

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ СЕЙСМИЧНОСТИ И РЕЛЬЕФА
БАЛТИЙСКОГО ЦИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНСТРУМЕНТОВ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИГ. Р. Балашов^{*1}, А. А. Сенцов¹, А. О. Агибалов^{2,1} и И. Н. Пузич¹¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Российская Федерация²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация^{*} **Контакт:** Георгий Романович Балашов, george.balashov.00@yandex.ru

Аннотация: На примере Балтийского щита апробированы разные способы расчёта интегрального морфометрического параметра (F) по комплексу геоморфологических данных, обработанных инструментами нечёткой логики. Сопоставление закономерностей пространственного распределения этого параметра с локализацией эпицентров современных коровых землетрясений показало, что он в определённом приближении отражает степень сейсмотектонической активности. Наилучшее соответствие достигнуто в том случае, когда исходные морфометрические параметры и алгоритм расчёта F подобраны отдельно для каждого мегаблока – Кольско-Карельского, Свекофенского и Свеко-Норвежского. Это объяснимо существенным влиянием геологического строения на рельеф. Сходный результат достигнут при расчёте F в пределах блоков, характеризующихся определённым типом новейшего напряжённого состояния. Тем не менее, взаимосвязь сейсмичности и интегрального морфометрического параметра F статистически значима при определении последнего путем обработки данных о средних высотах, уклонах рельефа и разностях базисных поверхностей 3–4 порядков нечёткой суммой для всей территории Балтийского щита.

Ключевые слова: морфометрический анализ рельефа, нечёткая логика, сейсмичность, Балтийский щит

Цитирование: Балашов Г. Р., Сенцов А. А., Агибалов А. О. и Пузич И. Н. Анализ взаимосвязи сейсмичности и рельефа Балтийского щита с использованием инструментов нечёткой логики // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES3005. — DOI: 10.2205/2026es001023 — EDN: NFXIVV

RESEARCH ARTICLE

<https://elibrary.ru/NFXIVV>

Получено: 12 августа 2025 г.

Принято: 31 октября 2025 г.

Опубликовано: 28 июля 2026 г.



© 2026. Коллектив авторов.

1. Введение

Совершенствование возможностей геоморфологических методов для решения сейсмотектонических задач – перспективное научно-практическое направление, поскольку результаты анализа рельефа востребованы для выделения активных (в том числе сейсмогенерирующих) разломов и зон возможных очагов землетрясений. Развитие этих методов связано с появлением более точных, по сравнению с ранее разработанными, цифровых моделей рельефа (ЦМР) (FABDEM, ArcticDEM), установлением новых связей ряда морфометрических параметров (например, асимметрии и эксцесса высот [Собисевич и др., 2024; Трегуб и Жаворонкин, 2000]) с неотектоническими движениями, а также современными способами получения интегральных морфометрических характеристик путем обработки комплекса геоморфологических данных с использованием кластерного анализа [Агибалов и др., 2022], метода равнозначных градаций [Копылов, 2019] и нечёткой логики [Sobisevich et al., 2024]. Увеличение количества

морфометрических параметров, которые можно достаточно быстро рассчитать благодаря современному программному обеспечению, и способов их автоматизированного анализа обусловило, на наш взгляд, появление методических трудностей. Они заключаются в сложности выбора наиболее информативных для понимания неотектонических (в том числе сеймотектонических) процессов морфометрических характеристик рельефа, оптимального алгоритма их обработки, а также в неоднозначности интерпретации полученных результатов. В связи с этим анализ взаимосвязи сейсмичности и рельефа, а также апробация разных способов расчёта интегральных морфометрических параметров с использованием инструментов нечёткой логики представляется актуальной и интересной задачей. Наша работа посвящена её решению на примере Балтийского щита.

2. Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных послужила ЦМР FABDEM [Hawker and Neal, 2021] с горизонтальным разрешением 1 угловая секунда (~30 м) со средними ошибками вертикальной точности, близкими к 0 м на участках с уклоном $\leq 35^\circ$, и составляющими около 2–3 м при увеличении крутизны склонов до 45° [Смирнов и Кочнева, 2024]. Также были использованы схема водотоков [Lehner and Grill, 2013] и каталог землетрясений [University of Helsinki, 2021]. Нами рассчитаны 7 морфометрических параметров рельефа, в общем случае связанных с интенсивностью и направленностью новейших движений: средние высоты, уклоны рельефа, асимметрия распределения высот, разности базисных поверхностей 1–2, 2–3, 3–4 порядков, высоты остаточного рельефа, полученные путем вычитания базисной поверхности 4-го порядка из гипсометрической.

