

УДК 550.34

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОБЛАСТЯХ НОВЕЙШЕГО ТЕКТОГЕНЕЗА НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ (НА ПРИМЕРЕ БОЛЬШОГО КАВКАЗА)

© 2024 г. А. Л. Собисевич^а, Г. М. Стеблов^{а, б}, А. О. Агибалов^{с, а}, И. М. Алёшин^а,
Г. Р. Балашов^а, А. Д. Кондратов^а, В. М. Макеев^д, В. П. Передерин^а, Ф. В. Передерин^а,
Н. К. Розенберг^а, А. А. Сенцов^{а, *}, К. И. Холодков^а, К. В. Фадеева^с

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^бИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^сГеологический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^дИнститут геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*e-mail: alekssencov@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.05.2024 г.

После доработки 14.06.2024 г.

Принята к публикации 27.06.2024 г.

Установлены шестнадцать морфометрических параметров рельефа, положительные аномалии которых соответствуют сейсмоактивным участкам Большого Кавказа. Анализ четырёх наиболее информативных из них γ -оператором нечеткой логики позволил построить схему индекса неотектонической активности, использованной наряду с результатами компьютерного геодинамического моделирования для выделения зон возможных очагов землетрясений. Новый подход не требует детальной информации о современной и палеосейсмичности, поэтому может использоваться для решения аналогичной задачи на слабо изученных в сеймотектоническом отношении территориях. Продемонстрированы взаимосвязь современных деформаций с региональной сейсмичностью и возможности методики линеаментного анализа Ю.В. Нечаева [2010] для выделения активных разломов.

Ключевые слова: зоны возможных очагов землетрясений, нечеткая логика, Большой Кавказ

DOI: 10.31857/S0203030624050049, **EDN:** HNKINR

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается методика применения нечеткой логики для выявления зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) по комплексу геолого-геофизических данных, таких как размах высот, градиент высот, максимальное и минимальное значение аномалии Буге и другие [Гвишиани и др., 2021; Дзебоев и др., 2019]. В настоящей статье использовались результаты структурно-геоморфологического анализа, морфометрические

характеристики рельефа, данные стационарных станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и некоторые другие.

На примере хорошо изученного в сеймотектоническом отношении региона — Большого Кавказа (рис. 1) — нами показаны возможности одного из инструментов нечеткой логики (γ -оператора), помогающего локализовать сейсмоактивные участки по нескольким геоморфологическим параметрам рельефа, а в сочетании с материалами компьютерного

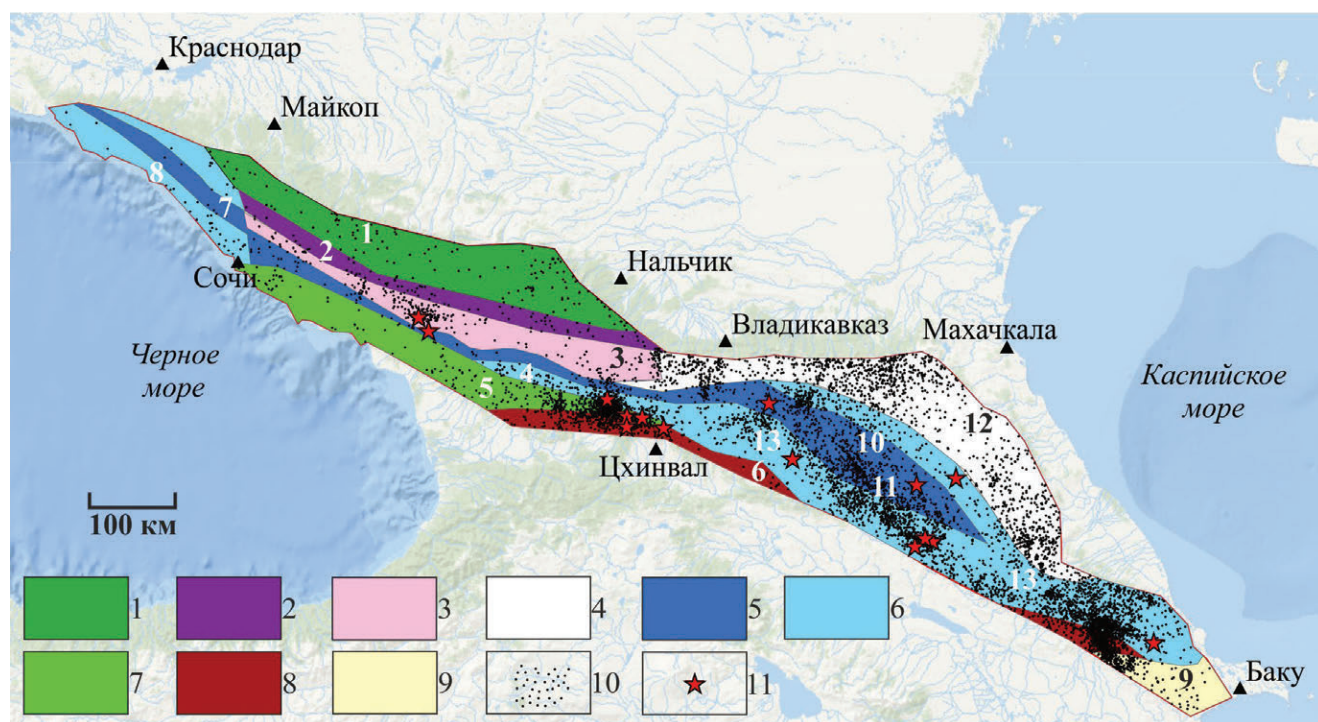


Рис. 1. Схема основных структур Большого Кавказа, по [Короновский, 2011].

1 – Лабино-Малкинская зона; 2 – зона Передового хребта, сложенного палеозоем; 3 – метаморфические палеозойские породы Главного хребта; 4 – северное пологоскладчатое крыло, сложенное мезозоем; 5 – сланцевые толщи нижней – средней юры; 6 – верхнеюрско-меловые, местами флишевые, сложенные умеренно складчатыми вулканогенно-осадочными отложениями мезозоя; 7 – зона, сложенная терригенным лейасом и вулканогенным байосом; 8 – шовная и надвиговая зоны, сложенные сильно дислоцированным мезозоем и кайнозоем; 9 – кайнозойские отложения периклинальных прогибов; 10 – эпицентры современных землетрясений; 11 – эпицентры современных землетрясений с магнитудой ≥ 5.5 .

Цифрами обозначены основные структуры: 1 – Лабино-Малкинская зона; 2 – зона Передового хребта; 3 – палеозойская структура Главного хребта; 4 – Сванетский антиклинорий, сложенный силуром – триасом; 5 – Гагро-Джавская зона; 6 – шовная и надвиговая Кахетино-Лечхумская зоны; 7 – Гойтхский антиклинорий; 8 – Новороссийско-Сочинский антиклинорий; 9 – Апшероно-Кобыстанский передовой прогиб; 10 – структуры Главного (осевого) хребта; 11 – структуры Бокового хребта; 12 – известняковый Дагестан; 13 – Чиауро-Дибарский синклиний.

