ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ, 2024, № 3, с. 59–69

УДК 551.1/.4

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РАЗДРОБЛЕННОСТИ НЕДР

© 2024 г. А. Л. Собисевич[a], А. О. Агибалов[a, c, *], О. В. Бергаль-Кувикас[b], В. А. Зайцев[c], Д. С. Зыков[d], В. М. Макеев[e], А. В. Полещук[d], А. А. Сенцов[a, **], А. В. Шевченко[f]

[a]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия
[b]Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
[c]Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119234 Россия
[d]Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия
[e]Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
[f]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 143, Нальчик, 360004 Россия
**e-mail: agibalo@yandex.ru*
***e-mail: alekssencov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.
После доработки 25.09.2023 г.
Принята к публикации 20.02.2024 г.

Оценка степени тектонической раздробленности верхней части литосферы, согласно методике Ю.В. Нечаева [2010], основана на расчетах удельной длины линеаментов. На примере трех разных регионов – Северо-Западного Кавказа, Воронежской антеклизы и Малко-Петропавловской зоны Камчатки – нами апробирована возможность использования других морфометрических параметров: удельных длин “слабых” зон, линий вытянутости и водотоков, а также кривизны рельефа. Их аномалии приурочены к сейсмоактивным участкам и областям проявления гидротермально-магматической активности. Показано, что наиболее информативны 3D модели тектонической раздробленности, построенные с учетом удельной протяженности “слабых” зон и водотоков.

Ключевые слова: тектоническая раздробленность, Северо-Западный Кавказ, Воронежская антеклиза, Камчатка

DOI: 10.31857/S0203030624030056, **EDN:** JQIETW

ВВЕДЕНИЕ

Методика Ю.В. Нечаева [2010], позволяющая оценить степень тектонической раздробленности верхней части литосферы по данным линеаментного анализа, представляется актуальной и интересной, поскольку на базе этого методического подхода достигнуты значимые научно-практические результаты, например, выявлены потенциальные магматические камеры вулкана Эльбрус [Богатиков и др., 2002] и зоны деструкции в районе Авачинского залива [Таскин, Сидоров, 2014], получены новые данные о разрывных нарушениях острова Парамушир, связанных с проявлениями гидротермально-магматической активности [Хубаева и др., 2020]. Цель нашей работы заключалась в развитии методики Ю.В. Нечаева путем использования разных морфометрических характеристик рельефа.

Значимость поставленной задачи связана с тем, что визуальное дешифрирование во многом субъективно, в то время как морфометрический анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР) может быть полностью (или в значительной степени) автоматизирован. В нашей работе на примере трех регионов (Северо-Западного Кавказа, Воронежской антеклизы и Малко-Петропавловской зоны поперечных дислоканций (МПЗ) юго-востока Камчатки) апробировано использование схем блоковой делимости, составленных методом Н.П. Костенко [1999], линий вытянутости, кривизны рельефа и водотоков для разработки 3D моделей тектонической раздробленности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы положена методика Ю.В. Нечаева [2010], направленная на оценку степени тектонической раздробленности литосферы по удельной длине линеаментов. Под термином “тектоническая раздробленность” Ю.В. Нечаев понимал совокупность всех неоднородностей земной коры и верхней мантии, обусловленных их вещественным составом, строением и развитием во времени. Для ее характеристики он предлагал проводить “тотальное” визуальное дешифрирование линеаментов – линейных элементов рельефа нетехногенной природы. Несмотря на то, что вопрос геологической интерпретации линеаментов не нашел окончательного решения, основоположник метода отмечал высокую эффективность использования разных приемов линеаментного анализа для понимания структуры земной коры, прежде всего, при выделении разрывных нарушений. Поскольку алгоритм “тотального” визуального дешифрирования не формализован в достаточной мере, мы использовали методику Н.П. Костенко [1999]. Она заключается в разделении терртории на ряд блоков преимущественно прямоугольной или трапецевидной формы, ограниченные “слабыми” зонами. Под этим термином понимают “зоны трещиноватости, дробления пород и разрывов со смещением”. Они выражены в рельефе в виде спрямленных участков эрозионной сети, прямолинейных контуров береговых линий озер, линейно расположенных перехватов речных долин, вертикальных стенок и уступов, подножий крутых склонов. Упомянутые геоморфологические признаки “слабых” зон более подробно рассмотрены в монографии [Панина, 2019].

Методика Ю.В. Нечаева базируется на том, что трещиноватость одной грани образца кубической формы отражает степень трещиноватости всего образца. Геологическая среда представляется в виде множества блоков кубической формы с ребром a. Трещиноватость верхней грани каждого такого куба оценивается путем визуального дешифрирования линеаментов, а удельная длина линеаментов, равная отношению l/a^2 (где l – суммарная протяженность линеаментов в расчетной ячейке размером a), служит показателем степени тектонической раздробленности на глубине $a/2$. Это соотношение глубины и размера расчетной ячейки было установлено эмпирически. Таким образом, изменение значения a дает возможность охарактеризовать тектоническую раздробленность на разной глубине.

Отметим, что длина линеаментов используется не только для определения степени раздробленности, но и для оценки напряженного состояния геосреды: эта методика, разработанная П.Н. Николаевым [1992], предполагает ранжирование разломов (и линеаментов) на ряд классов в зависимости от их протяженности; далее для каждого класса, соответствующего определенному уровню глубины, реконструируют траекторию главных нормальных осей напряжений.