Средние высоты, рассчитанные по сетке 15×15 км, характеризуют морфологические особенности неотектонической составляющей в рельефе [Трегуб и Шевцов, 2020]. В целом, если территория испытывает восходящие неотектонические движения, абсолютные отметки высот возрастают [Чернова и др., 2015], поэтому их значения и размах высот использованы в [Гусева и Имаева, 2014] в качестве одного из главных показателей новейшей тектонической активности территории России. Отметим, что активные в новейшее время области нередко отличаются развитием крутых склонов [Агибалов и др., 2021], поэтому расчёт уклонов рельефа значим для понимания характера новейших движений и деформаций. Асимметрия распределения высот (A) описывает форму соответствующей функции: при $A = 0$ распределение симметрично, при левосторонней асимметрии ($A > 0$) в распределении преобладают меньшие значения, а в случае правосторонней ($A < 0$) – большие [Геоморфология, 2005]. Согласно [Жаворонкин, 2005], отрицательные значения асимметрии указывают на преобладание процессов денудации, увеличение потенциальной энергии рельефа, а положительные – аккумуляции и выравнивание рельефа. Схемы разности базисных поверхностей и остаточного рельефа, построенные методом Стралера – Философова [Философов, 1960; Strahler, 1952], отражают амплитуды неотектонических движений за интервал времени, соответствующий этапу формирования долин определённых порядков. Их построение сводится к тому, что базисы водотоков каждого порядка отмечаются точками, которым присваиваются высоты рельефа. Интерполяция значений высот позволяет получить базисные поверхности и составить схемы их разности.

С целью количественной оценки взаимосвязи локализации эпицентров коровых землетрясений с глубиной гипоцентра ≤ 40 км [Павленкова, 2019] и морфометрических параметров рельефа нами выделены области, где значения каждого параметра превышают медиану или 3-й квартиль. Исходя из доли эпицентров землетрясений, попадающих в пределы этих областей, выбраны наиболее информативные морфометрические характеристики. Такой статистический анализ проведен для всей территории Балтийского щита (модель 1), а также отдельных мегаблоков (Кольско-Карельского, Свекофенского и Свеко-Норвежского), отличающихся возрастом консолидации коры

(модель 2) [Сенцов, 2022], и ранее выделенных нами блоков с разным типом новейшего напряжённого состояния [Сенцов и Агибалов, 2021].

Выполненный анализ взаимосвязи коровой сейсмичности и рельефа позволил выделить наиболее информативные морфометрические параметры, использованные в дальнейшем для расчёта интегрального показателя F , в определённой степени отражающего степень сейсмотектонической активности. Этот расчёт выполнен с использованием инструментов нечёткой логики. Исходные растры морфометрических параметров преобразованы в нечёткие множества линейной функции принадлежности (μ) трапецеидальной формы, принимающей значения от 0 до 1:

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

где x – значение функции принадлежности μ ; x_0 – начальное значение диапазона; x_n – конечное значение диапазона; x_{m1} и x_{m2} – минимальное и максимальное значения, при которых значение функции принадлежности максимально. Полученные нечёткие множества комбинируются с помощью различных операторов нечёткой логики. К ним относятся: нечёткое И (μ_{and}), нечёткое ИЛИ (μ_{or}), нечёткое произведение (μ_{prod}), нечёткая сумма (μ_{summ}) и нечёткая γ (μ_γ):

$$\mu_{\text{and}} = \min(\mu_i),$$

$$\mu_{\text{or}} = \max(\mu_i),$$

$$\mu_{\text{prod}} = \prod_{i=1}^n \mu_i,$$

$$\mu_{\text{summ}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i),$$

$$\mu_\gamma = (\mu_{\text{summ}})^\gamma (\mu_{\text{prod}})^{(1-\gamma)}.$$

Для трёх ранее перечисленных моделей (всей территории Балтийского щита, мегаблоков и блоков с определённым типом новейшего напряжённого состояния) нами апробированы все упомянутые операторы нечёткой логики и разные значения $\gamma = 0,25; 0,50; 0,75; 0,90$ [Демидова и Лукичев, 2017; Дзебоев и др., 2019; Zimmermann, 2001]. Рассчитанная таким образом степень принадлежности обозначена как интегральный морфометрический параметр F .

С целью оценки качества полученных схем параметра F проведен ROC-анализ. Для этого центрам ячеек размером 15×15 км присвоены два значения: максимальное значение индекса F , а также 0 или 1 в зависимости от того, попадает ли в ячейку хотя бы 1 эпицентр землетрясения. Построенная в координатах «чувствительность – специфичность» ROC-кривая характеризует прогностическую способность модели: чем больше площадь под ней (AUC , area under curve), тем выше прогностичность [Gorsevski et al., 2006; Tanaka and Asai, 1984]. Максимальное значение AUC составляет 1, опорной линии на графиках соответствует $AUC = 0,5$. Эта линия отражает случайный характер взаимосвязи двух параметров.

