

УДК 551.4.08

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-27-38

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОВРЕМЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ РАЙОНА СЕВЕРОМУЙСКОГО ТОННЕЛЯ С РЕЛЬЕФОМ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

Алексей Олегович Агибалов¹✉, Валерий Михайлович Федоров²,
Андрей Тимофеевич Маякин³, Алексей Андреевич Сенцов⁴,
Владимир Александрович Зайцев⁵, Дмитрий Андреевич Симонов⁶,
Владимир Сергеевич Захаров⁷, Владимир Леонидович Сывороткин⁸,
Георгий Романович Балашов⁹, Арсений Алексеевич Казанцев¹⁰,
Анна Павловна Павлова¹¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; agibalo@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6742-3524>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fedorov.msu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2305-7408>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mappsy91man@gmail.com

⁴ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; alekssencov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6182-114X>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; v.zaitsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5460-6724>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; dsim_0@mail.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vszakharov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8888-4239>

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; hlozon@mail.ru

⁹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; george.balashov.00@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4474-4899>

¹⁰ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; burgomistr3001@gmail.com

¹¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; apavloff@bk.ru

Аннотация. Выявлена приуроченность эпицентров землетрясений района Северомуйского тоннеля к положительным аномалиям трех морфометрических параметров рельефа (глубины вертикального расчленения, асимметрии и эксцесса высот), оконтуренным по значениям, превышающим медиану или 3-й квартиль. Обработка этих параметров γ -оператором нечеткой логики и методом равнозначных градаций показала равную информативность обоих алгоритмов для выделения сейсмоактивных участков. Установлено, что сейсмические события сопровождаются увеличением горизонтальной скорости перемещения пунктов ГНСС IRKJ и BADG и происходят преимущественно при малом расстоянии от Земли до Луны и Солнца, что объяснимо усилением гравитационного воздействия последних на литосферу Земли. Таким образом, выявлена пространственная взаимосвязь сейсмичности с рельефом и временная — с астрономическими параметрами и скоростями современных движений земной коры.

Ключевые слова: рельеф, сейсмичность, астрономические данные, Северомуйский тоннель

Для цитирования: Агибалов А.О., Федоров В.М., Маякин А.Т., Сенцов А.А., Зайцев В.А., Симонов Д.А., Захаров В.С., Сывороткин В.Л., Балашов Г.Р., Казанцев А.А., Павлова А.П. Взаимосвязь современной сейсмичности района Северомуйского тоннеля с рельефом и геодезическими данными // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 27–38.

RELATIONSHIP BETWEEN MODERN SEISMICITY OF THE SEVEROMUYSKIY TUNNEL AREA WITH RELIEF AND GEODETIC DATA

Aleksey O. Agibalov¹✉, Valeriy M. Fedorov², Andrey T. Mayakin³, Aleksey A. Sentsov⁴,
Vladimir A. Zaitsev⁵, Dmitriy A. Simonov⁶, Vladimir S. Zakharov⁷,
Vladimir L. Syvorotkin⁸, Georgiy R. Balashov⁹, Arseniy A. Kazantsev¹⁰, Anna P. Pavlova¹¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; agibalo@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6742-3524>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fedorov.msu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2305-7408>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mappsy91man@gmail.com

⁴ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; alekssencov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6182-114X>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; v.zaitsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5460-6724>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dsim_0@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vszakharov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8888-4239>

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; hlozon@mail.ru

⁹ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; george.balashov.00@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4474-4899>

¹⁰ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; burgomistr3001@gmail.com

¹¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; apavloff@bk.ru

Abstract. The epicenters of earthquakes in the Severomuysky tunnel area were found to be confined to positive anomalies of three morphometric parameters of the relief (depth of vertical dissection, asymmetry and excess of heights), contoured by values, exceeding the median or the 3rd quartile. Processing these parameters with the fuzzy logic γ -operator and the equivalent gradation method showed that both algorithms are equally informative for identifying seismically active areas. It was found that seismic events are accompanied by an increase in the horizontal velocity of movement of the IRKJ and BADG GNSS points and occur mainly at a small distance from the Earth to the Moon and the Sun, which can be explained by the increased gravitational effect of the latter on the Earth's lithosphere. Thus, a spatial relationship between seismicity and relief and a temporal relationship with astronomical parameters and velocities of modern crustal movements was revealed.