В качестве объектов исследования выбраны Северо-Западный Кавказ, Воронежская антеклиза и МПЗ по следующим соображениям: 1) эти районы существенно различны в геолого-геоморфологическом отношении; 2) детально изучена сейсмичность Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы, а также современные проявления гидротермально-магматической активности МПЗ; 3) в результате ранее проведенных нами исследований [Агибалов и др., 2021, 2023] обоснован выбор морфометрических параметров рельефа, связанных с сейсмоактивными зонами Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы и областями развития гидротермально-магматических процессов МПЗ. Отметим, что сейсмичность последней не проанализирована в нашей работе, поскольку на этой небольшой по площади

территории известно >500 эпицентров землетрясений [Каталог ..., 2023], что позволяет рассматривать ее как единую сейсмоактивную область. Расположение эпицентров землетрясений Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы приведено по сводному сейсмологическому каталогу, составленного с учетом данных [Надежка и др., 2010; Рогожин и др., 2014; Сейсмологический ..., 2023; Уломов, Медведева, 2022], расположение вулканических построек МПЗ – по геологическим картам масштаба 1 : 200 000 [Геологическая ..., 2000а, 2000б, 2013, 2016], горячих источников – по топографической карте [Электронная ..., 2023].

Известно, что удельная длина (и плотность) линеаментов – один из геоморфологических показателей, связаннных с геологическим строением, сейсмичностью, новейшим морфоструктурным планом. Наряду с ним для выделения выраженных в рельефе дислокаций, сформировавшихся под влияним тектонических процессов, используют и другие морфометрические параметры, например, крутизну склонов и глубину вертикального расчленения рельефа [Спиридонов, 1975]. В нашей работе для оценки тектонической раздробленности выбраны только те морфометрические показатели, которые связаны с геологическим строением и сейсмичностью и имеют метрическую размерность, поскольку в “традиционной” методике Ю.В. Нечаева [2010] суммарная протяженность линеаментов (м, км) делится на площадь ячейки, измеряемой в м^2 или км^2. К таким параметрам относятся удельные длины “слабых” зон (ε_1), линий вытянутости (ε_3) и водотоков (ε_4, км$^{-1}$), а также отношение суммарной кривизны рельефа, взятой по модулю, к площади расчетной ячейки (ε_2, м$^{-3}$). Характер мегатрещиноватости во многом обусловливает пространственный рисунок постоянных и временных водотоков [Мануилова, 2022], поэтому для оценки степени тектонической раздробленности нами рассчитана их удельная протяженность (ε_4). Она отражает степень горизонтальной расчлененности рельефа [Симонов, 1999]. В то же время при визуальном дешифрировании “слабые” зоны выделяют, прежде всего, по наиболее протяженным линейным понижениям рельефа, которым соответствуют достаточно крупные водотоки, а повышенные значения ε_4 могут быть связаны не только с наличием нескольких крупных водотоков, но и со множеством мелких. При этом сумма длин, используемая при расчете ε_4, не вскрывает этих различий, что обусловливает различия схем ε_1 и ε_4. Линии вытянутости показывают изменение среднего направления простирания линеаментов-“штрихов” [Златопольский, 2007]: конфигурация этих линий во многом схожа с рисунком линеаментного поля и гидросети, однако автоматизированный алгоритм построения линий вытянутости позволяет рассматривать ε_3 в качестве отдельного морфометрического параметра. В общем случае кривизна рельефа – один из показателей степени его расчлененности. В среде ArcGis она рассчитана с помощью инструмента “Curvature” как вторая производная поверхности рельефа. Ее положительные значения указывают на то, что поверхность выпуклая, отрицательные – вогнутая, нулевые – плоская [Дамшевич, 2017]. В областях развития контрастного, глубоко расчлененного рельефа, характеризующегося повышенными значениями ε_1 и ε_4, наблюдается множество положительных и отрицательных форм, значения кривизны поверхности которых существенно отличаются от нулевого, а в пределах слабо расчлененных участков значения кривизны близки к нулю. При этом в первом случае среднее значение в расчетной ячейке может быть близко к нулевому из-за разного знака кривизны (положительного или отрицательного). Для того чтобы абстрагироваться от него, нами в ячейках разного размера рассчитаны суммарные значения кривизны, взятые по модулю.

В качестве исходных данных для структурно-геоморфологических и морфометрических исследований послужила ЦМР SRTM разрешением 3 угловые секунды [Цифровая ..., 2022], а также топографические карты Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы масштаба 1 : 1 000 000 и МПЗ масштаба 1 : 200 000 [Электронная ..., 2023]. По ним построены были о цифрованы водотоки. Линии вытянутости выделены в автоматизированном режиме в программе LESSA А.А. Златопольского [2011]. Кривизна рельефа определена в программе ArcGis. С помощью ее стандартных инструментов рассчитаны также параметры ε_{1-4}. Для Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы, занимающих территорию значительной площади,