Кроме того, нами сопоставлено распределение значений F по площади с локализацией эпицентров коровых землетрясений с моментной магнитудой $M_W \geq 4$. Для этого приведенные в каталоге [University of Helsinki, 2021] магнитуды по объемным

(M_b) и поверхностным (M_s) волнам, а также локальные магнитуды (M_L) пересчитаны в M_W по формулам [Lolli et al., 2014; Scordilis, 2006]:

$$M_b = 1,03M_L + 0,01,$$

$$M_s = 1,54M_b - 3,85,$$

$$M_W = \begin{cases} \exp(2,133 + 0,063M_s) - 6,205, & M_s \leq 5,5 \\ \exp(-0,109 + 0,229M_s) + 2,586, & M_s > 5,5 \end{cases}.$$

3. Результаты и их обсуждение

На основе анализа взаимосвязи сейсмичности и рельефа выбраны наиболее информативные для расчёта F морфометрические параметры. Для всей территории Балтийского щита (модель 1) к ним относятся средние высоты, уклоны рельефа, разность базисных поверхностей 3–4 порядков (табл. 1).

Таблица 1. Взаимосвязь локализации эпицентров коровых землетрясений и морфометрических параметров рельефа, выбранных для расчёта интегрального морфометрического параметра F в модели 1 (вся территория Балтийского щита)

Морфометрические параметры рельефа	Доля эпицентров коровых землетрясений, расположенных в областях, где значения морфометрических параметров превышают	
	медиану	3-й квартиль
Средние высоты	0,50	0,29
Уклоны рельефа	0,55	0,27
Разность базисных поверхностей 3–4 порядков	0,47	0,27

Для Балтийского щита, разделенного на 3 мегаблока (модель 2), выбраны средние высоты, асимметрия распределения высот, уклоны рельефа, разности базисных поверхностей 1–3 и 3–4 порядков, а также высоты остаточного рельефа, полученные путем вычитания базисной поверхности 4-го порядка из гипсометрической (табл. 2).

Таблица 2. Взаимосвязь локализации эпицентров коровых землетрясений и морфометрических параметров рельефа, выбранных для расчёта интегрального морфометрического параметра F в модели 2 (территория Балтийского щита, разделённая на 3 мегаблока)

Мегаблок	Морфометрические параметры рельефа	Доля эпицентров коровых землетрясений, расположенных в областях, где значения морфометрических параметров превышают	
		медиану	3-й квартиль
Свеко-Норвежский	Асимметрия распределения высот	0,51	0,33
	Разность базисных поверхностей 1–2 порядков	0,49	0,23
	Уклоны рельефа	0,55	0,59
Свекофенский	Разность базисных поверхностей 3–4 порядков	0,55	0,28
	Средние высоты	0,74	0,59
Кольско-Карельский	Асимметрия распределения высот	0,74	0,59
	Разность гипсометрической и базисной поверхности 4-го порядка	0,74	0,59
	Средние высоты	0,74	0,59

Для рассматриваемой территории, разделенной на 5 блоков, отличающихся типом новейшего напряжённого состояния (модель 3), наиболее информативны следующие морфометрические характеристики: средние высоты, уклоны рельефа, асимметрия распределения высот, разность базисных поверхностей 2–3 и 3–4 порядков (табл. 3).

Таблица 3. Взаимосвязь локализации эпицентров коровых землетрясений и морфометрических параметров рельефа, выбранных для расчёта интегрального морфометрического параметра F в модели 3 (территория Балтийского щита, разделенная на 5 блоков с разным типом новейшего напряжённого состояния).

Блок	Морфометрические параметры рельефа	Доля эпицентров коровых землетрясений, расположенных в областях, где значения морфометрических параметров превышают		Тип новейшего напряжённого состояния, по [Сенцов и Агибалов, 2021]
		медиану	3-й квартиль	
Венусланд	Асимметрия распределения высот	0,52	0,31	сдвиг, азимут простирания оси максимального сжатия 285°
	Разность базисных поверхностей 2–3 порядков	0,48	0,25	
Инсаммер	Уклон рельефа	0,57	0,27	растяжение, азимут простирания оси максимального растяжения 340°
	Средние высоты	0,69	0,34	
Портипадан	Средние высоты	0,60	0,38	сжатие, азимут простирания оси максимального сжатия 315°
	Разность базисных поверхностей 3–4 порядков	0,57	0,32	
Ярвидол	Средние высоты	0,63	0,53	сжатие, азимут простирания оси максимального сжатия 330°
	Асимметрия распределения высот	0,72	0,40	
	Разность базисных поверхностей 3–4 порядков	0,57	0,43	
Ладога	Уклон рельефа	0,65	0,41	сжатие, азимут простирания оси максимального сжатия 320°
	Асимметрия распределения высот	0,47	0,31	

Перечисленные параметры были обработаны разными инструментами нечёткой логики. Исходя из значений AUC , установлено, что наиболее целесообразно использование нечёткой суммы и γ -оператора при высоких значениях $\gamma = 0,90$ и $0,75$. Они позволяют получить результат, близкий к нечёткой сумме (табл. 4).

