



Фрактальные характеристики речной сети Юга Сихотэ-Алиня на основе данных SRTM (неотектонический аспект)

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

1. Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

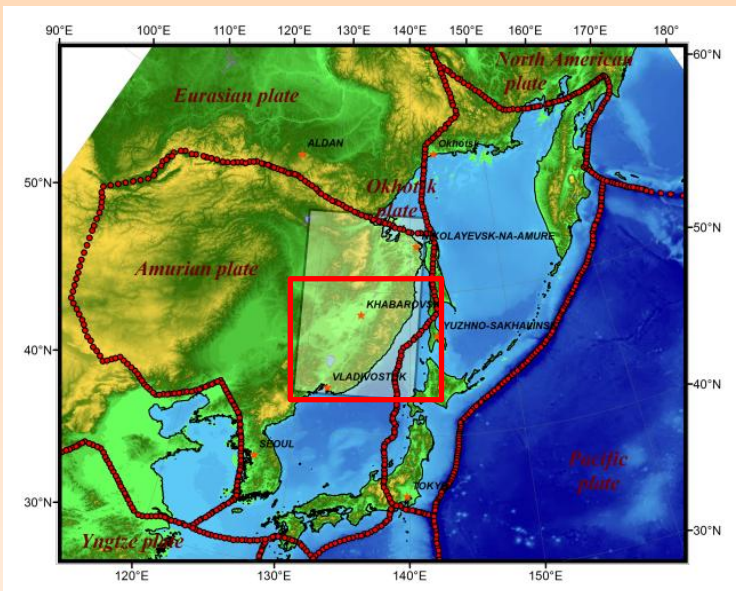
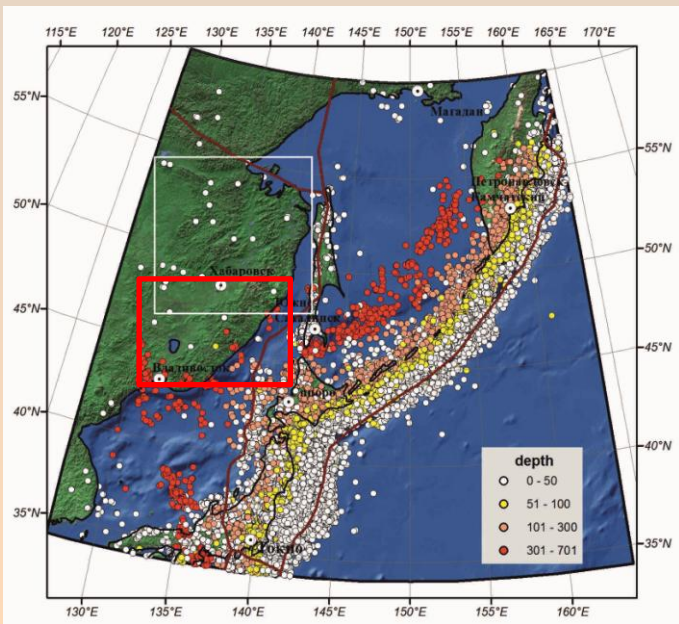
2. Институт тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН

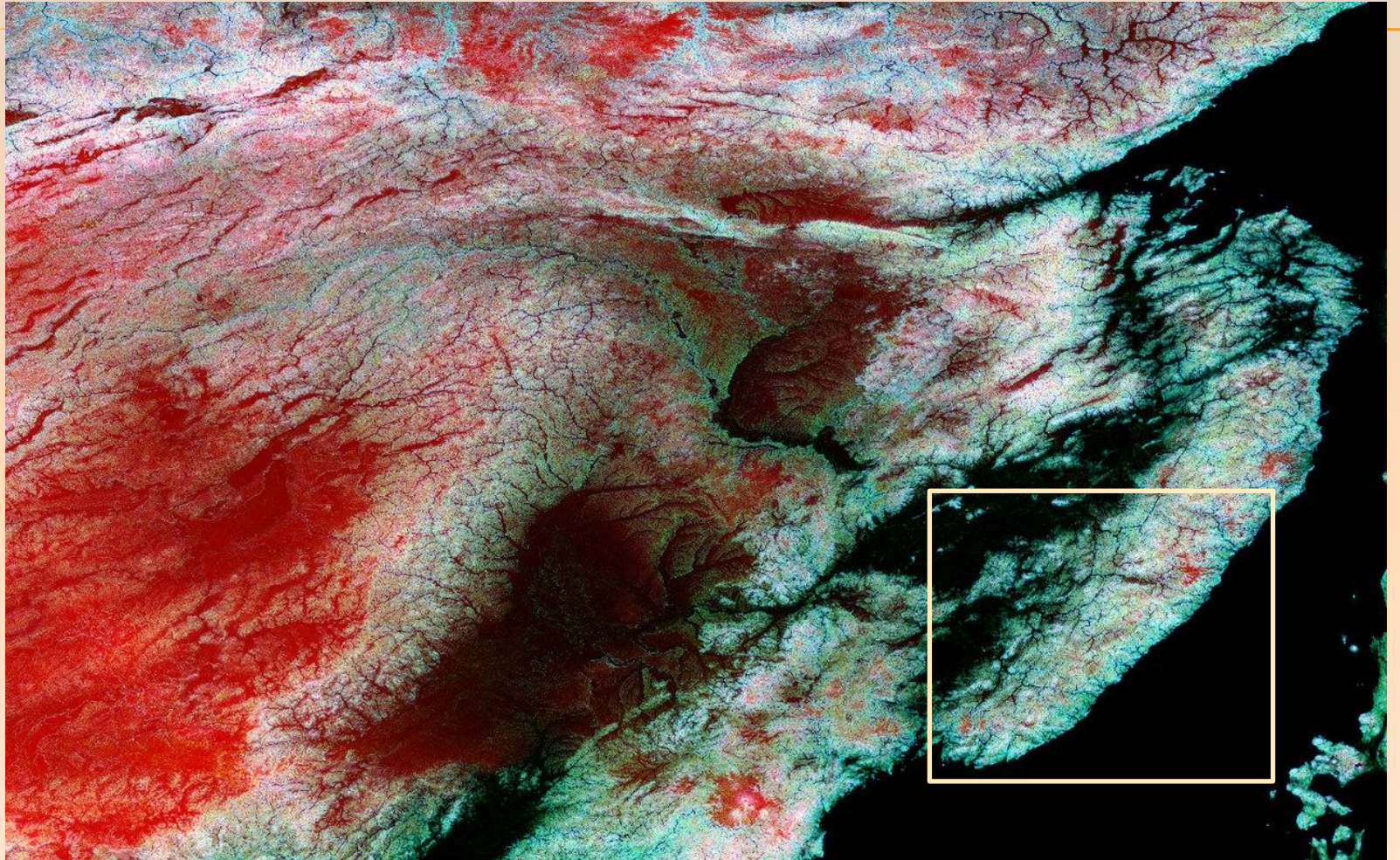
3. Тихоокеанский государственный университет