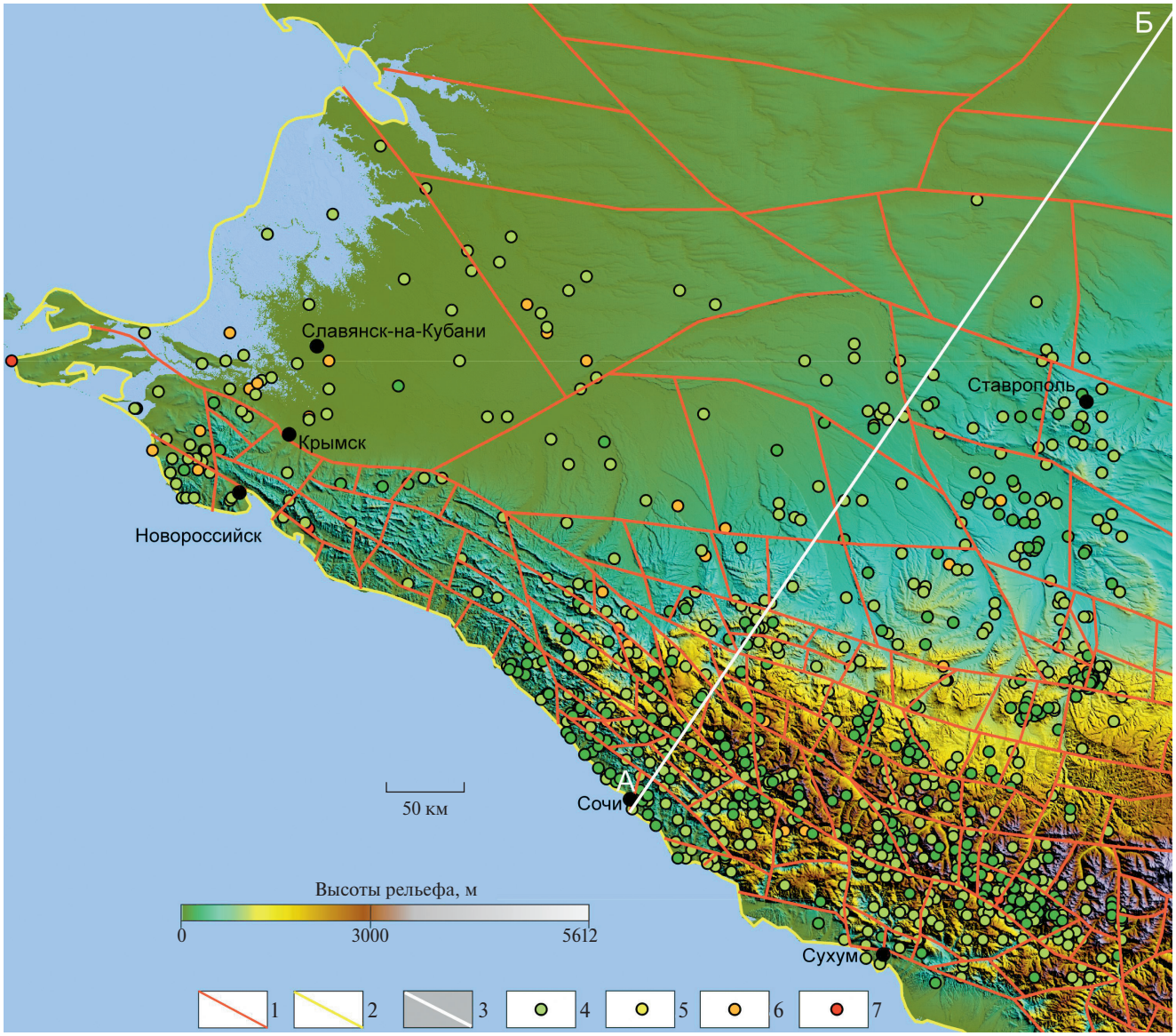


Рис. 1. Схема “слабых” зон Северо-Западного Кавказа.
1 – “слабые” зоны; 2 – контуры береговой линии; 3 – линия профиля; 4–7 – эпицентры землетрясений с магнитудой по поверхностным волнам (M_S): 4 – <2; 5 – 2–4; 6 – 4–6; 7 – 6–7.2.

выбраны расчетные ячейки размерами 10, 20, ... 80 км, а для относительно небольшой МПЗ – 5, 10, ... 20 км, позволившие оценить степень тектонической раздробленности в интервале глубин 5–40 и 2.5–10 км соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На профилях, иллюстрирующих степень тектонической раздробленности Северо-Западного Кавказа и Предкавказья, проявлена положительная аномалия ε_{1-4}, наблюдаемая под горно-складчатым сооружением во всем интервале глубин 5–40 км (рис. 1, 2). Ей соответствует область разуплотнения пород, зафиксированная под осевой частью Большого Кавказа методом микросейсмического зондирования (ММЗ) [Горбатиков и др., 2015; Рогожин и др., 2014]. На профилях ММЗ эта область проявлена как обширное, клинообразное в разрезе низкоскоростное тело (до –5 дБ относительно региональной скоростной модели), кровля которого залегает на глубине ~5 км [Рогожин и др., 2014]. Она также была выделена Ю.В. Нечаевым [2010] на вертикальных сечениях поля тектонической раздробленности. Хорошо выраженный в центральной части профиля IV (см. рис. 2) максимум значений ε_3 приурочен

к Ставропольскому поднятию, отличающемуся повышенной для Предкавказья сейсмичностью. Этот максимум не наблюдается на других профилях, что, предположительно, объяснимо методической особенностью построения линий вытянутости, ориентированных как вдоль линейных понижений, так и поднятий (хребтов). “Слабые” зоны связаны преимущественно с отрицательными формами рельефа, проработанными гидросетью, а локальный максимум значений ε_2 расположен восточнее линии профиля около г. Ставрополь, где на ЦМР (см. рис. 1) заметна область развития достаточного контрастного рельефа (по сравнению с остальной территорией Предкавказья). Отметим согласованность друг с другом построенных разными способами воксельных моделей этого региона, подтверждающуюся заметной и высокой (по шкале Чеддока) численной корреляцией между рассчитанными морфометрическими характеристиками рельефа (табл. 1).