Таблица 4. Инструменты нечёткой логики, использованные для расчёта интегрального морфометрического параметра F

Модель	Мегаблок / блок	Инструмент нечёткой логики	AUC
1	–	нечёткая сумма	0,59
2	Свеко-Норвежский	нечёткая сумма	0,55
	Свекофенский	нечёткая сумма	0,60
	Кольско-Карельский	нечёткая сумма	0,73
3	Венусланд	γ -оператор, $\gamma = 0,90$	0,55
	Инсаммер	нечёткая сумма	0,57
	Портипадан	нечёткая сумма	0,60
	Ярвидол	γ -оператор, $\gamma = 0,75$	0,75
	Ладога	нечёткая сумма	0,51

Отметим, что распределение значений F по площади существенно различается в разных моделях. Для модели 1 характерна крупная положительная аномалия F , ориентированная вдоль западной окраины Балтийского щита (рис. 1).

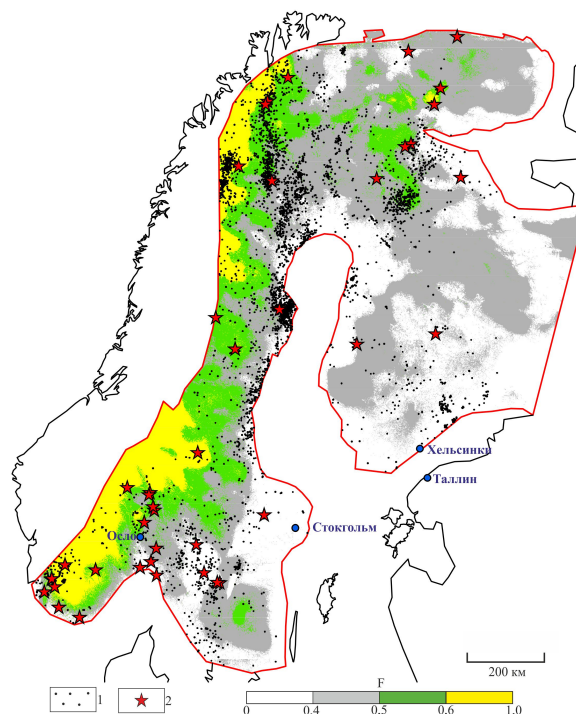


Рис. 1. Схема интегрального морфометрического параметра F , рассчитанного по 3 морфометрическим параметрам рельефа для всей территории Балтийского щита (модель 1): 1–2 – эпицентры землетрясений, по [University of Helsinki, 2021]: 1 – с $M_W < 4$, 2 – с $M_W \geq 4$.

Модель 2 отличается наличием областей повышенных значений F на северо-западе Кольско-Карельского и западе Свеко-Норвежского мегаблоков (рис. 2).

Модель 3 достаточно сходна с моделью 2, отличаясь отсутствием положительной аномалии значений F на юго-западе Балтийского щита (блок Венусланд) и высокими значениями F к востоку от Ботнического залива (блок Инсаммер) (рис. 3). Среднее значение F для модели 2 составляет 0,46, для модели 3 – 0,45, а стандартные отклонения – 0,11 и 0,13 соответственно.

Значение AUC для модели 1 составляет 0,59, для модели 2 – 0,62, для модели 3 – 0,65 (рис. 4).

Несмотря на то, что значения AUC для моделей 2 и 3 близки, модель 2 представляется наиболее достоверной, поскольку в этом случае существенно большее количество эпицентров коровых землетрясений с моментной магнитудой $M_W \geq 4$ попадает в области положительных аномалий F (табл. 5).

Таблица 5. Доли эпицентров коровых землетрясений с $M_W \geq 4$ ($N = 41$), расположенных в пределах разных диапазонов значений интегрального морфометрического параметра F

Модель	Диапазон значений F			
	$\geq 0,6$	$[0,5;0,6)$	$[0,4;0,5)$	$< 0,4$
1	0,15	0,32	0,24	0,29
2	0,10	0,41	0,27	0,22
3	0,17	0,17	0,22	0,44