геодинамического моделирования — выделить зоны ВОЗ. Хорошая изученность позволила оценить достоверность этих результатов путем их сопоставления с распределением эпицентров современных землетрясений по площади.

Целью исследования является разработка методического подхода и принципов выявления зон ВОЗ на основе геолого-геоморфологических факторов и инструментария нечеткой логики. Предложенная методика может быть использована для решения аналогичных задач в регионах, сейсмичность которых недостаточно исследована инструментальными, палео- и археосейсмологическими методами.

Практическая значимость связана с возможностью применения полученных результатов при создании линейно-доменно-фокальных моделей, востребованных для разработки карт общего сейсмического районирования

нового поколения, а также оценок сейсмической опасности и риска.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения геоморфологических исследований были использованы цифровая модель рельефа (ЦМР) ASTER разрешением 1 угловая секунда (~30 м) [Цифровая..., 2024] и схема водотоков [Lehner, Grill, 2013]. Нами рассчитаны 16 морфометрических параметров рельефа (табл. 1), которые могут быть использованы для оценки направленности и интенсивности новейших движений, выделения активных морфоструктур (пликативных и дизъюнктивных) [Нетребин, 2012; Симонов, 1999; Трегуб, 2010; Философов, 1960]. Асимметрия высот, средняя высота и глубина вертикального расчленения, равная разности максимальной и минимальной

Таблица 1. Квартильные значения морфометрических характеристик рельефа Большого Кавказа

№	Параметр	Q1	Медиана	Q3
1	Разность базисных поверхностей 1 и 2 порядков, м	15	109	271
2	Разность базисных поверхностей 2 и 3 порядков, м	27	157	371
3	Разность базисных поверхностей 3 и 4 порядков, м	124	414	700
4	Разность базисных поверхностей 4 и 5 порядков, м	46	198	348
5	Разность гипсометрической и базисной поверхности 4 порядка, м	630	1262	1910
6	Разность гипсометрической и базисной поверхности 5 порядка, м	792	1515	2165
7	Глубина вертикального расчленения рельефа, м	1201	1719	2108
8	Наклон рельефа, °	9.4	17	24.4
9	Кривизна рельефа, взятая по модулю, $\times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$	96	224	444
10	Дисперсия глубины вертикального расчленения рельефа, м	77	113	161
11	Дисперсия наклона рельефа, °	6.5	7.5	8.5
12	Дисперсия кривизны рельефа, взятая по модулю, $\times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$	216	318	391
13	Дисперсия высот, м	237	346	437
14	Средняя высота, м	1017	1718	2285
15	Плотность линеаментов, км^{-1}	0.21	0.24	0.27
16	Асимметрия высот	−0.05	0.18	0.45

Примечание. Q1 — первый квартиль, Q3 — третий квартиль.

высот, определены в ячейках размерами 15×15 км. По значениям, превышающим медиану (или 3-й квартиль), были выделены положительные аномалии морфометрических параметров, занимающие 50 и 25% площади Большого Кавказа, соответственно. Показано, что в их пределах расположена значительная часть эпицентров современных землетрясений с глубиной гипоцентра ≤ 45 км (период наблюдения — с октября 1905 г. по июнь 2023 г., интервал магнитуд — от -0.5 до 6.3) [Сейсмический..., 2024] (табл. 2). Эти данные позволяют сделать вывод об информативности 16-ти морфометрических параметров для выделения сейсмоактивных участков. Ограничение глубины гипоцентров до 45 км связано с неприменимостью структурно-геоморфологических методов для изучения больших глубин земной коры вследствие ее тектонической расслоенности.

Поскольку сейсмичность обусловлена характером современных деформаций, нами

проанализированы перемещения пунктов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [База..., 2024; Милюков и др., 2022; Миронов и др., 2021] (табл. 3). На основе этих данных рассчитана величина площадной деформации элементов покрытия по формуле

$$\varepsilon = \frac{S_2 - S_1}{S_1}, \quad (1)$$

где S_1 — площадь элемента покрытия без учета смещений, S_2 — площадь элемента покрытия с учетом смещения его вершин за 1 год [Стеблов и др., 2022]. В качестве элементов покрытия послужили треугольники Б.Н. Делоне [1934], вершины которых соответствуют пунктам ГНСС. Триангуляция Делоне выполнена с помощью стандартных инструментов среды ArcMap, значения S_1 и S_2 рассчитаны в метрической системе координат WGS1984 World Mercator. Полученные данные о характере современной деформации были использованы для выделения сейсмоактивных участков

