий // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 2. С. 58–69.
7. Захаров В.С. Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2011. № 6. С. 10–17.
8. 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>.
9. Карта новейшей тектоники Северной Евразии / Гл. ред. А.Ф. Грачев. Электронная версия. Департамент информационных систем АООТ «ВНИИЗарубежгеология». 1997. <http://www.geokniga.org/maps/3465>
10. Короткий А.М., Коробов В.В., Скрыльник Г.П. Обвалы и оползни юга Российского Дальнего Востока // Геоморфология. 2009. № 2. С. 50–59.
11. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. – Ижевск: Ин-т компьютерных исследований. 2002. 656 с.
12. Мельник М.А., Поздняков А.В. Фрактальный анализ эрозионно расчлененного рельефа: методологические подходы // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2007. № 301. С. 201–205.
13. Мельник М.А., Поздняков А.В. Фракталы в эрозионном расчленении поверхности и автоколебания в динамике геоморфосистем // Геоморфология. 2008. Т. 3. С. 86–95. doi:10.15356/0435-4281-2008-3-86-95
14. Нгуманов И.И., Нгуманова Е.В., Чернова И.Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казан. ун-т, 2016. 53 с.
15. Онухов Ф.С., Меркулова Т.В. Вращение блоков земной коры между сдвиговыми зонами Нижнего Приамурья (по морфоструктурным данным) // Геоморфология. 2017. № 4. С. 64–75.
16. Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. № 1. С. 3–14. doi:10.15356/0435-4281-2014-1-3-14.
17. 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.
18. Симонов Д.А., Захаров В.С., Брянцева Г.В. Комплексный структурно-геоморфологический, структурно-морфологический и фрактальный анализ вертикальных новейших движений Керченского полуострова // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2019. № 5. С. 19–29.
19. Симонов Д.А., Захаров В.С., Гильманова Г.З., Диденко А.Н. Новейшие вертикальные движения Южного Сихотэ-Алиня и характеристики самоподобия гидросети региона // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2019. № 3. С. 25–36.
20. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Горнов П.Ю., Тимофеев А.В., Валитов М.Г., Бойко Е.В. Современные движения континентальной окраины Дальнего Востока России по результатам GPS-наблюдений // Вестн. СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 2. С. 88–102.
21. Федер Е. Фракталы. М: Мир, 1991. 260 с.
22. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 232 с.
23. Чупкиова С. А. Фрактальные методы выявления скрытой регулярности в эрозионном расчленении поверхности (на примере анализа Саяно-Тувинского нагорья, Республика Тува): Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Томск, 2010. 16 с.
24. Dombradi E., Timar G., Bada G., Cloetingh S., Horvath F. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian–Pannonian system // Global Planet. Change. 2007. V. 58. P. 197–213. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.02.011.
25. 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. 2014. V. 172. P. 1975–1984. doi: 10.1007/s00024-014-0910-z.
26. Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1988. V. 54, N 11. P. 1593–1600.
27. Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Prytkov A.S., Ekstrom G. Rapid postseismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011 // J. Geophys. Res. 2013. V. 118, N 7. P. 3691–3706.
28. Pelletier J.D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. B4. P. 7359–7375.
29. Search Earthquake Catalog: U.S. Geological Survey, 2019. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

30. Strahler A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology // Transactions of the American Geophysical Union. 1957. V. 38, N 6. P. 913–920.
31. Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. 2nd edn. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.
32. USGS Earth resources observation and science (EROS) Center. <https://www.usgs.gov/centers/eros>. (дата обращения 01.12.2019).
33. Zakharov V.S., Didenko A.N., Gil'manova G.Z., Merkulova T.V. Characteristics of self-similarity of seismicity and the fault network of the Sikhote Alin orogenic belt and the adjacent areas // Geodynamics & Tectonophysics. 2019. V. 10, N 2. P. 541–669. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0425>.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

после доработки 20.03.2020 г.

принята к печати 23.07.2020 г.

V. S. Zakharov, D. A. Simonov, G. Z. Gilmanova, A. N. Didenko

Fractal Geometry of the River Network and Neotectonics of the Southern Sikhote-Alin

A new complex parameter is proposed to characterize the self-similarity of a river network, that is, the parameter of river networks self-similarity (PRNS), which is a combination of the exponent in the distribution of channels along the lengths, fractal dimension of channels, and fractal dimension of points of channel order change, which is more correct when compared with neotectonic movements. A comprehensive analysis of the self-similarity of the river network model for the southern Sikhote-Alin derived from the Digital Elevation Model (DEM) based on the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) image was performed. Comparison of the results of morphostructural and fractal analyses showed a good correlation of these two methods. PRNS relative maxima coincide with areas where ascending neotectonic movements are of the largest amplitude (increment of relief), while minima coincide with areas either of the least increment of relief or where erosion rates are the greatest. At the same time, most epicenters of crustal earthquakes are confined to the boundary zones between PRNS relative maxima and minima, that is, uplifts are flanked by elongated seismic areas, which is related to the block nature of neotectonic vertical movements.

Key words: river network, neotectonics, fractal and morphostructural analyses, southern Sikhote-Alin, Far East of Russia.