Keywords: relief, seismicity, astronomical data, Severomuysky tunnel

For citation: Agibalov A.O., Fedorov V.M., Mayakin A.T., Sentsov A.A., Zaitsev V.A., Simonov D.A., Zakharov V.S., Syvorotkin V.L., Balashov G.R., Kazantsev A.A., Pavlova A.P. Relationship between modern seismicity of the Severomuysky tunnel area with relief and geodetic data. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 27–38. (In Russ.).

Введение. Работа посвящена проблеме оценки взаимосвязи современной сейсмичности с рельефом, астрономическими данными и горизонтальными скоростями перемещения пунктов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Понимание пространственной взаимосвязи сейсмичности и рельефа важно для выделения сейсмоактивных участков с использованием геоморфологических данных, а временной взаимосвязи сейсмичности с астрономическими параметрами и скоростями пунктов ГНСС — для развития возможностей сейсмического прогноза по времени. Решению первой из упомянутых задач посвящено большое количество работ, в том числе [Агибалов и др., 2021; Собисевич и др., 2024], где на примере разных регионов (Северо-Западного Кавказа, Воронежской антеклизы, о-ва Сахалин) обоснована информативность оконтуривания сейсмоактивных участков по комплексу морфометрических параметров рельефа. Вопрос оценки характера и степени связи сейсмичности с астрономическими данными на протяжении многих лет вызывает интерес разных исследователей. Влияние Луны и Солнца на сейсмичность Земли в целом подтверждено большим объемом фактического материала [Булатова, 2004; Федоров и др., 2022; Sandu, 2016]. Меньшее количество работ посвящено анализу взаимосвязи сейсмичности с астрономическими данными на локальном масштабном уровне, хотя ее существование не вызывает сомнений. В частности, она показана на примере рудника Расвумчорр (Хибины) [Жирова, Жиров, 2015], Авачинского вулкана [Шевченко, Яковенко, 2023], неглубоких землетрясений разных сегментов Тихоокеанского региона (о-ва Хоккайдо, Южных, Средних и Северных Курильских о-вов) [Андреева и др., 2009]. Связь геодинамических аномалий движения ГНСС-станций с сейсмическим режимом проанализирована в ряде работ, например, [Бабешко и др., 2012].

В то же время эти вопросы требуют дальнейшей проработки в связи с их недостаточной изу-

ченностью: в настоящее время нет общепринятой методики, позволяющей с высокой точностью выделить сейсмоактивные участки по данным анализа рельефа, а достоверный краткосрочный прогноз сейсмических событий, по нашему мнению, пока невозможен. Однако с течением времени появляются новые данные о рельефе, сейсмичности и современных движениях земной коры из-за установки большого количества сейсмических станций, удлинения временных рядов координат пунктов ГНСС, создания более точных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и автоматизированных средств их обработки. Это позволяет расширять и уточнять существующие представления о пространственной взаимосвязи сейсмичности с рельефом и временной — с астрономическими параметрами и скоростями движения станций ГНСС.

В качестве объекта исследования выбран район, расположенный в радиусе 400 км от центра Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали. Этот участок отличается высокой сейсмичностью и контрастным, глубоко расчлененным рельефом, а нахождение в его пределах самого протяженного в России железнодорожного тоннеля подчеркивает практическую значимость поставленных задач исследования.