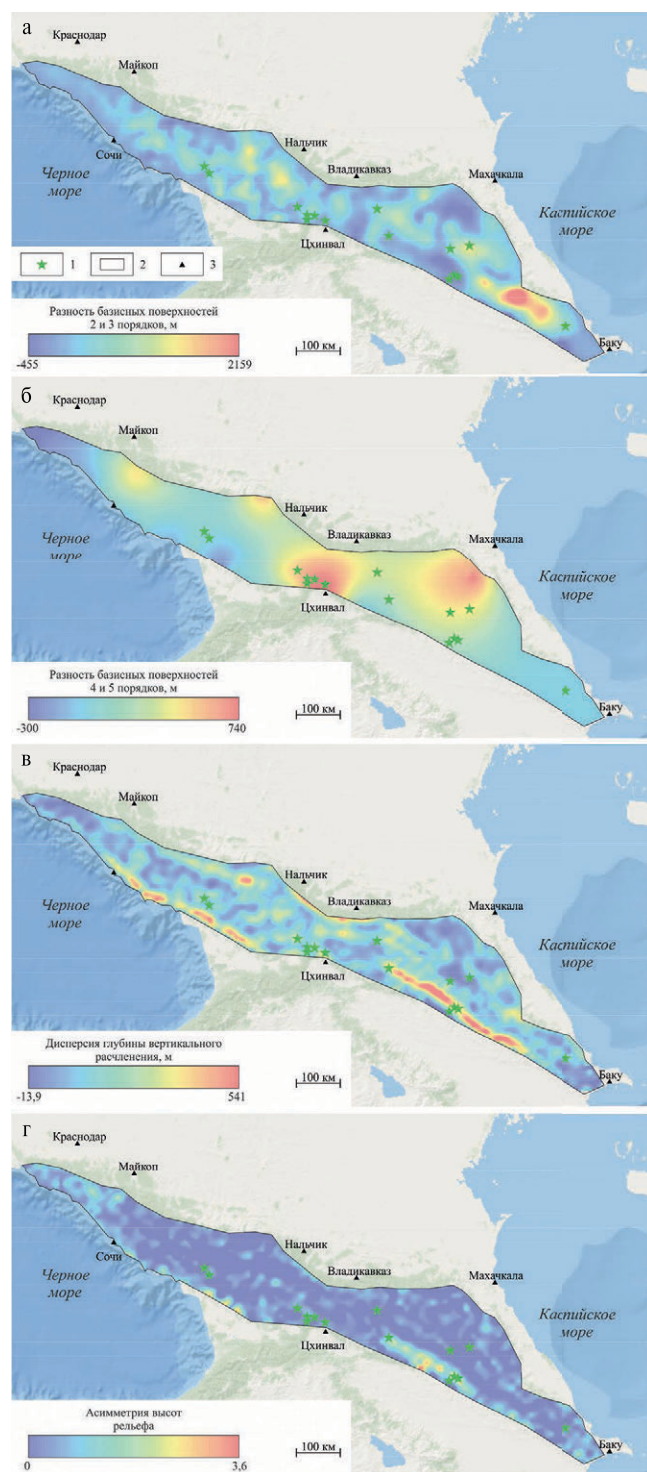


Рис. 2. Схемы морфометрических параметров рельефа Большого Кавказа, использованных в качестве исходных данных для анализа γ -оператором нечеткой логики.

I — схема разности базисных поверхностей 2 и 3 порядков, II — схема разности базисных поверхностей 4 и 5 порядков, III — схема дисперсии глубины вертикального расчленения рельефа, IV — схема асимметрии высот рельефа.

1 — эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$ [Сейсмический..., 2024]; 2 — границы Большого Кавказа, по [Короновский, 2011]; 3 — города.

и оценки максимальной моментной магнитуды ожидаемого землетрясения на территории Большого Кавказа по эмпирической формуле

$$M_{max} = 5.0 + 1.88 \lg(L) + 0.63 \lg(G) + 0.63 \lg(t_{ож}), \quad (2)$$

где L — длина разрыва (км), G — скорость деформаций (год^{-1}), $t_{ож}$ — время ожидания, равное 50 лет [Руководство..., 2024a].

На следующем этапе из множества морфометрических характеристик рельефа, повышенные значения которых маркируют области концентрации эпицентров землетрясений, выбраны 4 наиболее информативных: 1) разность базисных поверхностей 2 и 3 порядков; 2) разность базисных поверхностей 4 и 5 порядков; 3) дисперсия глубины вертикального расчленения рельефа; 4) асимметрия высот рельефа (рис. 2). Для каждого из перечисленных параметров были выделены две группы областей. В первой группе значения характеристик превышают медианное значение, рассчитанное по региону, во второй группе эти значения превышают величину третьей квартили. Очевидно, что увеличение порога приводит к сокращению суммарной площади областей. Для выбранных параметров выполняется условие его информативности: при сокращении исследуемой площади при переходе порога от медианы к третьей квартилю, доля эпицентров всех землетрясений, расположенных в выделяемых областях, сокращается менее чем в 2 раза.

При дальнейшей обработке морфометрических данных нами был использован подход, основанный на γ -операторе нечеткой логики [Zimmerman, 1996], который ранее применялся для прогноза мест образования оползней Индии и Нигерии [Abdulrazzaq et al., 2020; Balamurugan et al., 2016; Sema et al., 2017; Tangestani, 2004]. Растры морфометрических параметров были преобразованы в нечеткие множества, элементы которых принимают значения от 0 до 1. Это преобразование выполнено на основе линейной функции принадлежности трапецеидального вида:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0 \\ \frac{x - x_0}{x_{m1} - x_0}, & x_0 \leq x < x_{m1} \\ 1, & x_{m1} \leq x \leq x_{m2} \\ \frac{x_n - x}{x_n - x_{m2}}, & x_{m2} < x \leq x_n \\ 0, & x > x_n \end{cases}, \quad (3)$$

Таблица 2. Доля эпицентров землетрясений Большого Кавказа, расположенных в областях, где значения морфометрических параметров рельефа превышают медиану и третий квартиль

№ параметра	Доля эпицентров землетрясений с магнитудой M , расположенных в областях, где значения морфометрических параметров рельефа превышают			
	медиану		третий квартиль	
	все значения M	$M \geq 5.5$	все значения M	$M \geq 5.5$
1	0.51	0.40	0.25	0.20
2	0.57	0.60	0.35	0.20
3	0.36	0.27	0.18	0.20
4	0.58	0.73	0.31	0.47
5	0.50	0.27	0.23	0.20
6	0.50	0.33	0.21	0.27
7	0.41	0.47	0.20	0.13
8	0.46	0.60	0.22	0.20
9	0.47	0.53	0.22	0.20
10	0.62	0.67	0.33	0.40
11	0.41	0.33	0.18	0.20
12	0.40	0.33	0.18	0.13
13	0.39	0.27	0.19	0.13
14	0.43	0.40	0.17	0.20
15	0.40	0.47	0.12	0.07
16	0.51	0.67	0.25	0.40

Примечание. Зеленым выделены параметры, использованные в качестве исходных данных для анализа γ -оператором нечеткой логики.

где x — значение функции принадлежности μ , x_0 — начальное значение диапазона, x_n — конечное значение диапазона, x_m — значение, при котором значение функции принадлежности максимально [Демидова, Лукичев, 2017; Такака, Асаи, 1984]. В нашей работе рассмотрен частный случай этой функции, когда были заданы только 2 значения: x_0 , соответствующее минимальному значению морфометрического параметра и x_m , соответствующее его максимальному значению. Тогда на графике $\mu_A(x)$ (по оси ординат) — x (по оси абсцисс) форма функции принадлежности выглядит как левая часть описанной формулой (3) трапеции, а сама формула приобретает вид

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - x_0}{x_m - x_0}, & x_0 \leq x < x_m \\ 1, & x = x_m \end{cases} \quad (4)$$

Данный алгоритм реализован в инструменте “Fuzzy membership” программы ArcMap.