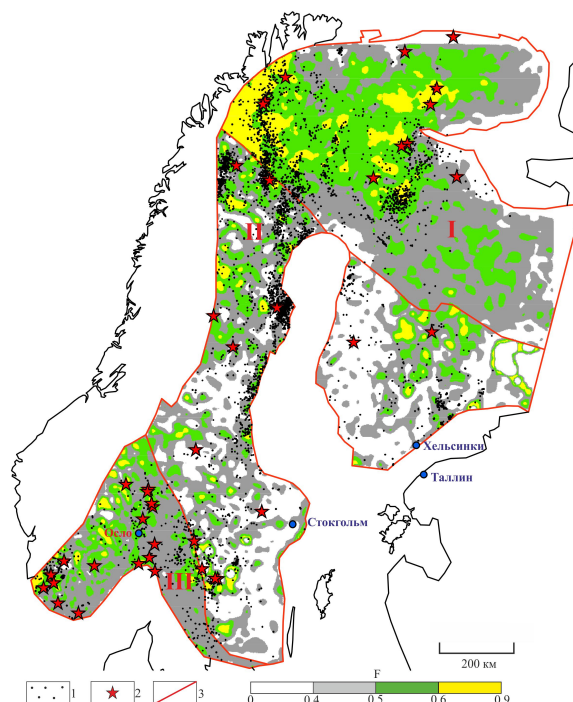


Рис. 2. Схема интегрального морфометрического параметра F , рассчитанного для территории Балтийского щита, разделенного на 3 мегаблока (модель 2): 1–2 – эпицентры землетрясений, по [University of Helsinki, 2021]: 1 – с $M_W < 4$, 2 – с $M_W \geq 4$; 3 – границы мегаблоков (I – Кольско-Карельского, II – Свекофенского, III – Свеко-Норвежского), по [Сенцов, 2022].

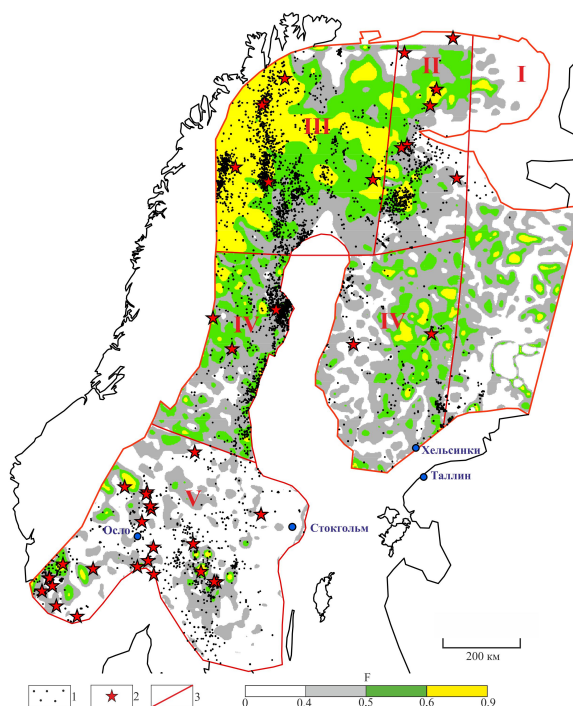


Рис. 3. Схема интегрального морфометрического параметра F , рассчитанного для территории Балтийского щита, разделенной на 5 блоков с разным типом новейшего напряжённого состояния (модель 3): 1–2 – эпицентры землетрясений, по [University of Helsinki, 2021]: 1 – с $M_W < 4$, 2 – с $M_W \geq 4$; 3 – границы блоков (I – Ладога, II – Яарвидол, III – Портипадан, IV – Инсаммер, V – Венусланд), по [Сенцов и Агибалов, 2021].

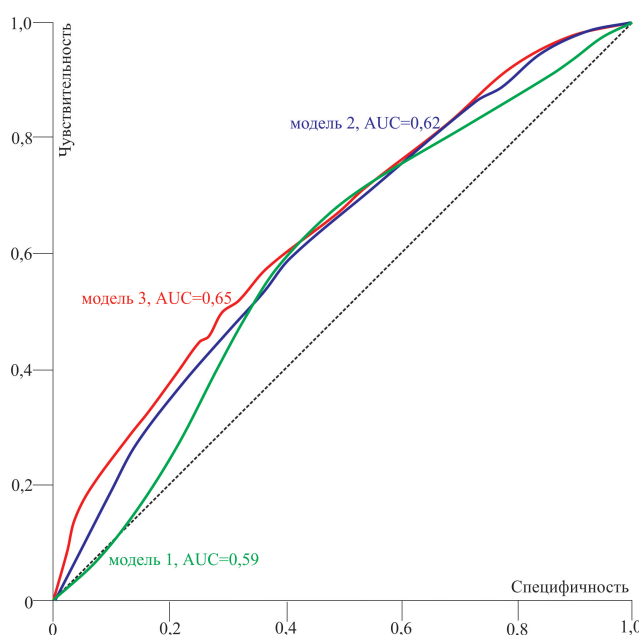


Рис. 4. ROC-кривые, характеризующие степень прогностичности построенных нами трёх моделей.