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

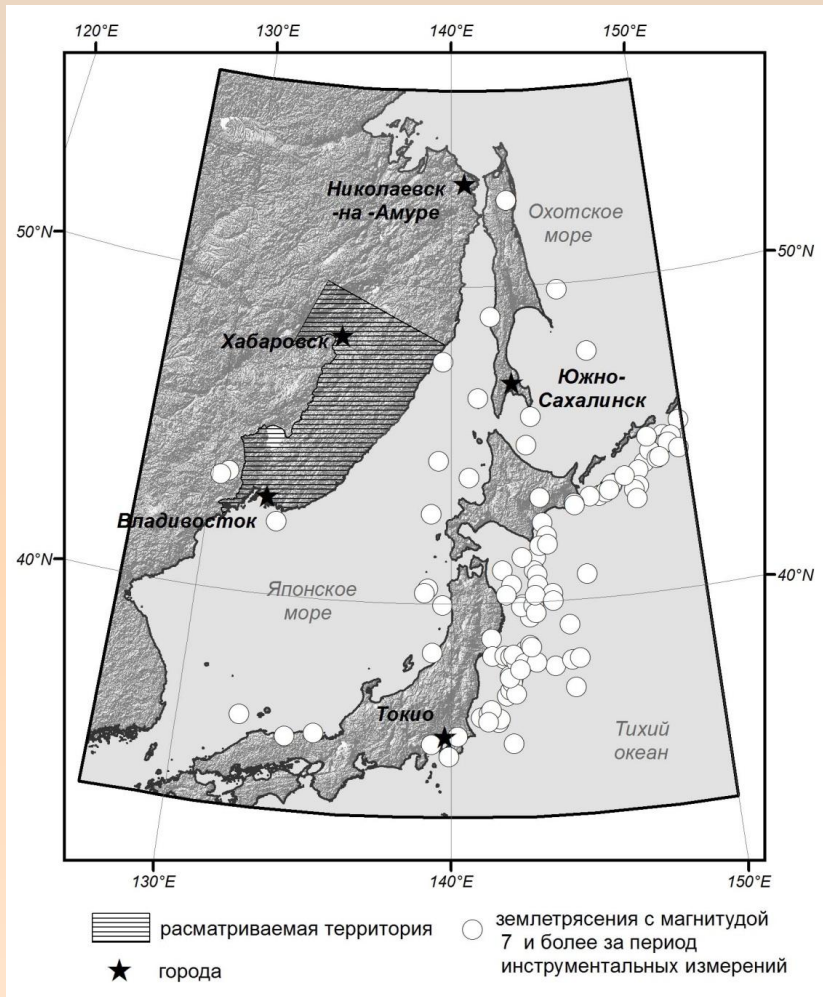
Географическая близость территории Дальнего Востока России к северо-западному сегменту Тихоокеанского огненного кольца (зона субдукции океанической Тихоокеанской плиты под континентальные Амурскую, Евразийскую, Северо-Американскую и субконтинентальную Охотоморскую плиты) предопределила здесь действие на протяжении миллионов лет таких природных процессов как вулканизм и землетрясения. Спорадически эти процессы приобретают катастрофический характер, и могут являться спусковыми механизмами для опасных катастрофических явлений как цунами, оползни, лавины и др.

Основной до сих пор активной геотектонической структурой юга Дальнего Востока России является Сихотэ-Алинь-орогенный пояс. Учитывая, что почти 60% населения Дальневосточного федерального округа проживает в зоне его действия, наблюдения за **неотектоническими** явлениями на этой территории являются задачей важной не только в научном плане, но и в социальном отношении.





Область исследований



Необходимым этапом для выявления общей структурной организации и характера сеймотектонических движений в сейсмоопасных регионах, является сопоставление данных о **сейсмичности**, с одной стороны, и **новейших и современных тектонических движений**, с другой.

В последние 20 лет изучению **неотектонических** движений Сихотэ-Алинского 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.*

Ранее авторами был проведен комплексный анализ характеристик самоподобия сейсмичности и сети разломов в пределах Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающих территорий. [Диденко и др. 2017, Zakharov et al. 2019]

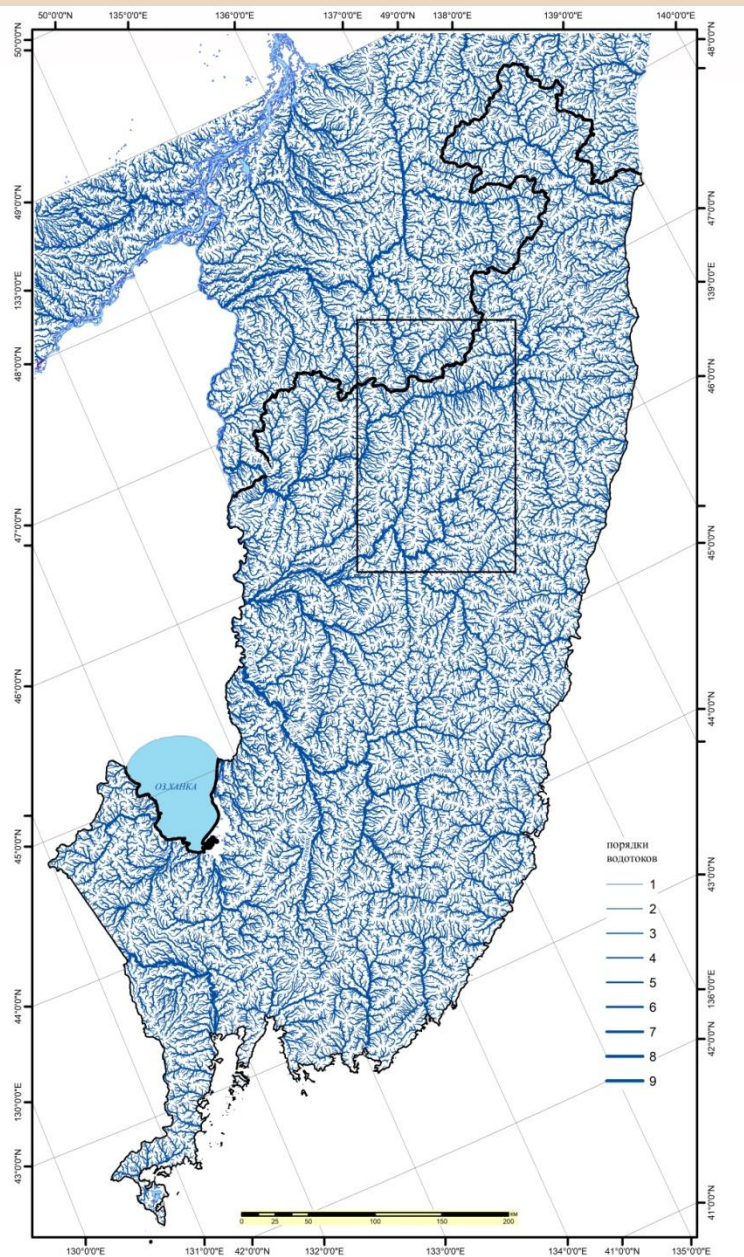
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

- ✘ Гидросеть реагирует на новейшие и современные тектонические движения; при положительных вертикальных движениях река будет врезаться в коренные породы, при отрицательных – аккумулялировать речные осадки, при стабильности территории будут образовываться многочисленные меандры.