Для обработки полученных нечетких множеств использованы нечеткая сумма

$$\mu_{Summ} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (5)$$

и нечеткое произведение

$$\mu_{Prod} = \prod_{i=1}^n \mu_i, \quad (6)$$

которые применяются для анализа γ -оператором нечеткой логики:

$$\mu(x) = (\mu_{Summ})^\gamma \times (\mu_{Prod})^{(1-\gamma)}, \quad (7)$$

где γ — параметр, варьирующий от 0 до 1. Если значение γ стремится к 0, то значение $\mu(x)$ будет стремиться к нечеткому произведению (6). Если γ стремится к 1, то выражение (7) будет приближаться к нечеткой сумме (5). Нами были опробованы

Таблица 3. Горизонтальные скорости перемещения пунктов ГНСС Большого Кавказа, по [База..., 2024; Милюков и др., 2022; Миронов и др., 2021]

Название	Координаты		V_E , мм/год	V_N , мм/год
BAKU	49.814° в.д.	40.372° с.ш.	3.49	1.42
SANG	49.446° в.д.	40.203° с.ш.	5.95	0.45
KHID	49.237° в.д.	39.818° с.ш.	2.66	6.97
SIYE	49.120° в.д.	41.066° с.ш.	0.62	0.17
MEDR	48.551° в.д.	40.614° с.ш.	2.72	4.48
SAMU	48.529° в.д.	41.595° с.ш.	0.00	2.35
KURD	48.148° в.д.	40.333° с.ш.	2.94	11.01
KEBE	47.863° в.д.	40.975° с.ш.	0.00	5.06
SHEK	47.250° в.д.	41.132° с.ш.	0.13	6.21
YEVL	47.146° в.д.	40.626° с.ш.	0.00	4.38
DALL	46.027° в.д.	40.897° с.ш.	3.81	7.95
KTYX	46.511° в.д.	41.652° с.ш.	0.00	5.41
NICH	44.526° в.д.	41.831° с.ш.	0.26	5.81
STEP	44.364° в.д.	41.031° с.ш.	1.83	5.10
15vl	43.065° в.д.	44.675° с.ш.	26.45	11.70
23a3	44.854° в.д.	37.354° с.ш.	24.82	11.83
23gk	44.623° в.д.	39.133° с.ш.	24.17	14.05
23tu	44.109° в.д.	39.071° с.ш.	26.30	11.21
TUAP	44.109° в.д.	39.071° с.ш.	25.35	10.98
ADLR	43.460° в.д.	39.922° с.ш.	24.15	9.48
APSH	44.465° в.д.	39.735° с.ш.	25.68	11.25
KZLR	43.844° в.д.	46.731° с.ш.	24.76	9.22
NCHK	43.498° в.д.	43.648° с.ш.	21.63	6.14
SVRP	44.843° в.д.	38.665° с.ш.	25.22	11.83
TROI	45.146° в.д.	38.114° с.ш.	26.20	9.98
ZECK	43.788° в.д.	41.565° с.ш.	25.63	11.72
GELM	44.551° в.д.	38.049° с.ш.	23.30	13.20
MKPI	44.277° в.д.	40.192° с.ш.	25.50	10.10
VLKK	43.046° в.д.	44.677° с.ш.	26.38	11.51
UO01	42.382° в.д.	43.916° с.ш.	26.48	12.60
TRSK	43.275° в.д.	42.500° с.ш.	25.27	11.46
KISL	43.742° в.д.	42.663° с.ш.	25.85	11.36

Примечание. V_E — скорость перемещения на восток, V_N — скорость перемещения на север.

значения $\gamma = 0.25, 0.5, 0.75$ и 0.9 . Эмпирически установлено, что при $\gamma = 0.9$ схема степени принадлежности, которую можно обозначить как схему индекса неотектонической активности (I), наилучшим образом согласуется с данными

о распределении эпицентров землетрясений по площади, в том числе высокомагнитудных ($M \geq 5.5$). Данный подход реализован в модуле “Fuzzy overlay” программы ArcMap. В нашем случае параметр I принимает значения от 0 до 0.75.

Количество землетрясений с $M \geq 5.5$ невелико ($N = 15$) по сравнению с общим объемом выборки малоглубинных ($H \leq 45$ км) сейсмических событий ($N = 8077$), однако данные о локализации эпицентров высокомагнитудных землетрясений принципиально важны при выделении зон ВОЗ.

С целью оценки прогностичности (качества) индекса неотектонической активности (I) построены ROC-диаграммы. Для этого в ячейках размерами 15×15 км рассчитаны 2 параметра: $I_{\max}$, соответствующее максимальному значению индекса неотектонической активности, и S , равное 1, если в ячейке расположен эпицентр землетрясения. В остальных случаях $S = 0$. Расчеты выполнены в программе SPSS Statistics 27 как с учетом всех эпицентров, так и только для высокомагнитудных событий.

В качестве зон ВОЗ были выделены области локализации максимальных сжимающих напряжений, где значение $I \geq 0.6$ и достаточно высокая концентрация современных сейсмических событий. Относительные величины сжимающих напряжений были оценены методом компьютерного геодинамического моделирования [Сенцов, 2022; Стеблов и др., 2023], методика которого предполагает построение по высотам рельефа упругой однородной модели с заданными физико-механическими свойствами, определяемыми значениями коэффициентов Пуассона (0.25) и внутреннего трения (0.60). На поверхность модели наносится сетка разрывных нарушений, по которым происходят движения блоков при указанном типе внешней нагрузки. Для Большого Кавказа он определен по 23 решениям фокальных механизмов очагов землетрясений [Лукк, Шевченко, 2019], обработанных методом катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий и др., 2017]. Динамические подвижки по разломам приводят к изменению поля напряжений и возникновению новых трещин. В целом этот процесс описан законом Кулона–Мора, определяющим зависимость касательных напряжений от величины приложенных нормальных напряжений (σ). В использованной программе [Руководство..., 2024б] значения σ выбираются произвольно и считаются достаточными для появления новых трещин и разломов малой протяженности, поэтому

моделирование позволяет оценить только относительные величины сжимающих и растягивающих напряжений. Поскольку Большой Кавказ, судя по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений, находится в обстановке сжатия, ось которого полого погружается под углом 17° по азимуту 15° , для выделения зон ВОЗ информативны области повышенных значений сжимающих напряжений.

Оценка максимальной ожидаемой магнитуды землетрясения в пределах зон ВОЗ выполнена по формулам

$$M_{\max} = 0.5 + M_{\max}, \quad (8)$$

где $M_{\max}$ — максимальная зарегистрированная магнитуда [Руководство..., 2024а], и

$$\lg(L) = (0.59 \pm 0.02)M_{\max} - (2.44 \pm 0.11), \quad (9)$$

где L — длина разлома (км) [Wells, Coppersmith, 1994].