Территория Воронежской антеклизы отличается сложным характером распределения рассматриваемых четырех морфометрических параметров по площади, однако общей особенностью является приуроченность положительных аномалий $\varepsilon_{1–3}$ к центральной части региона (район г. Воронежа). Она характеризуется повышенной сейсмичностью (рис. 3) и мелкоблоковым строением: здесь по геофизическим данным выделены ограниченные разломами небольшие по площади блоки земной коры разного состава – от гранитоидного до метабазитового [Литосфера ..., 2012]. На региональном масштабном уровне это сгущение разломов и эпицентров землетрясений малых магнитуд приурочено к S-образному изгибу границы Курского мегаблока и Лосевской шовной зоны, рассматриваемому в качестве активного тектонического узла [Ефременко, 2011]. В центральной части профиля III (рис. 4) контуры положительной аномалии (параметр ε_2) более широкие, чем на профиле II (параметр ε_1). На наш взгляд, это расширение на юго-восток согласуется с характером сейсмичности – юго-восточная часть антеклизы более сейсмична по сравнению с северо-западной, где зафиксированы только отдельные эпицентры землетрясений (см. рис. 3). На профиле IV (параметр ε_3) на месте одной крупной аномалии, показанной на профиле III, наблюдаются две более мелкие (западная и

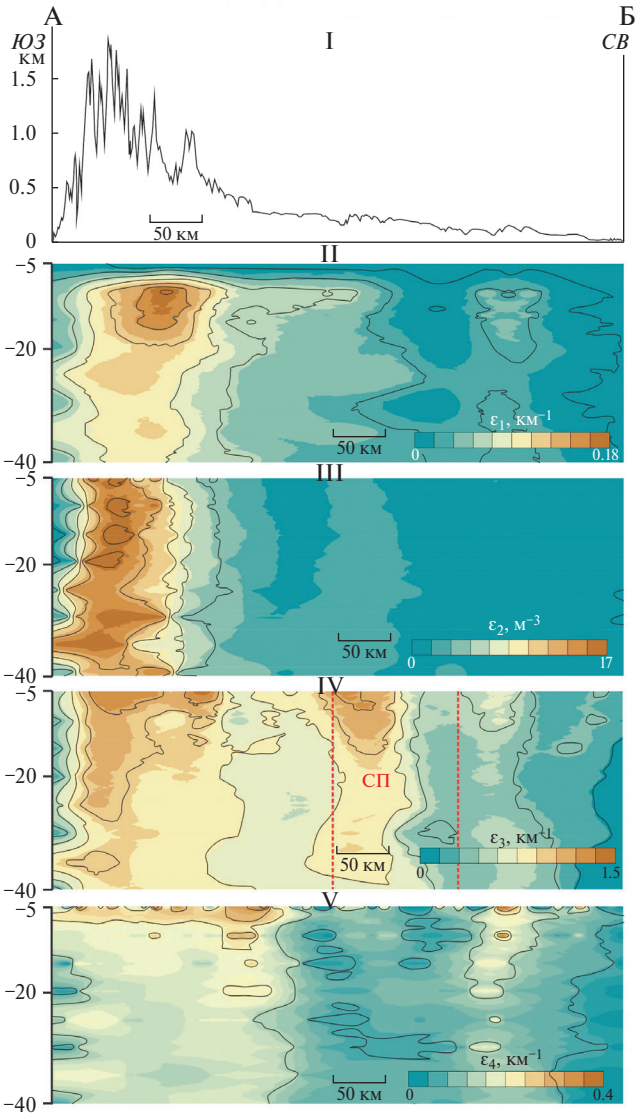


Рис. 2. Профиль рельефа Северо-Западного Кавказа по линии А–Б (I) и вертикальные срезы поля тектонической раздробленности, оцененной по удельной длине “слабых” зон (II, шаг изолиний 0.03 км$^{-1}$), кривизне рельефа (III, шаг изолиний 3 м$^{-3}$), удельной длине линий вытянутости (IV, шаг изолиний 3 км$^{-1}$) и водотоков (V, шаг изолиний 0.1 км$^{-1}$). СП — Ставропольское поднятие, по [Милюков и др., 2022].

восточная), соединяющиеся на глубине ~30 км. Западная маркирует ранее упомянутую область концентрации эпицентров землетрясений в районе г. Воронеж, а восточная соответствует юго-восточному сегменту Окско-Донского мегаблока [Ефременко, 2011]. В целом он достаточно активен в сейсмотектоническом отношении, хотя и в меньшей степени, чем с Среднерусский мегаблок. Кроме того, в северо-западной части профиля проявлена положительная аномалия ε_3: здесь сгущение линий вытянутости

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции Пирсона между различными морфометрическими параметрами рельефа Северо-Западного Кавказа, рассчитанными в пределах ячеек размерами 40×40 км (N = 272)

	УД “слабых” зон, км$^{-1}$	УД линий вытянутости, км$^{-1}$	ε_2, м$^{-3}$	УД водотоков, км$^{-1}$
УД “слабых” зон, км$^{-1}$	1	0.76	0.69	0.73
УД линий вытянутости, км$^{-1}$	0.76	1	0.71	0.73
ε_2, м$^{-3}$	0.69	0.71	1	0.50
УД водотоков, км$^{-1}$	0.73	0.73	0.50	1

Примечание. ε_2 – отношение суммарной кривизны рельефа, взятой по модулю (м$^{-1}$) к площади расчетной ячейки (м^2); УД – удельная длина.