Величина показателя самоподобия (фрактальной размерности) речной сети отражает ее **густоту** [Мельник и др. 2008,2007; Сидорчук 2014; Dombradi E. et al 2007].

- ✘ Выявлена тенденция к общему увеличению фрактальной размерности с **высотой рельефа**, а также определенная корреляция с **направлением вертикальных движений**. **Фрактальный подход** существенно увеличивает возможности количественного описания речных и эрозионно-русловых 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 сопоставление его результатов с особенностями неотектонического развития региона.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОСЕТИ



В работах Мандельброта (2002), Федер (1991) и др [28, 30, 31] рассмотрены основные соотношения, связывающие ряд базовых параметров речных бассейнов, – длина бассейна данного порядка L , площадь водосбора A , рельеф бассейна для потока данного порядка R , количества 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 Pelletier (1999)[28] даны оценки их величин:

p варьирует 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 соотношения носят степенной характер, это позволяет, помимо качественного анализа, использовать и количественное описание особенностей гидросети на основе применения подходов фрактальной геометрии.

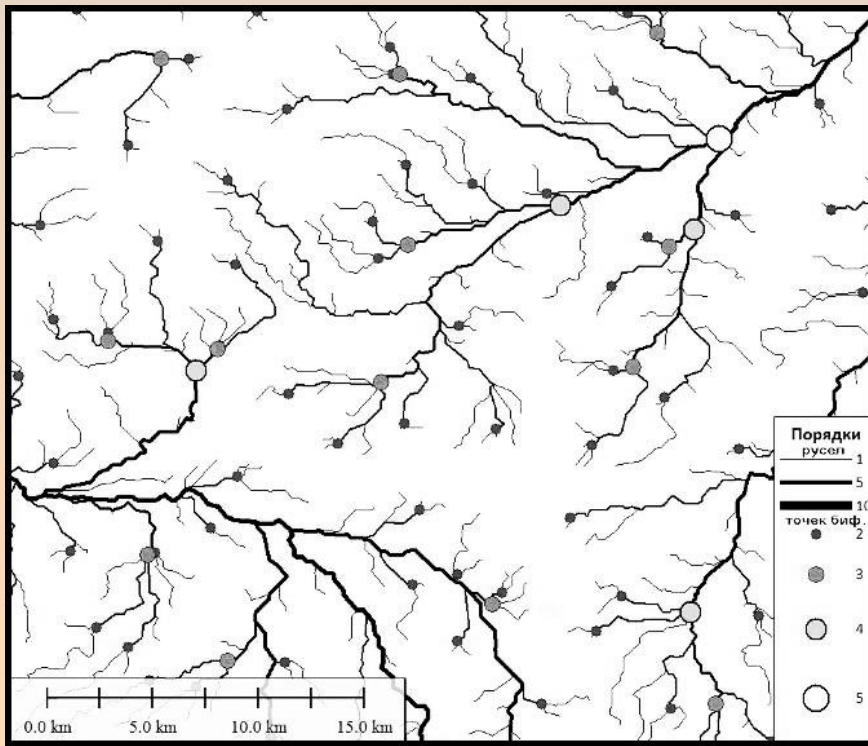


Рисунок речной сети региона, был рассчитан на основе цифровой модели рельефа **SRTM** с разрешением 90 метров (модель восьминаправленного стока [24,26]).

Рассчитанные водотоки были классифицированы на порядки согласно схеме, по которой порядок долины повышается только при слиянии двух водотоков, имеющих порядок на единицу меньше, 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** м² (200 элементарных ячеек ЦМР SRTM). Первый порядок присваивался водотокам с минимальным, указанным выше водосборным бассейном. 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.

Определяемые характеристики

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

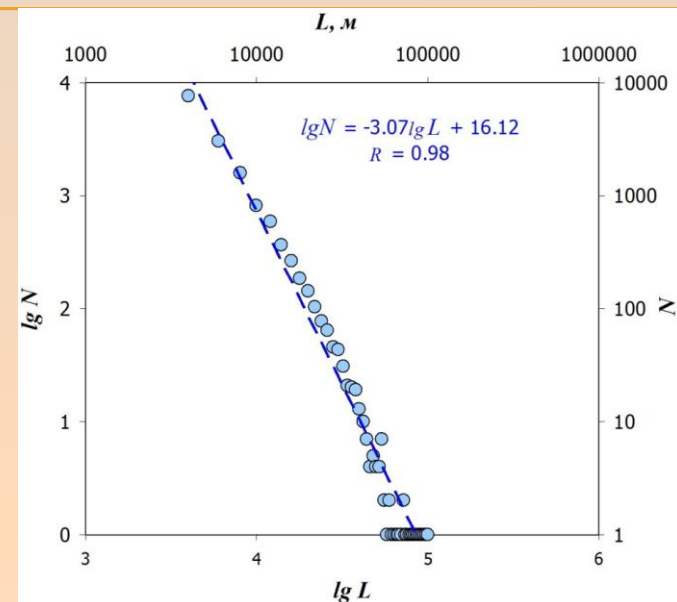
$$N \sim L^{-\alpha}, \quad (2)$$

где N – количество потоков данного порядка, L – их длина. При вычислении α зависимость $N(L)$ строят в двойном логарифмическом масштабе, а затем диапазон 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 бóльших значениях параметра α . А в случае если относительно велика доля длинных русел, распределение будет более пологим, что выражается в мёньших 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.



В качестве L при анализе берем длины связанных отрезков русел данного порядка, ограниченных точками смены порядков.

Вычисление параметра α для всего региона исследований в диапазоне масштабов 2–100 км представлено на рисунке $\alpha = 3.07 \pm 0.08$ (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.

Мера подобия оценивается диапазоном масштабов, в котором выполняется однородный степенной закон, а относительная степень сложности определяется абсолютной величиной фрактальной размерности.

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 ближе его элементы заполняют пространство, тем ближе его размерность к 2.

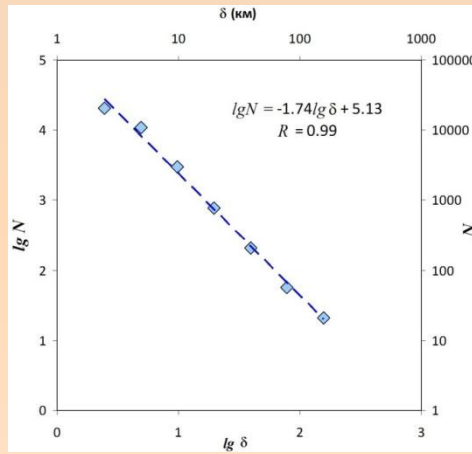
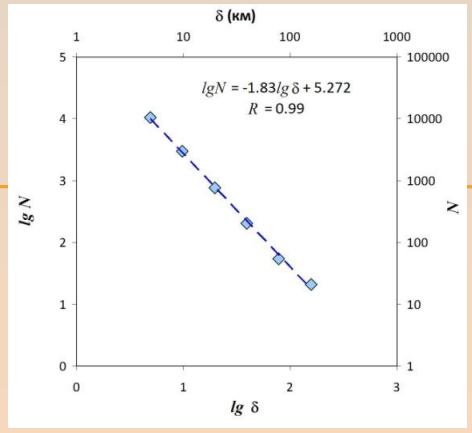
Проведена оценка фрактальной размерности гидросети в двух вариантах:

- 1) самого рисунка речной сети (D_r) и
- 2) множества точек бифуркации русел (D_b).