Геолого-геоморфологическое строение. Изучаемый район расположен в пределах Байкало-Патомской и Байкало-Муйской зон Байкальской складчатой области. Байкало-Патомская зона, сложенная преимущественно метаморфизованными терригенно-карбонатными породами, интерпретируется как задуговый бассейн, развивавшийся в интервале 1050–720 млн лет [Зорин и др., 2009]. В ее южной части находится Мамско-Бодайбинский синклиниорий, где мощность отложений достигает 12 км. Сюда он граничит с Олоkitским прогибом — грабеном, заполненным метапесчаниками, метаалевролитами, карбонатными породами и метавулканиками, к югу от которого расположена Байкало-Муйская зона. Она сложена островодужными комплексами

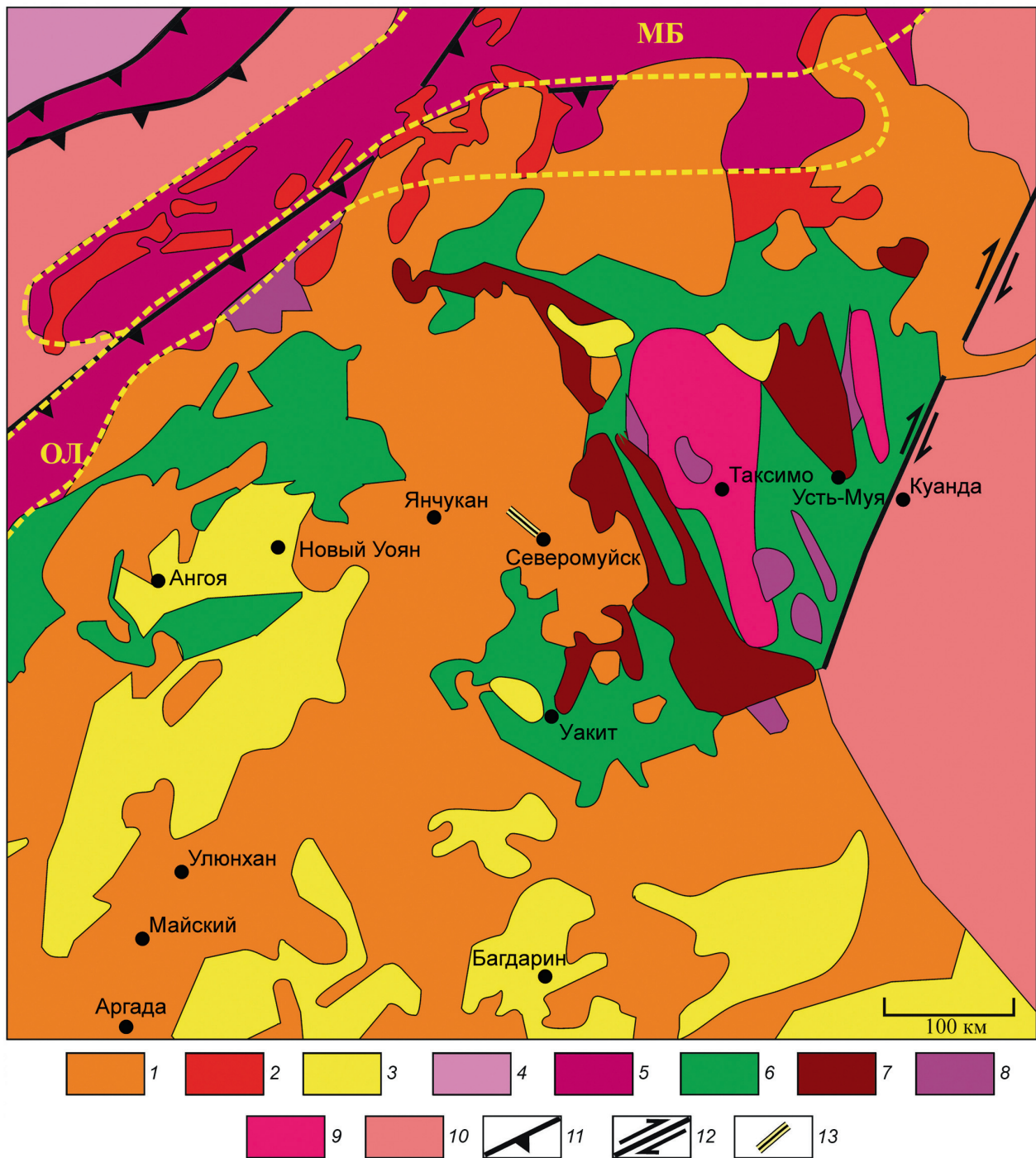


Рис. 1. Схема геологического строения района Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали, по [Зорин и др., 2009]: 1 — позднепалеозойские гранитоиды; 2 — раннепалеозойские граниты мамско-оронского комплекса; 3 — осадочные и осадочно-вулканогенные толщи венд-раннепалеозойского задугового бассейна; 4 — позднерифейско-раннепалеозойский осадочный чехол Сибирской платформы; 5 — Байкало-Патомская зона позднерифейского окраинного бассейна, сложенная преимущественно карбонатными и кластическими отложениями с небольшим количеством эффузивов; 6–9 — Байкало-Муйская позднерифейская островодужная зона: 6 — эффузивы и эффузивно-осадочные породы, 7 — гранитоиды, 8 — основные и ультраосновные магматические породы (расчлененные офиолиты); 9 — Муйская глыба (блок раннедокембрийских метаморфических пород в позднерифейской островодужной зоне); 10 — выходы раннедокембрийского фундамента Сибирской платформы; 11 — надвиги; 12 — сдвиги; 13 — Северомуйский тоннель; 14 — границы подзон Байкало-Патомской зоны: МБ — Мамско-Бодайбинский синклиниорий, ОЛ — Олоkitский прогиб

верхнего рифея, прорванными многочисленными интрузиями позднепалеозойских гранитоидов. В строении изучаемого участка, нарушенного дугообразной системой разломов (преимущественно надвигов с северной вергентностью), участвуют

также выходы раннедокембрийского фундамента Сибирской платформы, один из которых формирует Муйскую глыбу (рис. 1).

С геоморфологической точки зрения район Северомуйского тоннеля относится к Среднесибирской