В качестве вспомогательного метода использован алгоритм Ю.В. Нечаева [2010], направленный на оценку степени тектонической раздробленности верхней части литосферы по удельной длине линеаментов, равной отношению суммарной протяженности линеаментов в расчетной ячейке с ребром a к ее площади (a^2). Варьируя значения a , можно оценить степень раздробленности на разной глубине (h). Эмпирически установлено соотношение $h=a/2$. Выделение линеаментов выполнено структурно-геоморфологическим методом Н.П. Костенко [1999]. Для изучения тектонической раздробленности были построены 9 вертикальных профилей поля тектонической раздробленности с шагом 150 км, на которых проявлен ряд активных разломов [Zelenin et al., 2022] и очагов крупных землетрясений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На схеме индекса неотектонической активности выделяются положительные аномалии, где значение I варьирует от 0.60 до 0.75. Они занимают 22% площади Большого Кавказа, при этом в их пределах расположено 37% эпицентров землетрясений, в том числе 60% высокомагнитудных. Достоверность взаимосвязи

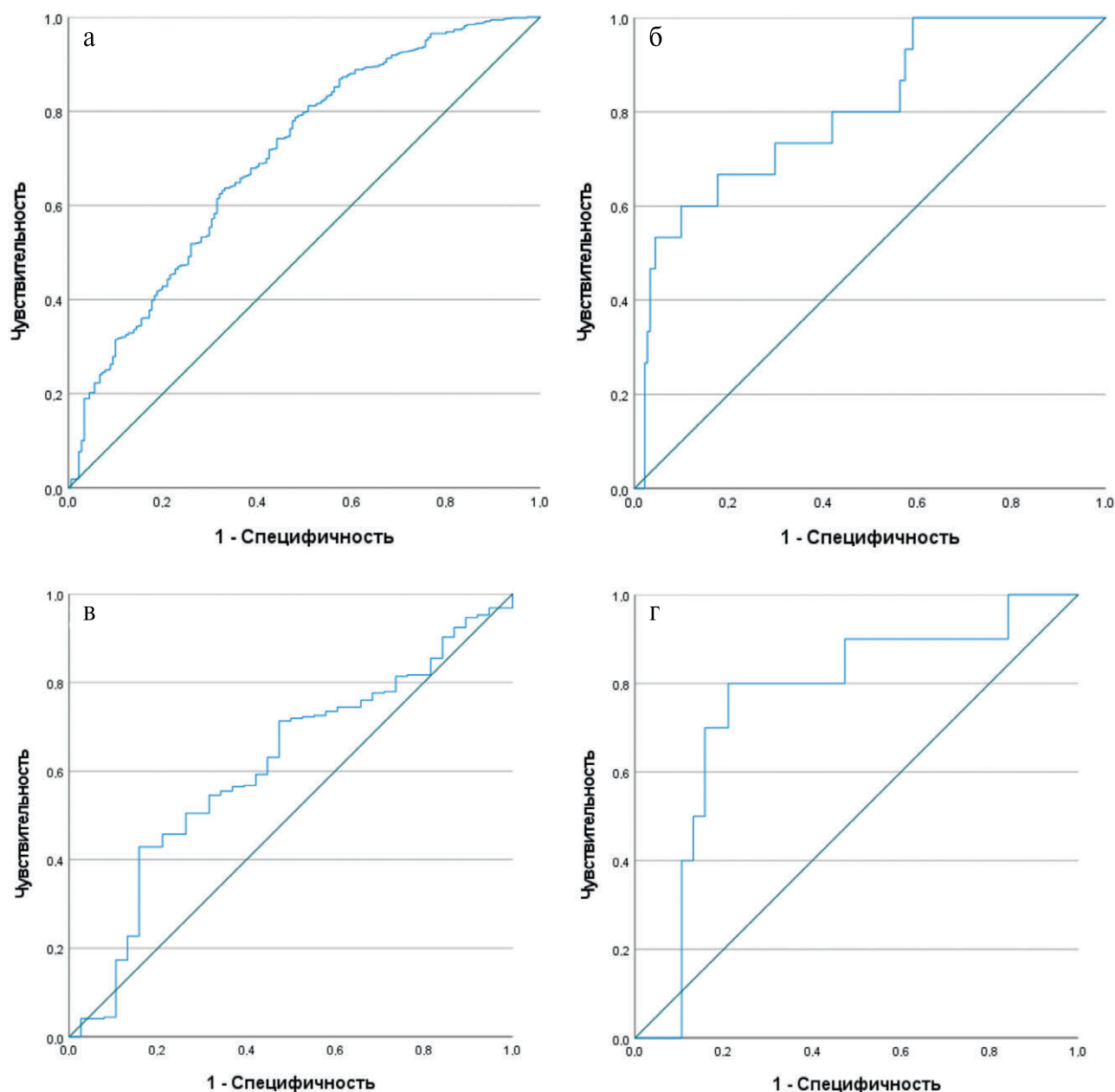


Рис. 3. ROC-кривые (синие линии), построенные для индекса неотектонической активности (I) и эпицентров землетрясений Большого Кавказа.

I — для всех землетрясений; II — для землетрясений с $M \geq 5.5$; III — для всех землетрясений с учетом фильтра $I \geq 0.6$; IV — для землетрясений с $M \geq 5.5$ с учетом фильтра $I \geq 0.6$. Зеленые линии — границы случайного распределения.

значений (I) с сейсмичностью подтверждается результатами ROC-анализа, который позволяет оценить прогностичность построенных моделей: на всех диаграммах соответствующие кривые расположены выше границы случайного распределения (рис. 3). Значение AUC (площади под графиком) для всей выборки сейсмических событий составляет 0.70, для высокомагнитудных землетрясений — 0.80,

а для $I \geq 0.6$ эти значения составляют 0.60 и 0.76 соответственно.

Показана информативность использования данных о величине современной деформации для оконтуривания сейсмоактивных участков: 54% эпицентров землетрясений, в том числе 67% — высокомагнитудных расположены в областях, где $|\epsilon| \geq 36 \times 10^{-9}$ (медианное значение) (рис. 4). Однако использование значений