Аналогично вычислению α , строят зависимость $N(\delta)$ в двойном логарифмическом масштабе, область скейлинга аппроксимируют прямой линией:

$$\lg N = -D \lg \delta + c, \quad (5)$$

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

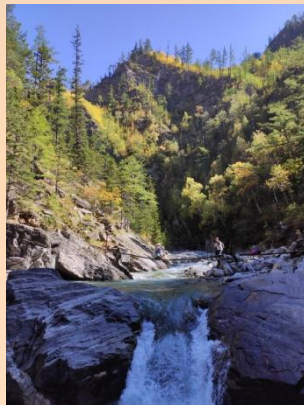


Характеристики самоподобия речной сети. Фрактальная размерность D_r плотности речной сети и множества точек бифуркации русел D_b

Фрактальная размерность D_r равна 1.83 ± 0.05 с коэффициентом корреляции $r = 0.99$

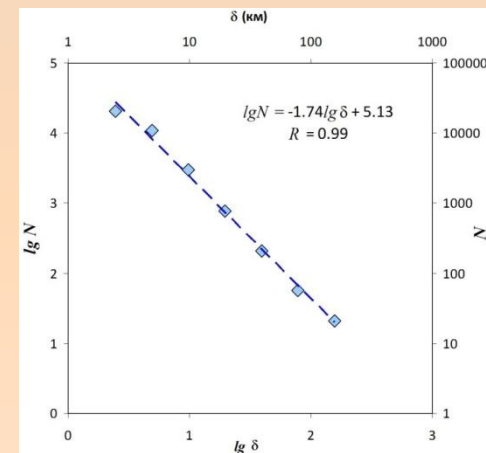
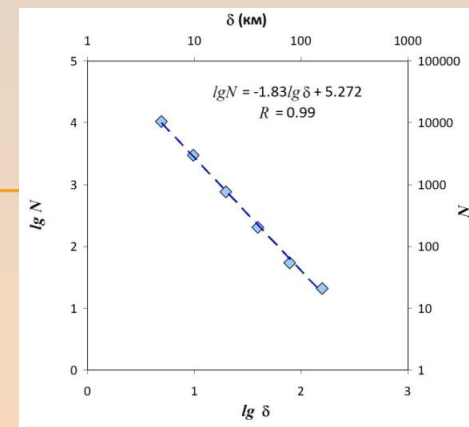
Повышенная величина фрактальной размерности самого рисунка сети русел обусловлена как извилистостью линий, так и густотой самой сети, связанной с ее ветвлением. Это два разных случая: извилистый рисунок формируется в относительно стабильных режимах, в то время как формирование разветвленной речной сети характерно для тектонических поднятий.

В обоих этих случаях значения фрактальной размерности D_r будут повышенными, и с помощью только этого параметра не получается достаточно уверенно различить тектонические режимы поднятий и опусканий.



Фрактальная размерность множества точек ветвления (бифуркаций) русел – это характеристика степени разветвленности гидросети. При этом учитывались только такие точки, в которых происходит смена порядка русел. Фрактальная размерность D_b для всего региона исследований в диапазоне масштабов 5-160 км равна 1.74 ± 0.05 с коэффициентом корреляции $r = 0.99$.

Повышенные значения этого параметра будут соответствовать областям, где происходит частое ветвление (смена порядков) русел, что соответствует поднятиям.



Характеристики самоподобия речной сети. Фрактальная размерность D_r плотности речной сети и множества точек бифуркации русел D_b

3. Распределение фрактальных характеристик по площади исследования.

По результатам проведения тестовых расчетов для анализа выбраны следующие параметры:

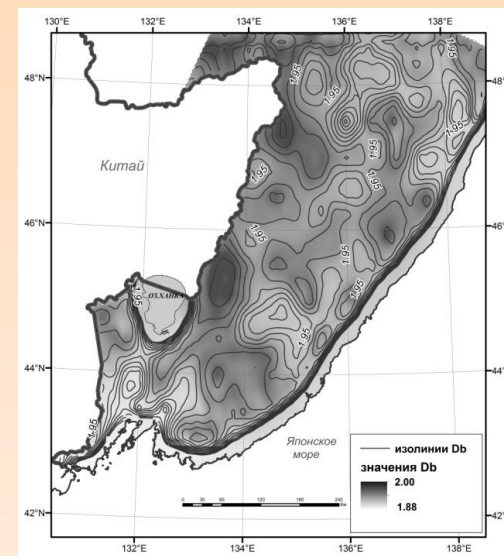
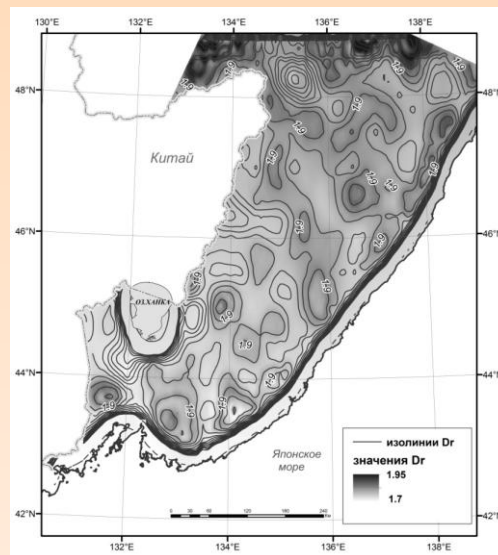
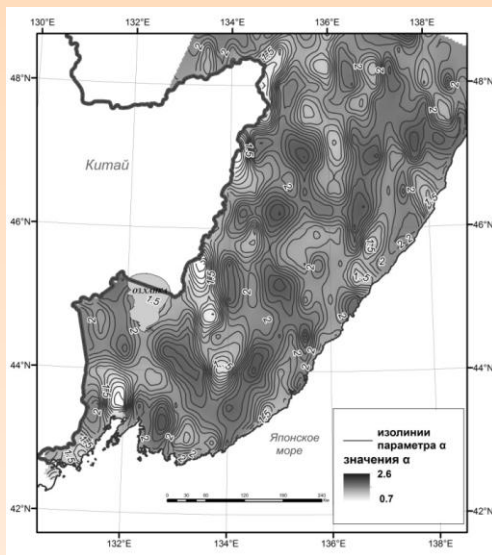
- для всех порядков размер окна составлял $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (~40'40 км на данной широте);
- сдвиг окна (перекрытие) составлял 0.25° (~20 км).

Для выявления пространственных особенностей вариации фрактальной размерности речных сетей региона проводился ее расчет в скользящем окне с помощью авторской программы FrAnGeo v.3.3 [Захаров и др.].