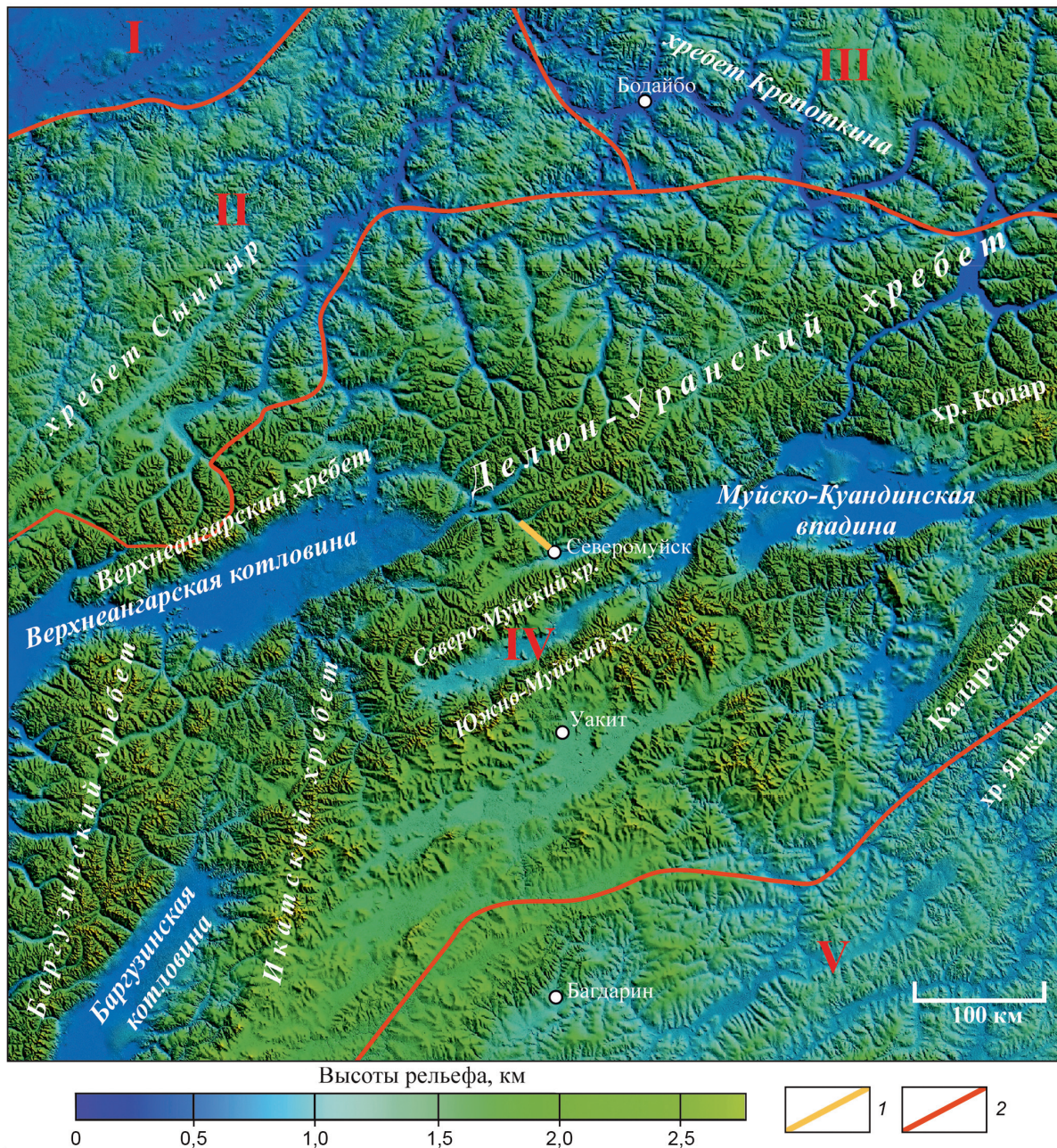


Рис. 2. Схема геоморфологического районирования района Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали, по [Национальный..., 2004]: 1 — Северомуйский тоннель, 2 — границы геоморфологических областей: I — Среднесибирская геоморфологическая страна, Ангаро-Ленская провинция пластовых структурно-денудационных закарстованных плато краевого прогиба, Лено-Ангарское плато; II-V — Южносибирская геоморфологическая страна: II-IV — Саяно-Байкальская провинция нагорий с глыбовыми эрозионно-денудационными и ледниково-эрозионными горами (II — Северо-Байкальское нагорье, III — Патомское нагорье — пологое куполообразное поднятие, разбитое разломами, IV — Прибайкальская область — свод, разбитый разломами, с глыбовыми горами и котловинами байкальского типа), V — Селенгино-Витимская провинция глыбово-сводовых и сводово-глыбовых эрозионно-денудационных горных хребтов и котловин забайкальского типа, Витимское плоскогорье с вулканогенными образованиями на лавовых плато

и Южносибирской геоморфологическим странам и отличается разнообразным рельефом — от равнинного (Ангаро-Ленское плато) до среднегорного (Баргузинский, Делюн-Уранский хребты). Главные водоразделы (хребты Верхнеангарский, Делюн-Уранский, Кодар, Северо- и Южно-Муйский) расположены в Прибайкальской области и ориентированы в северо-восточном направлении. Между ними находятся широкие плоскодонные впадины, самыми

крупными из которых являются Верхнеангарская и Муйско-Куандинская. Между Икатским и Баргузинским хребтами север-северо-восточного простирания расположена одноименная котловина с высотными отметками до 600 м. С севера Прибайкальская область ограничена Северо-Байкальским и Патомским нагорьями, представляющими собой единое орографическое образование, а с юга — Витимским плоскогорьем [Национальный..., 2004] (рис. 2).