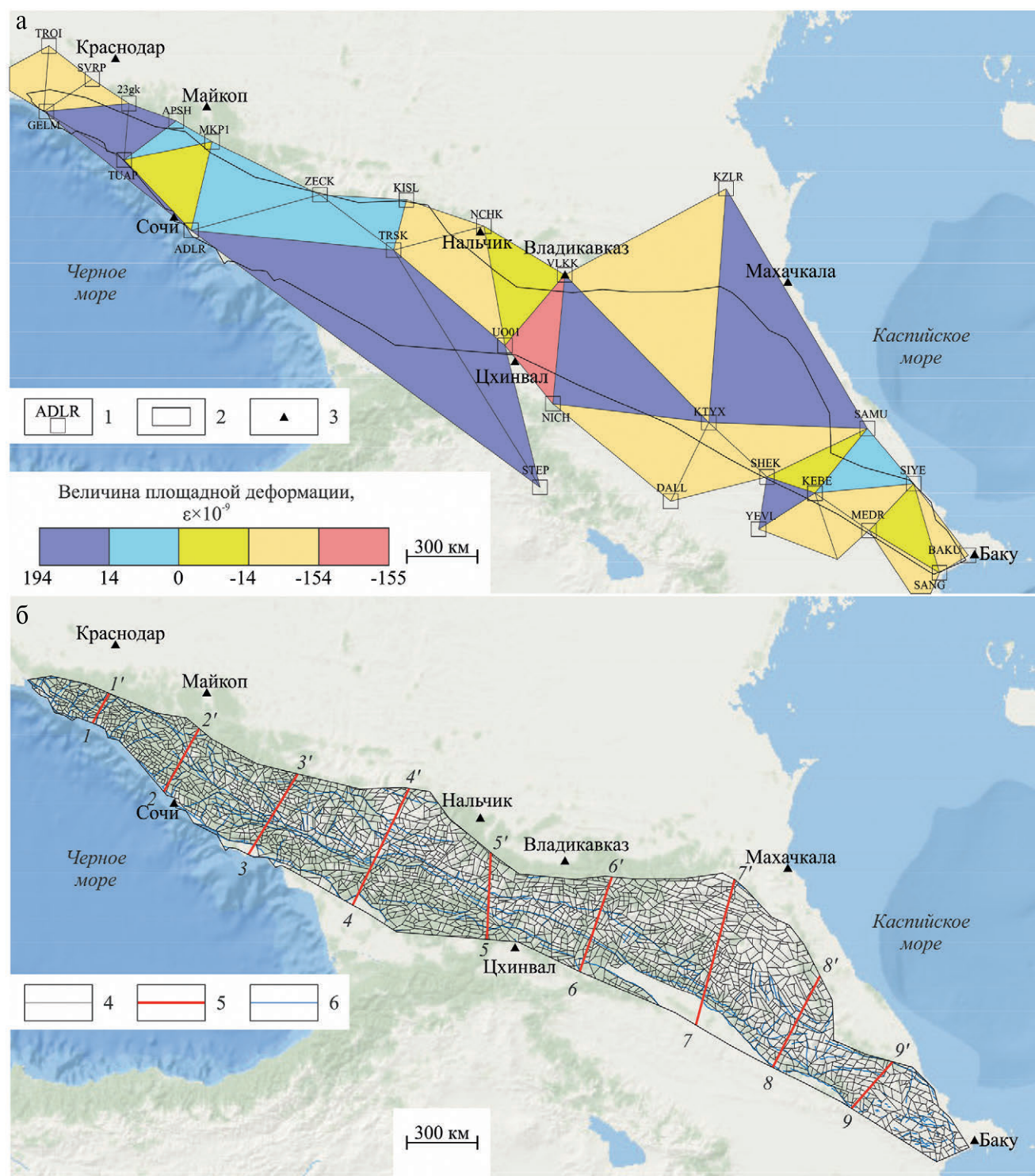


Рис. 4. Схемы современной площадной деформации (ϵ) (I) и расположения профилей степени тектонической раздробленности (II). 1 — пункты ГНСС, по [База..., 2024; Милуков и др., 2022; Миронов и др., 2021]; 2 — границы Большого Кавказа, по [Короновский, 2011]; 3 — города; 4 — “слабые” зоны; 5 — линии профилей степени тектонической раздробленности; 6 — активные разрывные нарушения, по [Zelenin et al., 2022].

$|\epsilon|$ в качестве одного из параметров, обработанных γ -оператором, не вносит значимого вклада в уточнение схемы I. В то же время данные

ГНСС позволили оценить M_{max} по формуле (2) для всей территории Большого Кавказа. При $L = 1100$ км и $G = 36 \times 10^{-9}$ год $^{-1}$ $M_{max} = 7.1$, что

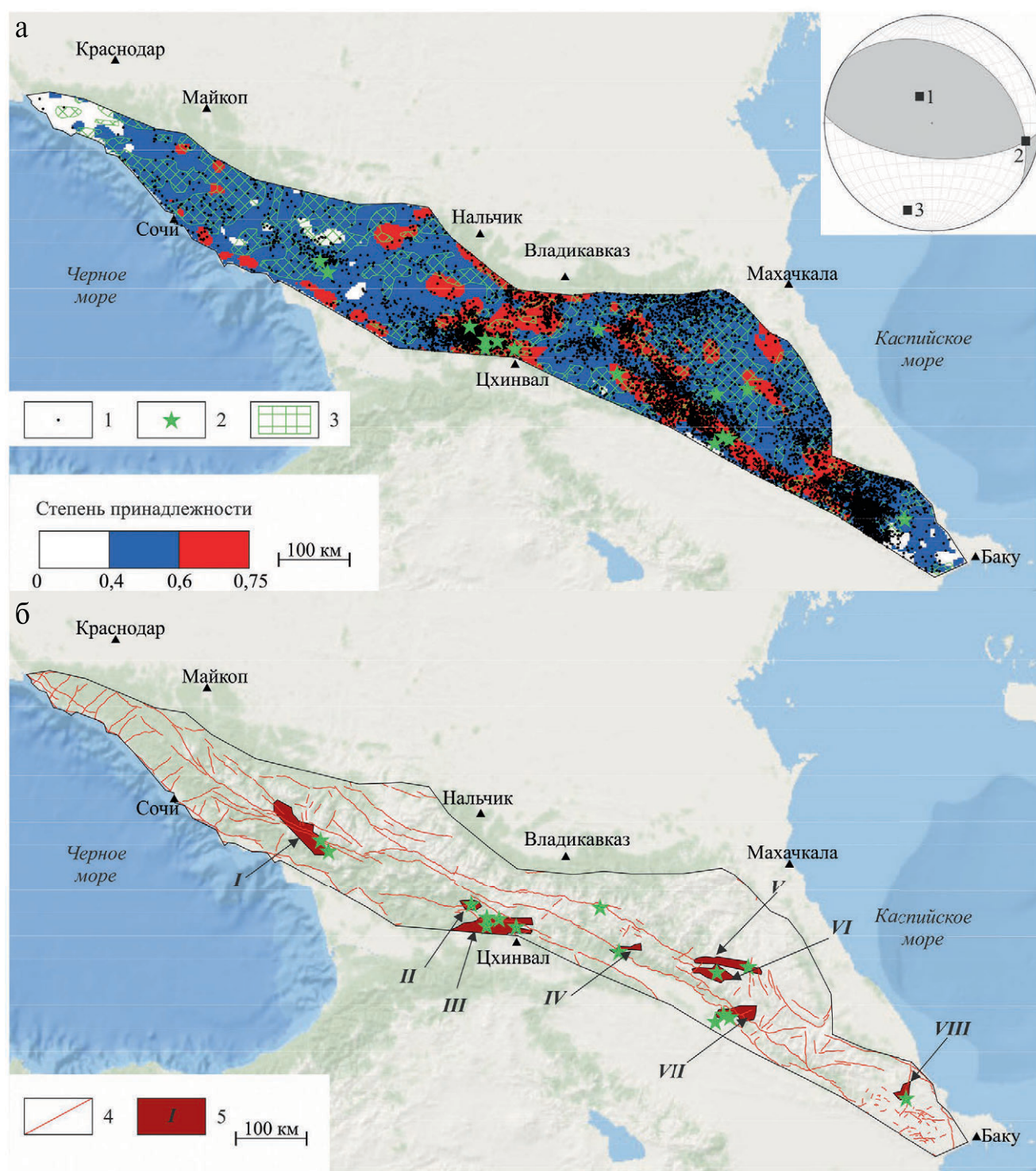


Рис. 5. Схемы индекса неотектонической активности, полученная по результатам анализа γ -оператором нечеткой логики (I) и зон ВОЗ Большого Кавказа (II).