Распределение фрактальной размерности длин русел (α) по площади исследований характеризуется линейными практически меридиональными зонами чередующихся повышенных и пониженных его значений. **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. **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 мозаичным рисунком. **Повышенные значения этого параметра соответствуют областям с более частым ветвлением русел (смена порядков), то есть поднятиям.**



4. Комплексный параметр самоподобия.

Представляется, что более корректный результат можно получить при комплексном анализе всех 3-х параметров.

При сопоставлении результатов фрактального анализа с амплитудами неотектонических движений нас интересуют не столько сами значения параметров, сколько их вариации.

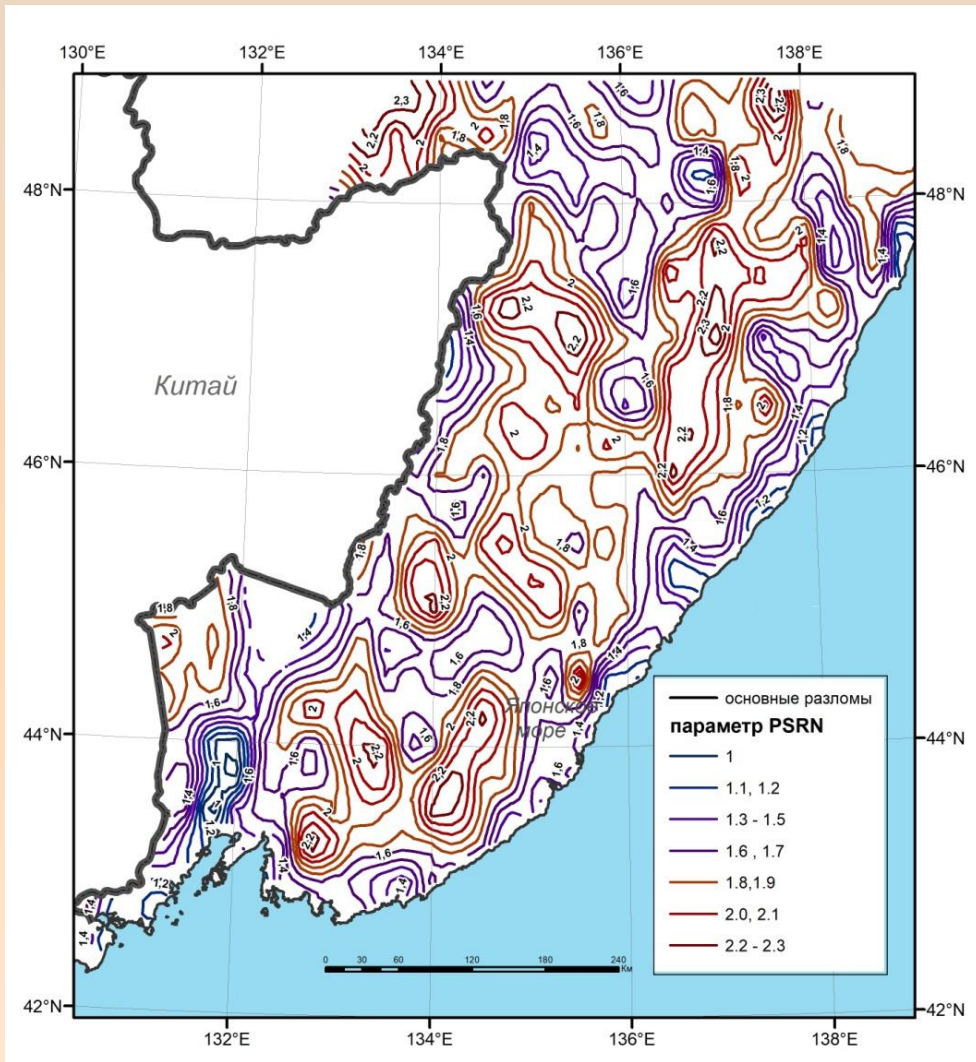
Предложен комплексный параметр самоподобия PRNS (Parameter of River Networks Self-similarity). Поскольку диапазоны вариаций каждого из параметров D_r , D_b и α различаются, для их корректного комбинирования необходимо привести нормировку.

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

где \min – минимальные, \max – максимальные значения каждого параметра, $R = \max - \min$ – размах значений. В качестве параметра PRNS предлагается сумма нормированных вариаций параметров:

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

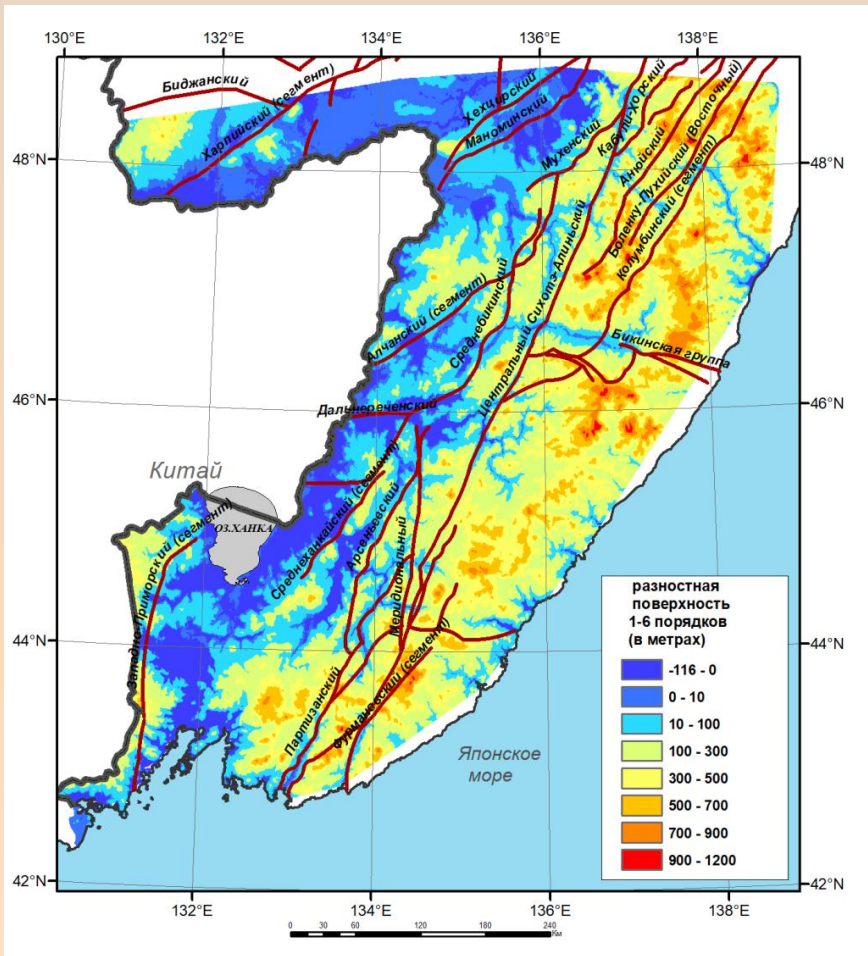
Такое комбинирование нужно для того, чтобы более корректно отразить выраженность тектонических движений того или иного знака в результирующих значениях параметра PRNS.