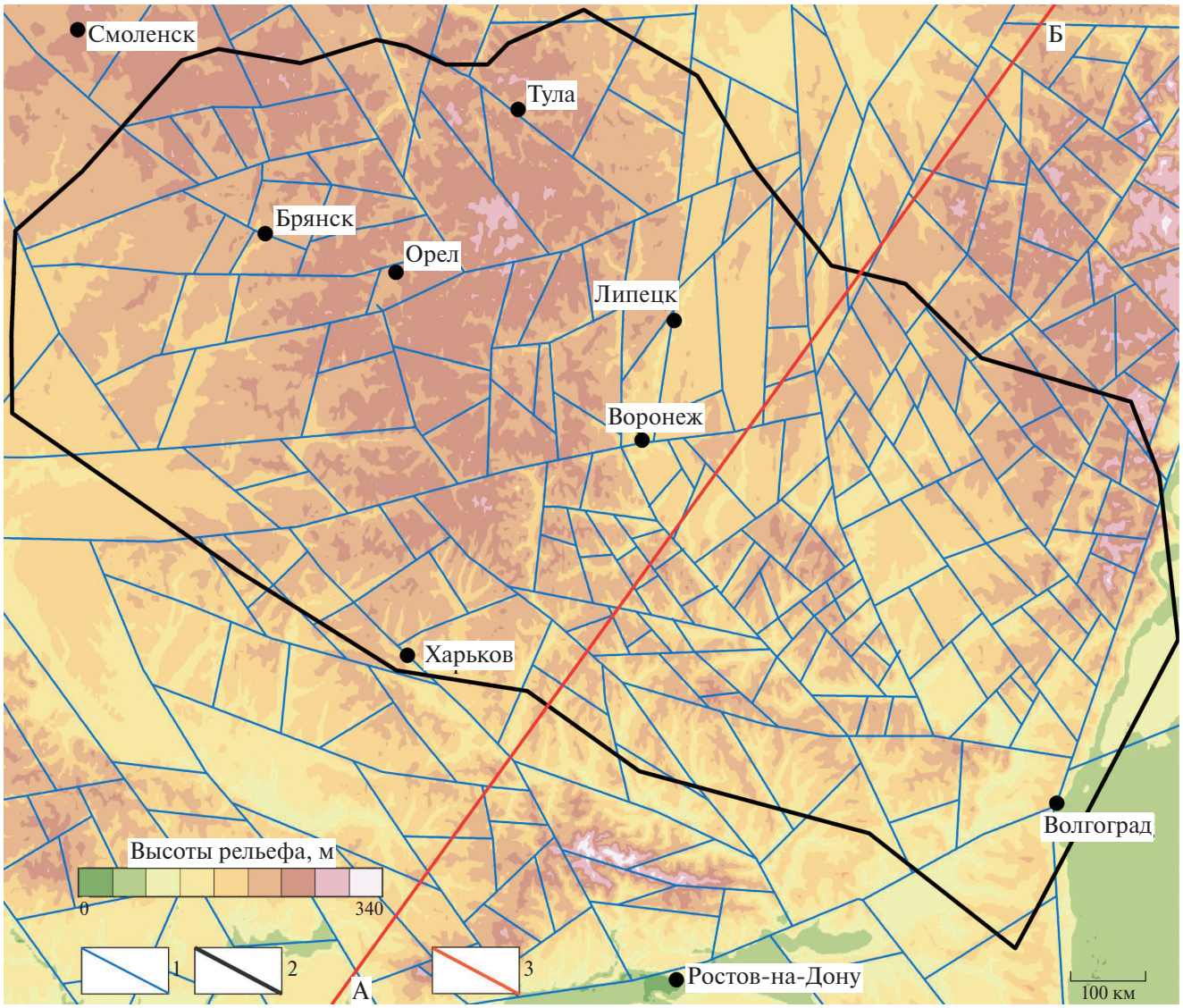


Рис. 3. Схема “слабых” зон Воронежской антеклизы.
1 – “слабые” зоны; 2 – границы антеклизы; 3 – линия профиля.

на участке Брянск–Смоленск соответствует межблоковой границе II ранга, разделяющей северо-восточную и юго-западную части Смоленского блока кристаллического фундамента [Трегуб, 2006]. Она не относится к сейсмоактивным структурам, однако результаты ранее проведенного нами тектонофизического моделирования на эквивалентных материалах позволяют предположить возможность активного трещинообразования в этой области, поскольку в ходе эксперимента в сдвиговом поле напряжений при ориентировке оси сжатия по азимуту 315° вдоль неоднородностей северо-западного простирания развивались трещины отрыва. Судя по геоморфологическим данным, этот тип внешней нагрузки проявляется на новейшем этапе на территории антеклизы [Агибалов и др., 2022].