1 — эпицентры землетрясений с $M < 5.5$ [Сейсмический..., 2024]; 2 — эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$ [Сейсмический..., 2024]; 3 — области локализации максимальных сжимающих напряжений, выделенные по результатам компьютерного геодинамического моделирования; 4 — активные разрывные нарушения, по [Zelenin et al., 2022]; 5 — зоны ВОЗ, номера которых вынесены стрелками.

На врезке — реконструкция положений главных нормальных осей напряжений по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений (нижняя полусфера): серое — области растяжения, белое — сжатия; 1–3 — главные нормальные оси напряжений: 1 — растяжения, 2 — промежуточная, 3 — сжатия.

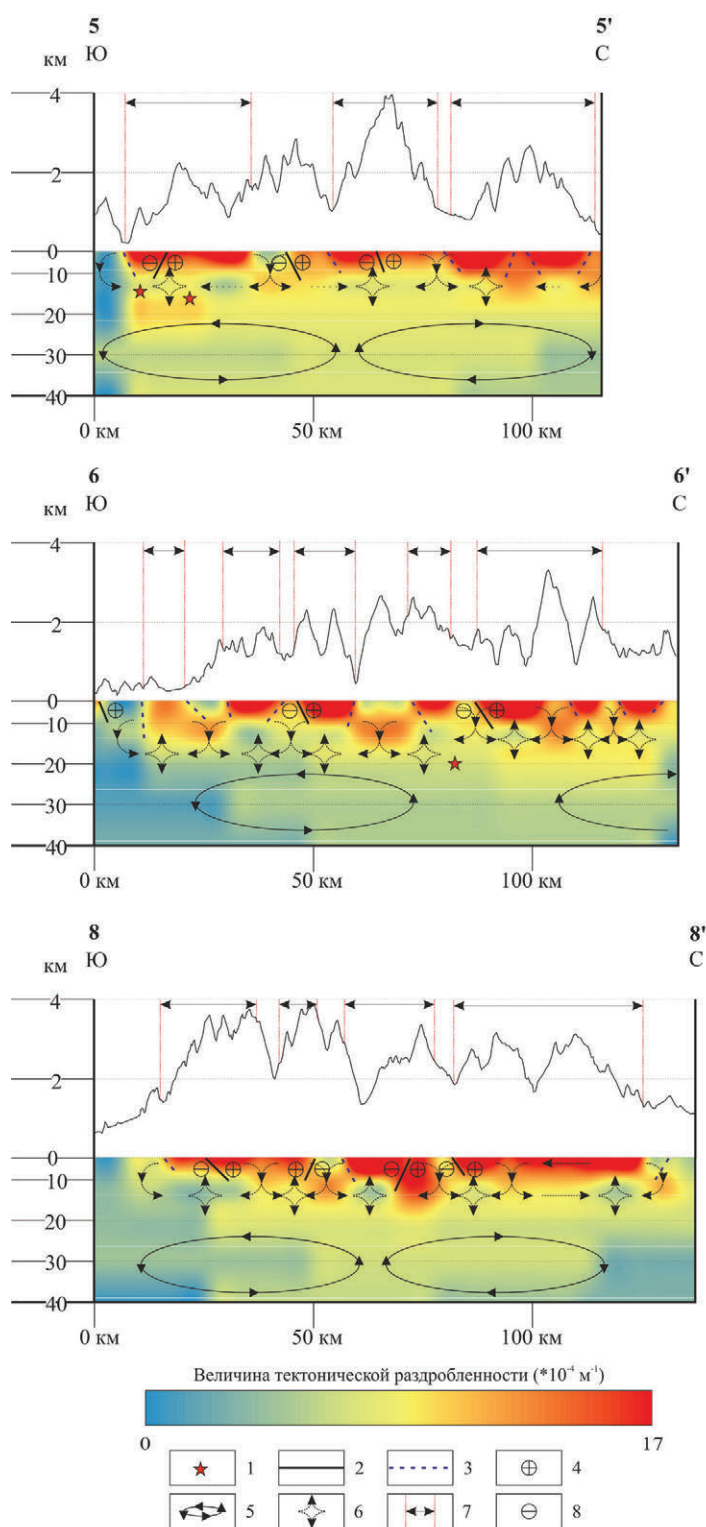


Рис. 6. Вертикальные профили поля тектонической раздробленности Большого Кавказа (линии профилей приведены на рис. 3, II).

1 — гипоцентры землетрясений с $M > 5.5$ [Сейсмический..., 2024]; 2 — активные разломы, по [Zelenin et al., 2022], выраженные в поле тектонической раздробленности; 3 — линейменты, выраженные в поле тектонической раздробленности; 4 — поднятое крыло разлома; 5, 6 — предполагаемые границы конвективных ячеек первого (5) и второго (6) ранга; 7 — области наиболее интенсивного воздымания, выделенные по рельефу; 8 — опущенное крыло разлома.

Таблица 4. Максимальные магнитуды ($M_{\max}$) землетрясений в пределах зон ВОЗ Большого Кавказа

№ зоны ВОЗ	$M_{\max}$, рассчитанная по формуле (8)	$M_{\max}$, рассчитанная по формуле (9)	$M_{\max}$, зарегистрированная
I	7	7.3	6.5
II	6.2	6.5	5.7
III	6.8	7.2	6.3
IV	6.1	5.8	5.6
V	6.5	—	6
VI	6.2	—	5.7
VII	6.2	6.8	5.7
VIII	6	6.4	5.5

Примечание. Через домены V и VI не проходят активные разрывные нарушения, рассмотренные в работе [Zelepin et al., 2022], поэтому для них $M_{\max}$ по формуле (9) не определена.

на 0.6 единицы превышает реальную магнитуду самого крупного землетрясения за инструментальный период.

Одним из главных результатов исследования является схема зон ВОЗ (рис. 5). Всего выделено 8 таких зон, в пределах которых находятся 14 из 15-ти эпицентров высокомагнитудных событий. Оцененные по эмпирическим формулам (8) и (9) значения $M_{\max}$ в их пределах хорошо согласуются с инструментальными сейсмическими наблюдениями (табл. 4).