Материал и методы исследований. Исходными данными послужили цифровая модель рельефа ASTER с разрешением 1 угловая секунда, сейсмический каталог [United..., 2024], эфемериды DE-406 [Solar..., 2024], временные ряды координат станций ГНСС IRK] и BADG [GNSS..., 2024]. Каталог [United..., 2024] был выбран в связи с тем, что приведенные в нем данные наилучшим образом коррелируют с изменениями горизонтальной скорости пунктов ГНСС и расстояния от Земли до Луны и Солнца: выявленные нами закономерности статистически менее значимы при использовании каталога Международного сейсмологического центра (ISC). В [United..., 2024] приведены 2 типа магнитуд землетрясений — моментная (M_w) и по объемным волнам (m_b). Для того чтобы унифицировать каталог, значения m_b были пересчитаны в M_w по формулам:

$$m_b = 2,5 + 0,63M_s \text{ [Захаров, Смирнов, 2016];}$$

$$M_w = \exp(2,133 + 0,063M_s) - 6,205 \text{ для } M_s \leq 5,5 \\ \text{[Lolli, et al., 2014];}$$

$$M_w = \exp(-0,109 + 0,229M_s) + 2,586 \text{ для } M_s > 5,5 \\ \text{[Lolli, et al., 2014].}$$

С целью общей геоморфологической характеристики территории по сетке 20×20 км рассчитан гипсометрический интеграл (E) по упрощенной формуле

$$E = \frac{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}},$$

где H_{max} — максимальная высота, H_{mean} — средняя, H_{min} — минимальная. Значения $E > 0,6$ характерны для наименее выработанного рельефа, $0,5-0,6$ — для более зрелого, $0,4-0,5$ — для еще более выработанного, но достаточно активно развивающегося рельефа, $< 0,4$ — для сильно выработанного денудационного рельефа [Yadav, Singh, 2022].

Для оценки взаимосвязи сейсмичности и рельефа рассчитаны несколько морфометрических параметров. Наиболее информативными для выбранного участка являются три из них: глубина вертикального расчленения, асимметрия и эксцесс высот, рассчитанные в ячейках размером 20×20 км. Глубина вертикального расчленения определена как разность между максимальной и минимальной высотами. Она может отражать интенсивность и характер неотектонических движений, в том числе инициирующих сейсмичность. Согласно [Николаев, 1962], областям поднятий соответствует наибольший эрозионный врез и максимальная глубина вертикального расчленения, а ее минимальные значения маркируют, как правило, стабильные или опускающиеся участки. Схемы асимметрии (A) и эксцесса высот (E) не имеют аналогов в «традиционной» морфометрии [Трегуб, Жаворонкин, 2000]. Асимметрия — показатель скошенности кривой распре-

деления в сторону больших или меньших значений признака. При $A=0$ распределение симметрично, в случае левосторонней асимметрии ($A > 0$) в распределении преобладают меньшие значения, а в случае правосторонней ($A < 0$) — большие. В общем случае по схеме асимметрии высот можно судить о морфологических особенностях субгоризонтальных поверхностей, а именно, о наличии и преобладании на них осложняющих положительных ($A > 0$) или отрицательных ($A < 0$) форм. Эксцесс показывает, насколько высок и заострен или, наоборот, низок и закруглен пик у кривой распределения. При $E=0$ распределение нормально, при $E > 0$ у распределения высокий заостренный пик, а при $E < 0$ — низкий пологий пик (или распределение полимодально). Значения E зависят от морфологической сложности рельефа. При $E=0$ наблюдается устойчивое равновесие рельефообразующих факторов, значения $E > 0$ свидетельствуют о нисходящем развитии рельефа, а $E < 0$ — о восходящем [Геоморфология, 2005].