4. Заключение

Для территории Балтийского щита определён комплекс морфометрических параметров рельефа, связанных с современной коровой сейсмичностью. К ним относятся средние высоты, уклоны рельефа, асимметрия распределения высот, разности базисных поверхностей разного порядка и высоты остаточного рельефа. Апробация нескольких алгоритмов расчёта на их основе интегрального морфометрического параметра F показала, что наилучший результат достигнут при использовании нечёткой суммы или γ -оператора с высокими значениями $\gamma \geq 0,75$. Наиболее информативно определение интегрального параметра F по разным исходным морфометрическим характеристикам в пределах каждого отдельного мегаблока (модель 2). По нашему мнению, это объясняется существенным влиянием геологического строения на рельеф и указывает на необходимость учёта тектонических особенностей при выборе морфометрических методов. Сходный, хотя и менее представительный результат получен при расчёте F в пределах пяти блоков, отличающихся типом новейшего напряжённого состояния, что подчёркивает значимость влияния этого параметра на рельефообразование и сейсмичность. В целом полученные данные о взаимосвязи локализации эпицентров коровых землетрясений и особенностей пространственного распределения значений F позволяют сделать вывод о том, что этот интегральный морфометрический параметр в значительной мере отражает степень сеймотектонической активности и применим для оконтуривания сейсмоактивных участков, где происходят наиболее сильные в данном регионе землетрясения с $M_W \geq 4$. По нашему мнению, апробированная на примере Балтийского щита методика выделения таких участков может быть использована для решения аналогичной задачи на других территориях. При этом целесообразно отметить, что значительная часть эпицентров слабых землетрясений расположена в областях низких значений F , а в горных районах вертикальная точность ЦМР снижается. Эти особенности свидетельствуют об определённых ограничениях возможностей морфометрических методов для оконтуривания сейсмоактивных зон.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках госзадания ИФЗ РАН и НИР «Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ» (МГУ имени М. В. Ломоносова).

Список литературы

- Агибалов А. О., Зайцев В. А., Мануилова Е. А. и др. Выделение сейсмически активных участков Воронежской антеклизы геоморфологическими и тектонофизическими методами // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2022. — № 2. — С. 3–10. — <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-2-3-10>
- Агибалов А. О., Зайцев В. А., Сенцов А. А. и др. Морфометрические параметры рельефа и локализация месторождений углеводородов Волго-Уральской антеклизы // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2021. — № 4. — С. 116–128.
- Геоморфология / под ред. А. Н. Ласточкин и Д. В. Лопатин. — М. : Академия, 2005. — 528 с.
- Гусева Г. С. и Имаева Л. П. Новейшая и современная тектоническая (геодинамическая) активность территории России // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 12. — С. 23–29.
- Демидова Г. Л. и Лукичев Д. В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. — СПб. : Университет ИТМО, 2017. — 81 с.
- Дзедоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О. и др. 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. — <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47>
- Жаворонкин О. В. Морфоструктура Мало-Ботуобинского района (Саха — Якутия) по данным стохастического анализа рельефа // Вестник Воронежского университета. Геология. — 2005. — № 1. — С. 276–281.
- Копылов И. С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. — Пермь : ПГНИУ, 2019. — 132 с.
- Павленкова Н. И. Структурные особенности литосферы континентов и океанов и их природа // Геофизический журнал. — 2019. — Т. 41, № 2. — С. 57. — <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i2.2019.164448>
- Сенцов А. А. Сейсмоструктура опасных областей Восточно-Европейской платформы : дис. ... канд. / Сенцов А. А. — 2022. — 116 с.
- Сенцов А. А. и Агибалов А. О. Выделение зон возможных очагов землетрясений в Фенноскандии по данным анализа сейсмичности и компьютерного геодинамического моделирования // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2021. — № 1. — С. 15–22.
- Смирнов Е. А. и Кочнева Д. А. Оценка точности глобальной цифровой модели рельефа FABDEM для горных территорий (на примере Макажойской котловины, Чеченская Республика) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. — 2024. — Т. 9. — С. 74–78. — <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2024-2-9-74-78>
- Собисевич А. Л., Стеблов Г. М., Агибалов А. О. и др. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа и сейсмичности острова Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2024. — № 6. — С. 32–41. — <https://doi.org/10.55959/msu0579-9406-4-2024-63-6-32-41>
- Трегуб А. И. и Жаворонкин О. В. Морфометрия современной поверхности и неотектоническая структура территории ВКМ // Вестник Воронежского университета. Серия геологическая. — 2000. — № 3. — С. 19–26.
- Трегуб А. И. и Шевцов Д. Е. Цифровые модели рельефа при изучении новейшей тектонической структуры (на примере востока Воронежского кристаллического массива) // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции (г. Воронеж, 22–25 сентября 2020 г.) — ВГУ, 2020. — С. 354–358.
- Философов В. П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. — Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1960. — 91 с.
- Чернова И. Ю., Лунева О. В. и Нуриева М. Р. Неотектонические факторы формирования современного рельефа восточно-европейской равнины // Science Time. — 2015. — 4(16). — С. 813–819.
- Gorsevski P. V., Gessler P. E., Foltz R. B., et al. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis // Transactions in GIS. — 2006. — Vol. 10, no. 3. — P. 395–415. — <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2006.01004.x>
- Hawker L. and Neal J. FABDEM V1-0. — University of Bristol, 2021. — <https://doi.org/10.5523/BRIS.25WFY0F9UKOGE2GS7A5MQPQ2J7>
- Lehner B. and Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. — 2013. — Vol. 27, no. 15. — P. 2171–2186. — <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>