На качественном уровне зависимость следующая:

- в случае опусканий $\langle D_r \rangle$ будет относительно повышенным, а $\langle D_b \rangle$ и $\langle a \rangle$ – пониженными, и выражение (7) будет принимать относительно небольшие значения;
- для поднятий все три параметра будут иметь повышенные значения, и в результате (7) будет принимать большие значения.

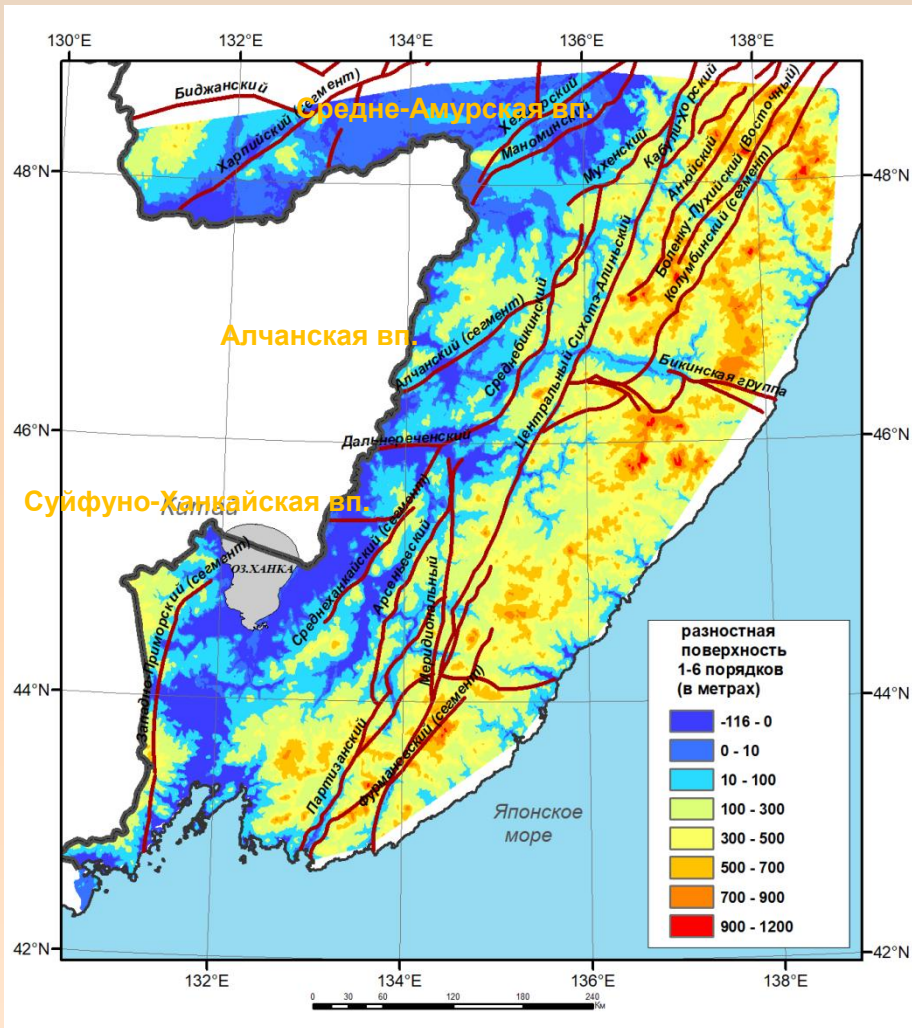
Поскольку каждый из нормированных параметров находится в диапазоне от 0 до 1, то и их сумма теоретически может варьироваться от 0 до 3. Однако практические значения следует ожидать в диапазоне 0.5-2.5, близкие к 3 – маловероятны. В нашем случае диапазон изменений $PRNS$ составляет от **1 до 2.3**.



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.

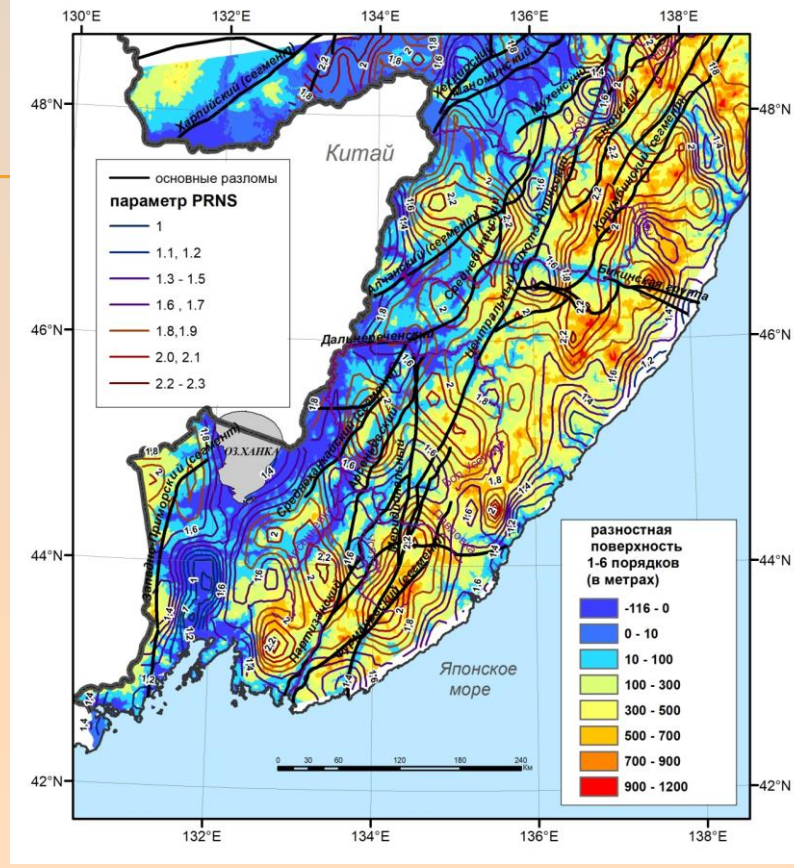
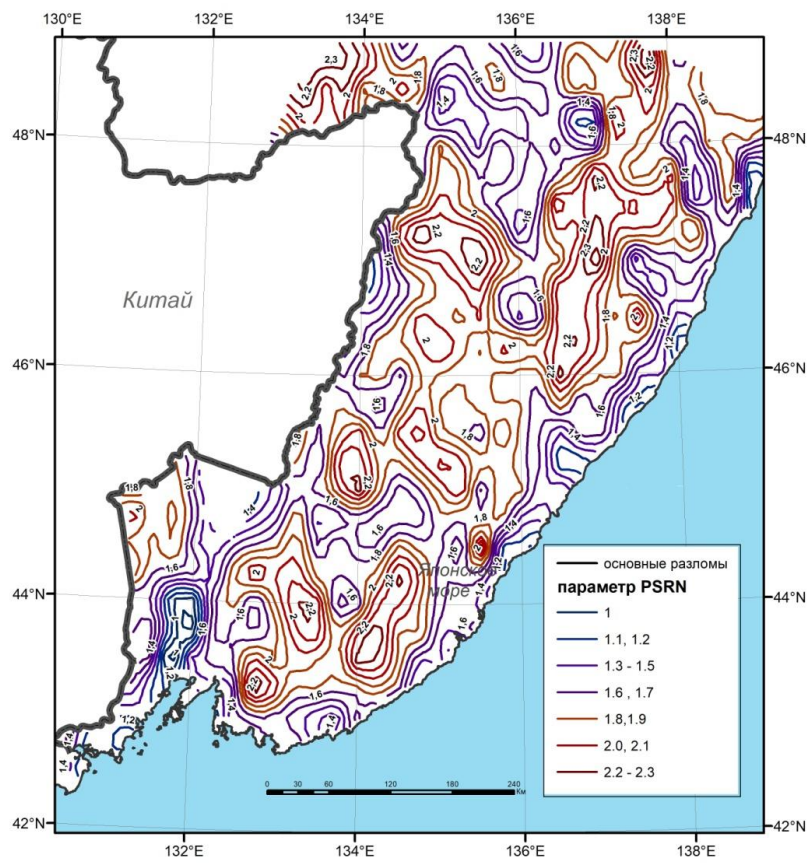
По алгоритму, описанному И.И. Нгумановым с соавторами [14], был построен набор **монобазисных** и **разностных** поверхностей, отражающих развитие рельефа в период между заложением водотоков разных порядков [22]. Анализ проводился только по водотокам **1-6-го** порядков, поскольку водотоки старших порядков являются преимущественно транзитными, с выработанным профилем равновесия, и их количество недостаточно для достоверной интерполяции базисных поверхностей.