Профиль V существенно отличается от аналогичных профилей I–IV, поскольку в его центральной и юго-восточной частях проявлены отрицательные аномалии ε_4. Эти области по комплексу геоморфологических признаков (повышенным значениям глубины вертикального расчленения, крутизны склонов, плотности ортогональных линий) и характеру сейсмичности ранее проинтерпретированы нами как геодинамически активные участки [Агибалов и др., 2022]. Предположительно, малая удельная протяженность водотоков в их пределах связана с тем, что в спокойных тектонических условиях увеличивается степень извилистости русел [Панина и др., 2019], и, соответственно, возрастает суммарная протяженность водотоков в расчетных ячейках. Кроме того, более прямолинейный характер речных долин отчасти объясним конфигурацией активных разломов, рассмотренных в базе данных [Zelenin et al., 2022].

Морфометрический анализ рельефа показал, что параметры ε_{2-3} не информативны для понимания особенностей мегатрещиноватости МПЗ, поскольку ее рельеф во многом обусловлен вулканическими процессами, и линии вытянутости расположены концентрически вокруг стратовулканов – Авачинского, Корякского, Вилючинского, Бакенинг. К ним также приурочены наиболее крупные аномалии кривизны рельефа. В то же время структурно-геоморфологическое дешифрирование

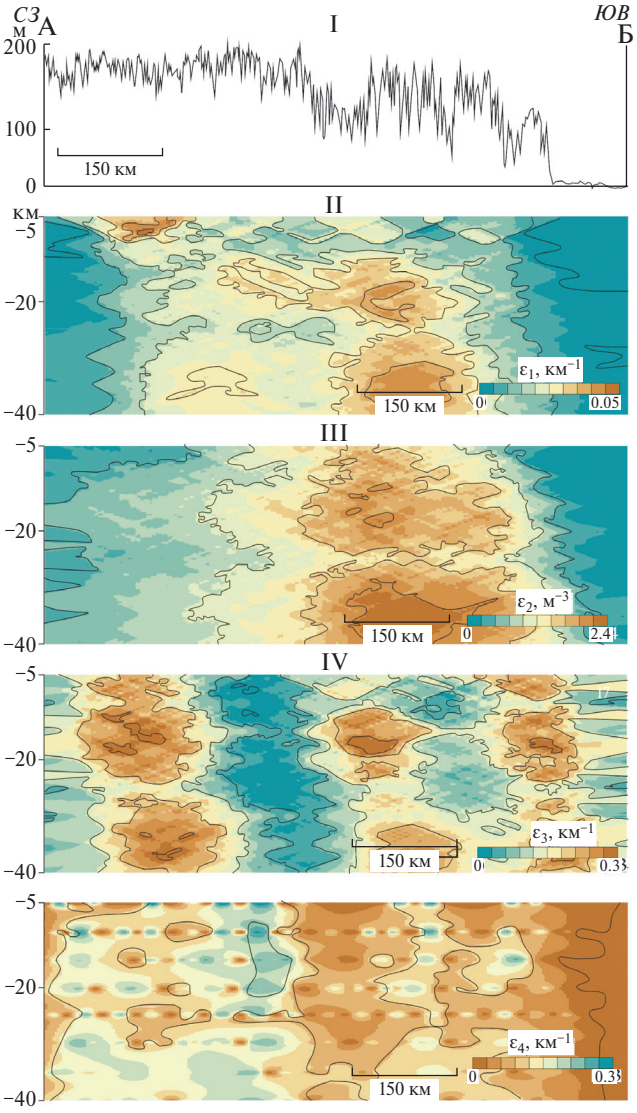


Рис. 4. Профиль рельефа Воронежской антеклизы по линии А–Б (I) и вертикальные срезы поля тектонической раздробленности, оцененной по удельной длине “слабых” зон (II, шаг изолиний 0.01 км$^{-1}$), кривизне рельефа (III, шаг изолиний 6 м), удельной длине линий вытянутости (IV, шаг изолиний 0.1 км$^{-1}$) и водотоков (V, шаг изолиний 0.1 км$^{-1}$).

в масштабе 1:200 000 и расчет удельной длины водотоков по топографическим картам того же масштаба позволили выявить региональные зоны мегатрещиноватости, нередко связанные с долинами крупных рек – Малкинской, Авачи, Паратунки. По положительным аномалиям ε_1 и ε_4 выделены области повышенной трещиноватости в северо-восточной и юго-западных частях МПЗ, где расположено большинство моногенных вулканических построек, практически не выраженных на ЦМР, и термальных источников. Эти зоны хорошо прослеживаются