- Lolli B., Gasperini P. and Vannucci G. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (mb and Ms) and moment magnitude (Mw) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale // *Geophysical Journal International*. — 2014. — Vol. 199, no. 2. — P. 805–828. — <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
- Scordilis E. M. Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude // *Journal of Seismology*. — 2006. — Vol. 10, no. 2. — P. 225–236. — <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Sobisevich A. L., Steblov G. M., Agibalov A. O., et al. Seismic Domain Identification Algorithm using Fuzzy Logic Methods with Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island // PREPRINT (Version 1) available at Research Square. — 2024. — <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5220337/v1>
- Strahler A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography // *Geological Society of America Bulletin*. — 1952. — Vol. 63, no. 11. — P. 1117–1142. — [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:haoet\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:haoet]2.0.co;2)
- Tanaka H. and Asai K. Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers // *Fuzzy Sets and Systems*. — 1984. — Vol. 13, no. 1. — P. 1–10. — [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(84\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0165-0114(84)90022-8)
- University of Helsinki. Earthquakes in Finland and adjacent areas. — 2021. — URL: <https://www.helsinki.fi/en/institute-seismology/earthquakes/earthquakes-finland-and-adjacent-areas>.
- Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory-and Its Applications. — 4th. — Springer Netherlands, 2001. — 435 p. — <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0>

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SEISMICITY AND RELIEF OF THE BALTIC SHIELD USING FUZZY LOGIC TOOLS

G. R. Balashov^{**1} , A. A. Sentsov¹ , A. O. Agibalov^{2,1} , and I. N. Puzich¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

****Correspondence to:** George Romanovich Balashov, george.balashov.00@yandex.ru

Abstract: Using the Baltic Shield as an example, various methods for calculating the integral morphometric parameter (F) based on a set of geomorphological data processed using fuzzy logic tools were tested. Comparison of the spatial distribution patterns of this parameter with the localization of epicenters of modern crustal earthquakes shows that it reflects the degree of seismotectonic activity to a certain extent. The best agreement was achieved when the initial morphometric parameters and the F calculation algorithm were selected separately for each megablock – Kola-Karelian, Svecofennian, and Sveco-Norwegian. This can be explained by the significant influence of the geological structure on the relief. A similar result was achieved when calculating F within blocks characterized by a certain type of recent stress state. However, the relationship between seismicity and the integral morphometric parameter F is statistically significant when determining the latter by processing data on average heights, relief slopes and the difference in base surfaces of 3–4 orders using a fuzzy sum for the entire territory of the Baltic Shield.

Keywords: morphometric analysis of relief, fuzzy logic, seismicity, Baltic Shield

Citation: Balashov G. R., Sentsov A. A., Agibalov A. O., and Puzich I. N. (2026), Analysis of the Relationship between Seismicity and Relief of the Baltic Shield using Fuzzy Logic Tools, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES3005, <https://doi.org/10.2205/2026ES001023>, EDN: NFXIVV

RESEARCH ARTICLE

Received: August 12, 2025

Accepted: October 31, 2025

Published: July 28, 2026



© 2026. The Authors.

References

- Agibalov A. O., Zaitsev V. A., Manuilova E. A., et al. Identification of seismically active areas of the Voronezh antecline by geomorphological and tectonophysical methods // Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. — 2022. — No. 2. — P. 3–10. — <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-2-3-10> — (In Russian).
- Agibalov A. O., Zaitsev V. A., Sentsov A. A., et al. Morphometric parameters of relief and localization of hydrocarbon deposits within the Volga-Ural antecline // Lomonosov Geography Journal. — 2021. — No. 4. — P. 116–128. — (In Russian).
- Chernova I. Yu., Luneva O. V. and Nurieva M. R. Neotectonic factors of the modern relief formation of the East European Plain // Science Time. — 2015. — 4(16). — P. 813–819. — (In Russian).
- Demidova G. L. and Lukichev D. V. Fuzzy logic controllers in technical object control systems. — SPb. : Universitet ITMO, 2017. — 81 p. — (In Russian).
- Dzeboev B. A., Gvishiani A. D., Belov I. O., et al. Strong-Earthquake-Prone Areas Recognition Based on an Algorithm with a Single Pure Training Class: I. Altai-Sayan-Baikal Region, $M \geq 6.0$ // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2019. — Vol. 55, no. 4. — P. 563–575. — <https://doi.org/10.1134/s1069351319040050>
- Filosofov V. P. Brief guide to the morphometric method of searching for tectonic structures. — Saratov : Saratov University Publ, 1960. — 91 p. — (In Russian).
- Geomorphology / ed. by A. N. Lastochkin and D. V. Lopatin. — M. : Akademiya, 2005. — 528 p. — (In Russian).