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.



Приращением рельефа в **Средне-Амурской** впадине на севере, **Суйфуно-Ханкайской** на юге и **Алчанской** между ними близкого к **0**. Это может свидетельствовать о том, что для данных территорий были характерны как процессы денудации более древнего рельефа, так и опускание территории с компенсационным осадконакоплением в пределах осадочных бассейнов. Практически все впадины обязаны образованию односторонних грабен, 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.

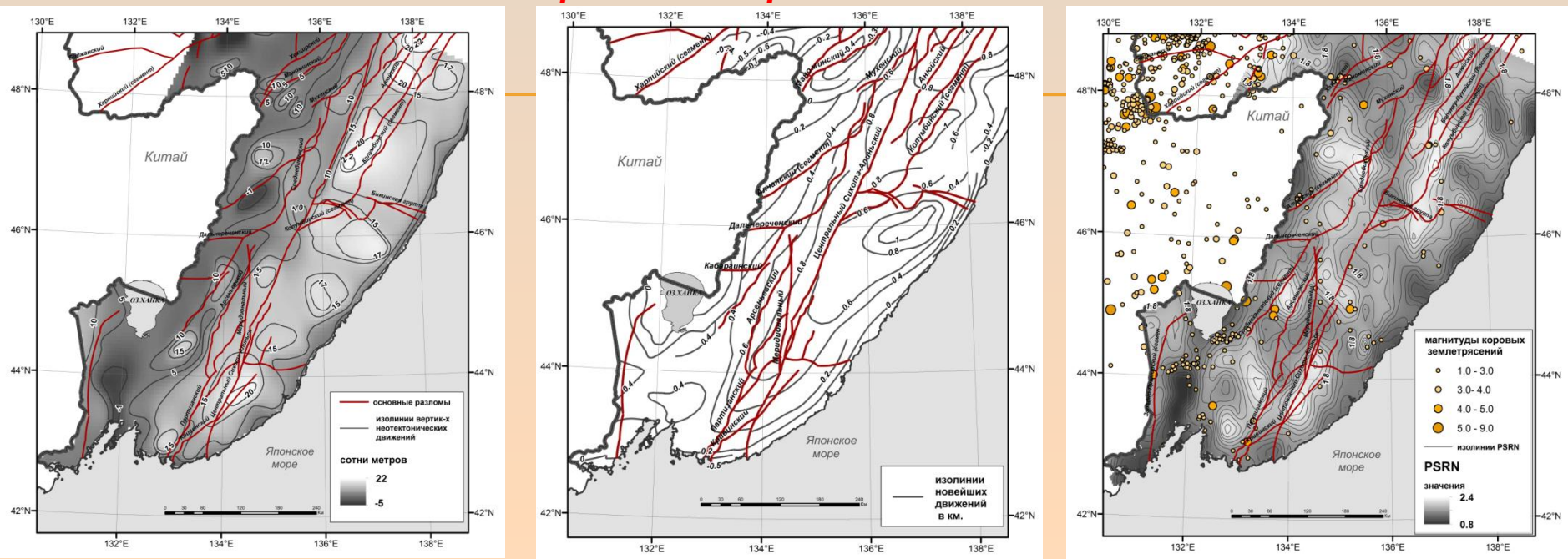


Сопоставление разностной поверхности 1-го и 6-го порядков с пространственным распределением параметра **PRNS** гидросети демонстрирует, что максимумы параметра **PRNS** совпадают с областями наибольшего приращения рельефа, а минимумы с областями его наименьшего приращения, или с областями наиболее значительной эрозии.

Однако отмечаются области, для которых характерна обратная корреляция. Это может быть объяснено именно стадийностью развития рельефа. 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 [18].

Некоторое смещение максимумов и минимумов поля **PRNS** относительно структур, особенно имеющих небольшие размеры, узких впадин и поднятий, может объясняться «размазыванием» значений при осреднении в скользящем окне.