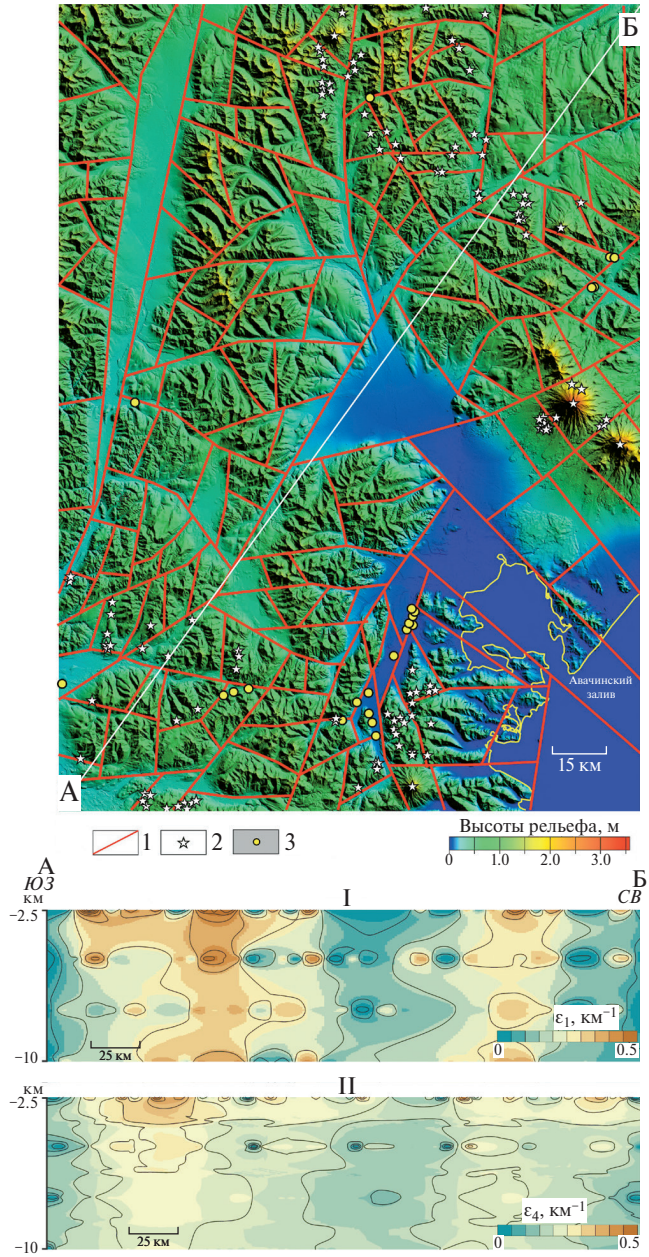


Рис. 5. Схема “слабых” зон Малко-Петропавловской зоны дислокаций.
1 – “слабые” зоны, 2 – вулканические постройки, 3 – горячие источники; I – вертикальный срез модели тектонической раздробленности, построенной по удельной длине “слабых” зон, II – вертикальный срез модели тектонической раздробленности, построенной по удельной длине водотоков.

на профилях (рис. 5) до глубины 10 км. Отметим высокую численную корреляцию между точечными элементами воксельных моделей, построенных по ε_1 и ε_4: коэффициент корреляции Пирсона равен 0.86 (N = 2388). Более подробно соотношение выделенных нами по геоморфологическим признакам двух областей повышенной трещиноватости с геологическим строением описано в статье [Агибалов и др., 2023].

Таким образом, наибольшая согласованность между значениями ε_{1-4} характерна для Северо-Западного Кавказа. Она объяснима контрастным высокогорным рельефом, в котором хорошо выраженные “слабые” зоны проявлены на схемах разных морфометрических параметров – крутизны склонов, гидросети, кривизны рельефа. Эта особенность обусловливает также согласованность моделей тектонической раздробленности МПЗ, построенных по значениям ε_1 и ε_4. Отметим также, что в обоих регионах неотектонические движения служат одним из главных факторов рельефообразования. На территории Воронежской антеклизы степень согласованности разных моделей тектонической раздробленности друг с другом значительно меньше по сравнению с Северо-Западным Кавказом и МПЗ. По нашему мнению, это связано с равнинным рельефом, в котором менее четко проявлены предполагаемые зоны трещиноватости и дробления. Здесь тектонические движения проявились не столь интенсивно, поэтому их роль как фактора рельефообразования ниже, чем на Северо-Западном Кавказе и в пределах МПЗ. В связи с этим рисунок “слабых” зон, водотоков, линий вытянутости в меньшей степени отражает характер тектонической раздробленности и во многом связан с экзогенными рельефообразующими факторами, например, разной устойчивостью пород к денудации. В общем случае различия разных моделей тектонической раздробленности объяснимы методическими особенностями их построения: используемые морфометрические параметры независимы друг от друга, при этом каждый из них только в определенной степени отражают поверхностную раздробленность геосреды. По-видимому, эта степень определяется интенсивностью влияния тектонических движений и деформаций на рельеф.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере трех разных регионов апробировано использование комплекса морфометрических параметров (удельных длин “слабых” зон, линий вытянутости, водотоков, а также

кривизны рельефа) для оценки тектонической раздробленности в объеме геологической среды. По всем перечисленным геоморфологическим характеристикам выделены области повышенной раздробленности литосферы под горно-складчатым сооружением Северо-Западного Кавказа и центральной частью Воронежской антеклизы, соответствующие наиболее сейсмоактивным участкам. Повышенными значениями удельной длины линий вытянутости отличаются также активные морфоструктуры более локального масштабного уровня – Ставропольское поднятие и межблоковая граница II-го ранга на территории Воронежской антеклизы. Однако зонам трещиноватости, расположенным на юго-западе и северо-востоке МПЗ и характеризующимся высокой современной гидротермально-магматической активностью, соответствуют положительные аномалии только 2-х параметров – удельной длины “слабых” зон и водотоков. Таким образом, они информативны для понимания поля тектонической раздробленности всех изученных районов, поэтому их использование для разработки соответствующих 3D моделей представляется приоритетным.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Госзаданий ИФЗ РАН (А.Л. Собисевич, А.О. Агибалов, А.А. Сенцов), ГИН РАН (А.В. Полещук, Д.С. Зыков), ИВиС ДВО РАН (О.В. Бергаль-Кувикас), ИГЭ РАН (В.М. Макеев), КБГУ имени Х.М. Бербекова (А.В. Шевченко) и НИР “Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ” (В.А. Зайцев, А.О. Агибалов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агибалов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В.А., Макеев В.М., Сенцов А.А. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. С. 122–133.