- Gorsevski P. V., Gessler P. E., Foltz R. B., et al. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis // Transactions in GIS. — 2006. — Vol. 10, no. 3. — P. 395–415. — <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2006.01004.x>
- Guseva G. S. and Imaeva L. P. Modern tectonic (geodynamic) activity of the territory of Russia // Razvedka i okhrana nedr. — 2014. — No. 12. — P. 23–29. — (In Russian).
- Hawker L. and Neal J. FABDEM V1-0. — University of Bristol, 2021. — <https://doi.org/10.5523/BRIS.25WFY0F9UKOGE2GS7A5MQPQ2J7>
- Kopylov I. S. Morphoneotectonic system for assessing geodynamic activity. — Perm : PSU, 2019. — 132 p. — (In Russian).
- Lehner B. and Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. — 2013. — Vol. 27, no. 15. — P. 2171–2186. — <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- Lolli B., Gasperini P. and Vannucci G. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (mb and Ms) and moment magnitude (Mw) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale // Geophysical Journal International. — 2014. — Vol. 199, no. 2. — P. 805–828. — <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
- Pavlenkova N. I. Unsolved problems of the global tectonics and possibility of their solutions // Geofizicheskiy Zhurnal. — 2019. — Vol. 41, no. 2. — P. 57. — <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i2.2019.164448> — (In Russian).
- Scordilis E. M. Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude // Journal of Seismology. — 2006. — Vol. 10, no. 2. — P. 225–236. — <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Sentsov A. A. Seismotectonics of hazardous areas of the East European Platform : Candidate thesis / Sentsov A. A. — 2022. — 116 p. — (In Russian).
- Sentsov A. A. and Agibalov A. O. Determination of seismic generation zones of Fennoscandia according to data of analysis of seismicity and computer geodynamic modelling // Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. — 2021. — No. 1. — P. 15–22. — (In Russian).
- Smirnov E. A. and Kochneva D. A. Accuracy assessment of the global FABDEM digital elevation model for mountainous areas (using the example of the Makazhoy Basin, Chechen Republic) // Ecology. Economy. Informatics. Geoinformation Technologies and Space Monitoring. — 2024. — Vol. 9. — P. 74–78. — <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2024-2-9-74-78> — (In Russian).
- Sobisevich A. L., Steblov G. M., Agibalov A. O., et al. Interrelation of morphometric parameters of relief and seismicity of Sakhalin Island // Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. — 2024a. — No. 6. — P. 32–41. — <https://doi.org/10.55959/msu0579-9406-4-2024-63-6-32-41> — (In Russian).
- Sobisevich A. L., Steblov G. M., Agibalov A. O., et al. Seismic Domain Identification Algorithm using Fuzzy Logic Methods with Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island // PREPRINT (Version 1) available at Research Square. — 2024b. — <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5220337/v1>
- Strahler A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography // Geological Society of America Bulletin. — 1952. — Vol. 63, no. 11. — P. 1117–1142. — [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:haoet\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:haoet]2.0.co;2)
- Tanaka H. and Asai K. Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers // Fuzzy Sets and Systems. — 1984. — Vol. 13, no. 1. — P. 1–10. — [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(84\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0165-0114(84)90022-8)
- Tregub A. I. and Shevtsov D. E. Digital elevation models in the study of the recent tectonic structure (on the example of the eastern Voronezh crystalline massif) // Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions: materials of the XXII All-Russian with international participation scientific-practical Shchukin conference (Voronezh, September 22–25, 2020). — VGU, 2020. — P. 354–358. — (In Russian).
- Tregub A. I. and Zhavoronkin O. V. Morphometry of the modern surface and neotectonic structure of the VKM territory // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. — 2000. — No. 3. — P. 19–26. — (In Russian).
- University of Helsinki. Earthquakes in Finland and adjacent areas. — 2021. — URL: <https://www.helsinki.fi/en/institute-seismology/earthquakes/earthquakes-finland-and-adjacent-areas>.
- Zhavoronkin O. V. Morphostructure of Malo-Botuobinski Area (Republic Sakha-Yakutia) based on the data of stochastic analysis of relief // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. — 2005. — No. 1. — P. 276–281. — (In Russian).
- Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory-and Its Applications. — 4th. — Springer Netherlands, 2001. — 435 p. — <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0>