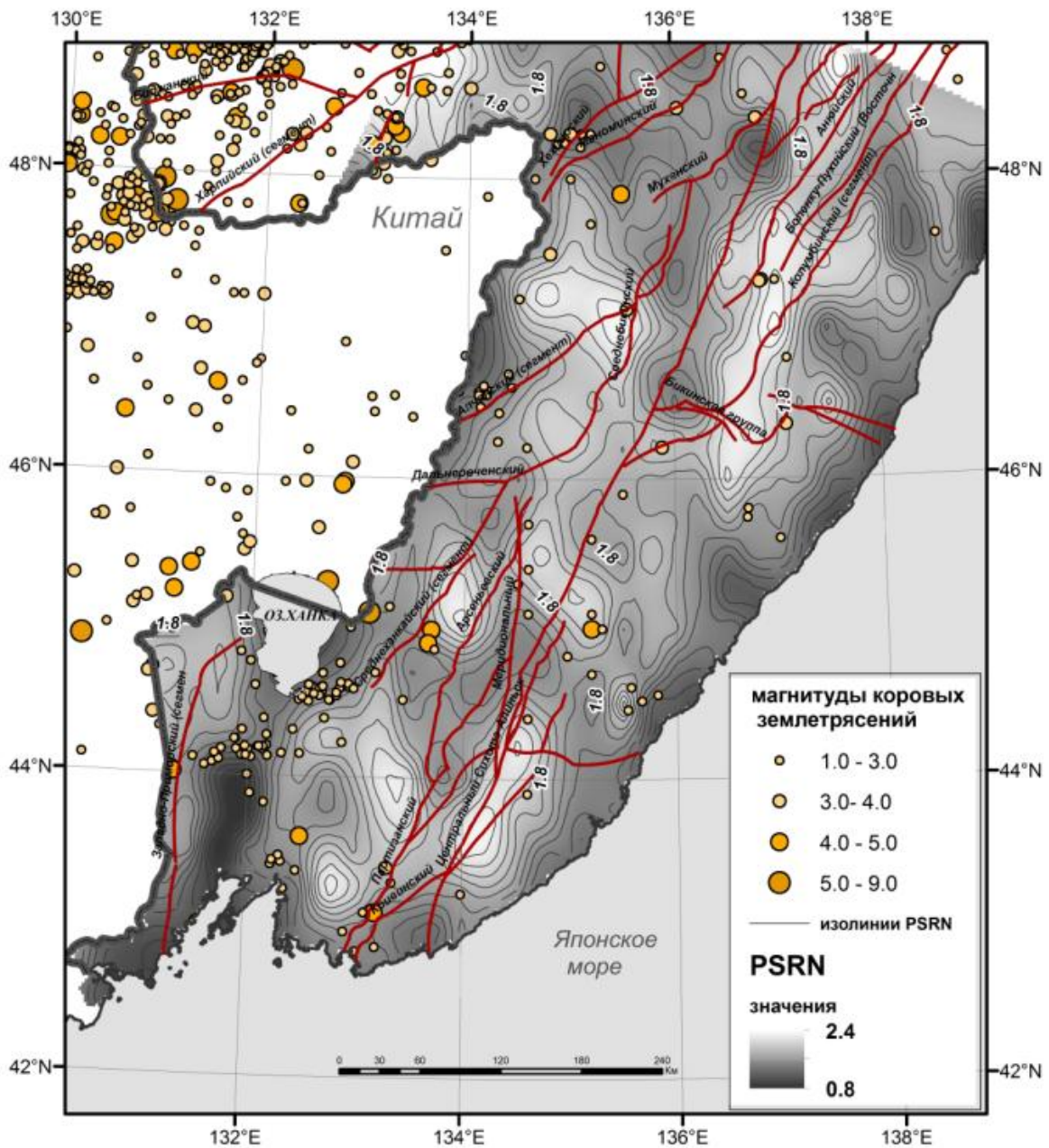
Сопоставление данных фрактального анализа гидросети с неотектоническими построениями предшественников



Сопоставление комплексного параметра самоподобия речной сети юга Дальнего Востока России с данными неотектонической схемы Горкуши и др. 1999 [4] и карты новейшей тектоники [Карта..., 1997 под ред. Грачева].
а – фрагмент неотектонической схемы, изолинии – вертикальные движения в сотнях метров.
б – фрагмент карты новейшей тектоники Северной Евразии, изолинии – новейшие движения в км.

Положения относительных максимумов и минимумов новейших вертикальных движений в целом совпадают (рис. а и б). Абсолютные величины отрицательных вертикальных движений в целом совпадают – максимальные значения для Средне-Амурской впадины составляют -1 км, для положительных вертикальных движений значения отличаются. Для положительных структур Сихотэ-Алиньского блока восточнее Центрального Сихотэ-Алиньского разлома отмечается существенная разница от 500 м на юге до 1 км на севере (рис.а и б). 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.

Сравнительный анализ неотектонических построений предшественников (рис. а и б), и карты PRNS настоящей работы (рис. в) 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. **Отличия, выражаются в деталях и конфигурации контуров максимумов.** Такие различия могут проявляться вследствие сложной и стадийной истории формирования сети водотоков, что существенно влияет на параметры самоподобия.



Комплексный параметр самоподобия речной сети (**PRNS**) юга Дальнего Востока России, рассчитанный в скользящем окне 40×40 км и эпицентры коровых землетрясений.

Результаты и выводы

- В результате проведенных исследований на основании морфоструктурного анализа установлено, что на протяжении всего неотектонического этапа восточнее Центрально-Сихоте-Алиньского разлома преобладало воздымание, в то время как западнее него с определенного времени наиболее значительную роль имели процессы денудации и эрозии более древнего рельефа и опускание территории с компенсационным осадконакоплением в пределах осадочных бассейнов. Воздымание Сихотэ-Алиня восточнее Центрального Сихотэ-Алиньского разлома происходило неравномерно, более интенсивно на юге и на севере изучаемой территории, и менее интенсивно в центральной части, между Южно-Приморской и Бикинской зонами разломов, где больше выражены процессы денудации.
- Предложен новый комплексный параметр **PRNS** для характеристики самоподобия гидросети, являющийся комбинацией степенного показателя в распределении русел по длинам, фрактальной размерности русел и фрактальной размерности точек смены порядка русел. Данный параметр более корректен и нагляден при сопоставлении характеристик самоподобия гидросети с неотектоническими движениями.
- Сопоставление результатов морфоструктурного и фрактального анализов показало хорошую корреляцию. 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 оконтуривают поднятия, что связано с блоковым характером неотектонических вертикальных движений.

Благодарности.

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].

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !



✖ Литература

- ✖ 1. Бастраков Г.В. Эрозионная прочность горных пород // Геоморфология. №2. 1977. 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 // Тихоокеанская 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 // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. 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 // Тихоокеанская геология. 2017. Том 36. № 2. С. 58-69.
- ✖ 7. Захаров В.С. Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестн. Моск. ун-та. 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. Главный редактор 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. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- ✖ 12. 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](https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-3-86-95)
- ✖ 13. Мельник М.А., Поздняков А.В. Фрактальный анализ эрозионно расчлененного рельефа: методологические подходы // Вестник Томского государственного университета. 2007. № 301. С. 201-205.
- ✖ 14. Нгуманов И.И., Нгуманова Е.В., Чернова И.Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань, Казанский университет. 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](https://doi.org/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. Новейшие движения и характеристики самоподобия речной сети Южного Сихотэ-Алиня // Материалы всероссийской научной конференции Прикладные аспекты динамической геологии, посвященной 110-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова. М.: "Перо", 2019. С. 258–261.
- ✖ 19. Симонов Д.А., Захаров В.С., Брянцева Г.В. Комплексный структурно-геоморфологический, структурно-морфологический и фрактальный анализ вертикальных новейших движений Керченского полуострова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 5. С. 19–29.
- ✖ 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 // Вестник 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 Саратовского ун-та, 1975. 232 с.
- ✖ 23. Чупикова С. А. Фрактальные методы выявления скрытой регулярности в эрозионном расчленении поверхности (на примере анализа Саяно-Тувинского нагорья, Республика Тува) // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических 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 and Planetary Change. 2007. Vol. 58. P. 197–213. doi: [10.1016/j.gloplacha.2007.02.011](https://doi.org/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. Vol. 172. P. 1975–1984. doi: [10.1007/s00024-014-0910-z](https://doi.org/10.1007/s00024-014-0910-z).
- ✖ 26. Jensen 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.
- ✖ 27. Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblou 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. Vol. 118. No. 7. P. 3691–3706.
- ✖ 28. Pelletier J.D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // Journal of Geophysical Research. 1999. Vol. 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, Vol. 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. Vol. 10(2). P. 541–669. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0425>.