Агибалов А.О., Зайцев В.А., Мануилова Е.А., Сенцов А.А. Выделение сейсмически активных участков Воронежской антеклизы геоморфологическими и тектонофизическими методами // Вестник МГУ. Серия 4: Геология. 2022. № 2. С. 3–10.

Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А. Новые возможности геоморфологических и тектонофизических методов для анализа сейсмичности на примере Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы // Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100. № 3. С. 40–52.

Богатиков О.А., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л. Использование космических технологий для мониторинга геологических структур вулкана Эльбрус // ДАН. 2002. Т. 387. № 3. С. 1–6.

Горбатиков А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзебоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли. 2015. № 1. С. 28–39.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Южно-Камчатская серия. Лист N-57-XXVII. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Южно-Камчатская серия. Лист N-57-XXI. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000б.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Хангарская серия. Лист N-57-XVI. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Хангарская серия. Лист N-57-XX. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016.

Дамшевич А. Возможности использования цифровой модели рельефа для изучения влияния морфометрических показателей на влажность почв // Земля Беларуси. 2017. № 1. С. 42–45.

Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2008. Т. 1. С. 102–112.

Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.

Ефременко М.А. Современные геодинамически активные зоны Воронежского кристаллического массива по геологическим, геофизическим и сейсмологическим данным / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Геофизическая служба РАН, 2011. 24 с.

Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – настоящее время) Единой информационной системы сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. URL: https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php (04.04.2023).

Костенко Н.П. Геоморфология. М.: МГУ, 1999. 379 с.

Литосфера Воронежского кристаллического массива по петрофизическим и геофизическим данным. Воронеж: Научная книга, 2012. 326 с.

Мануилова Е.А. Новейшие структуры Западно-Сибирской плиты и их связь с нефтегазоносностью / Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. 169 с.

Милюков В.К., Миронов А.П., Овсюченко А.Н., Горбатиков А.В., Стеблов Г.М., Корженков А.М., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М., Агибалов А.О., Сенцов А.А., Dogan U., Ergintav S. Современные тектонические движения Западного Кавказа и Предкавказья по ГНСС наблюдениям // Геотектоника. 2022. № 1. С. 51–67.

Надежка Л.И., Пивоваров С.П., Ефременко М.А., Семенов А.Е. О землетрясениях на территории Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского университета. Серия Геология. 2010. Вып. 1. С. 233–242.

Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа / Под ред. Н.И. Николаева. М.: Недра, 1992. 295 с.

Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность: дистанционное изучение внутреннего строения литосферы / Под ред. акад. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.

Панина Л.В. Новейшие структуры и рельеф Земли. М.: Перо, 2019. 115 с.

Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н, Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.

Сейсмологический каталог Единой Геофизической Службы РАН. URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl (07.03.2023)

Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 250 с.

Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование. М.: Недра, 1975. 184 с.

Таскин В.В., Сидоров М.Д. Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 243–252.

Трегуб А.И. Карта новейшей тектоники территории Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ. Серия Геология. 2006. № 1. С. 5–16.

Уломов В.И., Медведева Н.С. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии. URL: seismos-u.ifz.ru/documents/Earthquake-CatalogCK3.pdf (07.07.2022)

Хубаева О.Р., Бергаль-Кувикас О.В., Сидоров М.Д. Идентификация разрывных нарушений северной части острова Парамушир (Курильские острова, Россия) и их взаимосвязь с гидротермально-магматическими системами: 3D моделирование тектонической раздробленности // Геотектоника. 2020. № 6. С. 77–90.

Цифровая модель рельефа. URL: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ (22.11.2022)

Электронная база данных топографических карт. URL: http://www.etomesto.ru/map-genshtab/ (02.01.2023)

Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503.

Development of Methods for Integrated Morphometric Relief Analysis for Assessment of Tectonic Fragmentation of the Subsoil

A. L. Sobisevich[1, *], A. O. Agibalov[1, 3], O. V. Bergal-Kuvikas[2], V. A. Zaitsev[3], D. S. Zykov[4], V. M. Makeev[5], A. V. Poleshchuk[4], A. A. Sentsov[1, **], A. V. Shevchenko[6]

[1]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia
[2]Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
[3]Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119234 Russia
[4]Geological Institute Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia
[5]Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Science, Ulansky lane, 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia
[6]Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Chernyshevsky str., 143, Nalchik, 360004 Russia
**e-mail: agibalo@yandex.ru*
***e-mail: alekssencov@yandex.ru*

Assessment of the degree of tectonic fragmentation of the upper part of the lithosphere, according to the method of Yu.V. Nechaev [2010] is based on calculations of the specific length of lineaments. On the example of three different regions – the Northwestern Caucasus, the Voronezh anteclise, and the Malko-Petropavlovskaya zone of Kamchatka – we have tested the possibility of using other morphometric parameters: the specific lengths of "weak" zones, elongation lines and streams, as well as the Gaussian curvature of the relief. Their anomalies are confined to seismically active areas and areas of manifestation of hydrothermal-magmatic activity. It is shown that the most informative are 3D models of tectonic fragmentation, built taking into account the specific length of "weak" zones and watercourses.

Keywords: tectonic fragmentation, Northwestern Caucasus, Voronezh anteclise, Kamchatka