На глубинных профилях поля тектонической раздробленности выделяется значительная часть активных разломов. На профилях 1–1' и 9–9' проявлены все разломы, которые этот профиль пересекает, на профилях 2–2' и 8–8' — 80% разломов, на профилях 4–4', 5–5', 6–6' — 75%, на профиле 3–3' — 57%, на профиле 7–7' — 33%. Таким образом, в среднем на профиле выражено 75% активных разломов. К градиентным зонам поля тектонической раздробленности приурочены очаги высокомагнитудных землетрясений, отмеченные на профилях 5–5' и 6–6'. На глубине ~20 км наблюдается значительное изменение характера раздробленности: не прослеживаются выраженные в верхней части профилей градиентные зоны, снижается значение УДЛ. Этот факт может быть объясним в рамках модели конвективной геодинамики иерархически соподчиненных геосфер: по данным [Гончаров и др., 2005], на этой глубине проходит граница между конвективными ячейками разного масштабного уровня (рис. 6).

В то же время уменьшение степени раздробленности может быть связано с тем, что при последовательном увеличении размера расчетной ячейки суммарная протяженность линейных элементов (в числителе УДЛ) возрастает медленнее, чем площадь ячейки (в знаменателе УДЛ). В связи с этим предложенная интерпретация требует уточнения в ходе дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для территории Большого Кавказа определен комплекс морфометрических параметров рельефа, информативных для оконтуривания сейсмоактивных участков, которые также выделяются по положительным аномалиям величины площадной современной деформации. Показано, что анализ нечеткой логикой 4-х морфометрических характеристик, дополненный результатами компьютерного геодинамического моделирования, позволяет выделять зоны ВОЗ. Этот подход не требует использования детальных результатов инструментальных сейсмических наблюдений, поэтому может применяться для оконтуривания сейсмоактивных участков и зон ВОЗ на труднодоступных и слабо изученных в сейсмотектоническом отношении территориях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках госзаданий ИФЗ РАН (№ 075-01030-23), ИТПЗ РАН (№ 075-00605-24-00), ИГЭ РАН (№ 122022400105-9) и НИР

“Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ” (МГУ имени М.В. Ломоносова).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

База данных скоростей ГАО РАН. URL: https://www.gaoran.ru/russian/database/station/databasev_rus.html. Дата обращения 24.04.2024

Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А., Агаян С.М., Белов И.О., Николова Ю.И. Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линейментов на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны Прибайкалье // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 3–10.

Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику / Отв. ред. Н.В. Короновский. М.: КДУ, 2005. 496 с.

Делоне Б.Н. О пустоте сферы // Изв. АН СССР. ОМОН. 1934. № 4. С. 793–800.

Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 81 с.

Дзедобов Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Татаринцев В.Н., Агаян С.М., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения. I. Алтай-Саяны-Прибайкалье. $M \geq 6.0$ // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47.

Короновский Н.В. Геология России и сопредельных территорий. М.: Академия, 2011. 240 с.

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

Лук А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // Физика Земли. 2019. № 4. С. 99–123.

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

Миронов А.П., Милуков В.К., Стеблов Г.М., Дробышев В.Н., Кусраев А.Г., Хубаев Х.М. Деформации земной коры в осетинском регионе Большого Кавказа по данным ГНСС-измерений // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 4. С. 122–137.

Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа / Дисс. ... канд. географ. наук. Краснодар, 2012. 227 с.

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

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ-19-18. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556827973?ysclid=lsps4wak119308334>. Дата обращения 17.02.2024а

Руководство пользователя “Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)”. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2. Дата обращения: 20.02.2024б

Сейсмический каталог Международного сейсмологического центра (ISC). URL: <https://isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>. Дата обращения 20.04.2024

Сенцов А.А. Сейсмоструктура опасных областей Восточно-Европейской платформы / Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2022. 116 с.

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

Справочник по инструментам ArcGis Pro. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference>. Дата обращения 20.04.2024

Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Макеев В.М., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Сенцов А.А. К проблеме оценки максимально возможных магнитуд землетрясений острова Сахалин различными методами // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 4. С. 25–35.

Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Мельник Г.Э., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Сенцов А.А. Анализ современных движений и деформаций земной коры по данным ГНСС // Физика Земли. 2022. № 4. С. 19–29.

Трегуб А.И. Морфоструктура Онежского полуострова и дна прилегающей акватории Белого моря на основе статистических моделей рельефа и морфографического анализа // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2010. № 2. С. 59–64.

Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур / Под ред. А.А. Корженевского. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1960. 91 с.

Цифровая модель рельефа. URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Дата обращения 22.04.2024

Abdulrazzaq Z.T., Agbasi O.E., Aziz N.A., Sunday E.E. Identification of potential groundwater locations using

- geophysical data and fuzzy gamma operator model in Imo, Southeastern Nigeria // *Applied Water Science*. 2020. V. 10. № 188.
- Balamurugan G., Ramesh V., Touthang M. Landslide susceptibility zonation mapping using frequency ratio and fuzzy gamma operator models in part of NH-39, Manipur, India // *Nat Hazards*. 2016. V. 84. P. 465–488.
- Lehner B., Grill G. Global River hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. № 27(15). P. 2171–2186.
- Sema H.V., Guru B., Veerappan R. Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017. V. 3. P. 499–514.
- Tanaka H., Asai K. Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers // *Fuzzy Sets and Systems*. 1984. V. 13. № 1. P. 1–10.
- Tangestani M.H. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma approach in a GIS, Kakan catchment area, southwest Iran // *Australian Journal of Earth Sciences*. 2004. V. 51. № 1. P. 439–450.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the seismological Society of America*. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002.
- 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.
- Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its applications. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 435 p.

IDENTIFYING ZONES OF POSSIBLE EARTHQUAKE FOCUS IN AREAS OF NEWEST TECTOGENESIS BASED ON GEOLOGICAL-GEOMORPHOLOGICAL FACTORS AND FUZZY LOGIC TOOLS (ON THE EXAMPLE OF THE GREATER CAUCASUS)

A. L. Sobisevich¹, G. M. Steblov^{1,2}, A. O. Agibalov^{1,3}, I. M. Aleshin¹, G. R. Balashov¹,
A. D. Kondratov¹, V. M. Makeev⁴, V. P. Perederin¹, F. V. Perederin¹, N. K. Rosenberg¹,
A. A. Sentsov^{1, *}, K. I. Kholodkov¹, K. V. Fadeeva³

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 Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

³*Faculty of Geology, Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

⁴*Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Science,
Ulansky lane, 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

*e-mail: alekssencov@yandex.ru

16 morphometric relief parameters have been established, the positive anomalies of which correspond to seismically active areas in the Greater Caucasus region. Analysis of the four most informative parameters using the γ -operator in fuzzy logic has made it possible to create a scheme for a neotectonic activity index. This index was used together with the results of computer geodynamic modeling to identify zones of potential earthquake epicenters. This approach does not require detailed information on modern and past seismic activity, and can therefore be applied to areas that are seismologically understudied. In addition, a relationship between modern deformation and seismic activity is shown, as well as the possibilities of using the technique developed by Yu.V. Nechaev [Nechaev, 2010] to identify active fault zones.

Keywords: zones of possible earthquake focus, fuzzy logic, Greater Caucasus