Расчет 3-х упомянутых морфометрических параметров выполнен в среде ArcGis. Из-за того, что в ней нет встроенного модуля для вычисления значений A и E , нами была создана сетка с размером ячейки 2×2 км. Центрам каждой ячейки были присвоены значения высот и номера полигонов — расчетных ячеек размером 20×20 км. Таким образом, в каждую ячейку с длиной ребра 20 км попадают 100 точек с высотами, по которым в программе MS Excel рассчитаны асимметрия и эксцесс.

По значениям, превышающим медиану или 3-ий квартиль, оконтурены положительные аномалии морфометрических параметров. Расчет доли эпицентров землетрясений, попадающих в их пределы, позволил обосновать возможность рассмотрения этих аномалий как сейсмоактивных участков. Для того, чтобы выделить такие участки сразу по трем морфометрическим параметрам, использован метод равнозначных градаций, близкий к описанному в [Копылов, 2019]. Все морфометрические параметры были пересчитаны в баллы: 0 баллов соответствует значениям меньше первого квартиля (Q_1), 1 балл — $\geq Q_1$ и $< Q_2$, 2 балла — $\geq Q_2$ и $< Q_3$, 3 балла — $\geq Q_3$. Интегральный морфометрический параметр S равен сумме баллов в каждой расчетной ячейке. Его значения варьируют от 0 до 9. В качестве альтернативы методу равнозначных градаций применен расчет S с использованием нечеткой логики. Он заключается в преобразовании схем морфометрических параметров в нечеткие множества линейным алгоритмом, реализованным с помощью инструмента «Fuzzy membership» программы ArcMap, и последующей обработке этих множеств γ -оператором при $\gamma=0,9$ (инструмент «Fuzzy overlay»). Эта методика описана в работе [Sobisevich, et al., 2024], а значения I варьируют от 0 до 0,9. Для проверки достоверности результатов применения алгоритма нечеткой логики построена ROC-диаграмма в координатах «чувствительность — специфичность» в программе

SPSS Statistics 17.0. Исходными данными послужили значения I в каждой расчетной ячейке, и значения 0 и 1, присвоенные ячейкам в зависимости от того, попадает ли в них хотя бы один эпицентр землетрясения. Аналогичная ROC-кривая построена для значений I , рассчитанных методом равнозначных градаций.

Для того чтобы показать временную взаимосвязь сейсмичности с изменением расстояний Земля — Луна и Земля — Солнце, эти 2 параметра рассчитаны с посуточным разрешением для периода 2000–2024 гг. по материалам [Solar..., 2024]. Нами построены графики относительной частоты по 3 выборкам, элементами которых служат значения расстояния от Земли до Луны и до Солнца, определенные для всего периода наблюдений (1), а также для тех дней, когда во всем мире происходили сейсмические события с $M_w \geq 7$ (2), и для дней, когда в районе Северомуйского тоннеля были землетрясения (3).

Аналогичный подход использован для оценки связи сейсмичности и временных вариаций горизонтальной скорости пунктов ГНСС IRKJ и BADG, определенной с посуточным разрешением. Измерения ведутся с 11.06.2002 в пункте IRKJ и с 02.09.2011 в пункте BADG. С учетом того, что в определенные дни измерения не проводились, объем проанализированных выборок составляет $N=7339$ и $N=4641$, соответственно. Графики относительной частоты построены по 2 выборкам, элементами которых служат значения горизонтальной скорости, определенные для всего периода наблюдений (1) и в те дни, когда в радиусе 300 км от станции происходили землетрясения (2). Количество землетрясений составляет 109 и 86 для районов пунктов IRKJ и BADG, соответственно. Исходные данные, использованные для оценки горизонтальной скорости (V), представлены в виде временных рядов координат X и Y , рассчитанных с суточным разрешением в метрической системе отсчета (координатная основа IGS14). Значения V определены за каждые сутки как

$$V = \sqrt{(X_{n+1} - X_n)^2 + (Y_{n+1} - Y_n)^2},$$

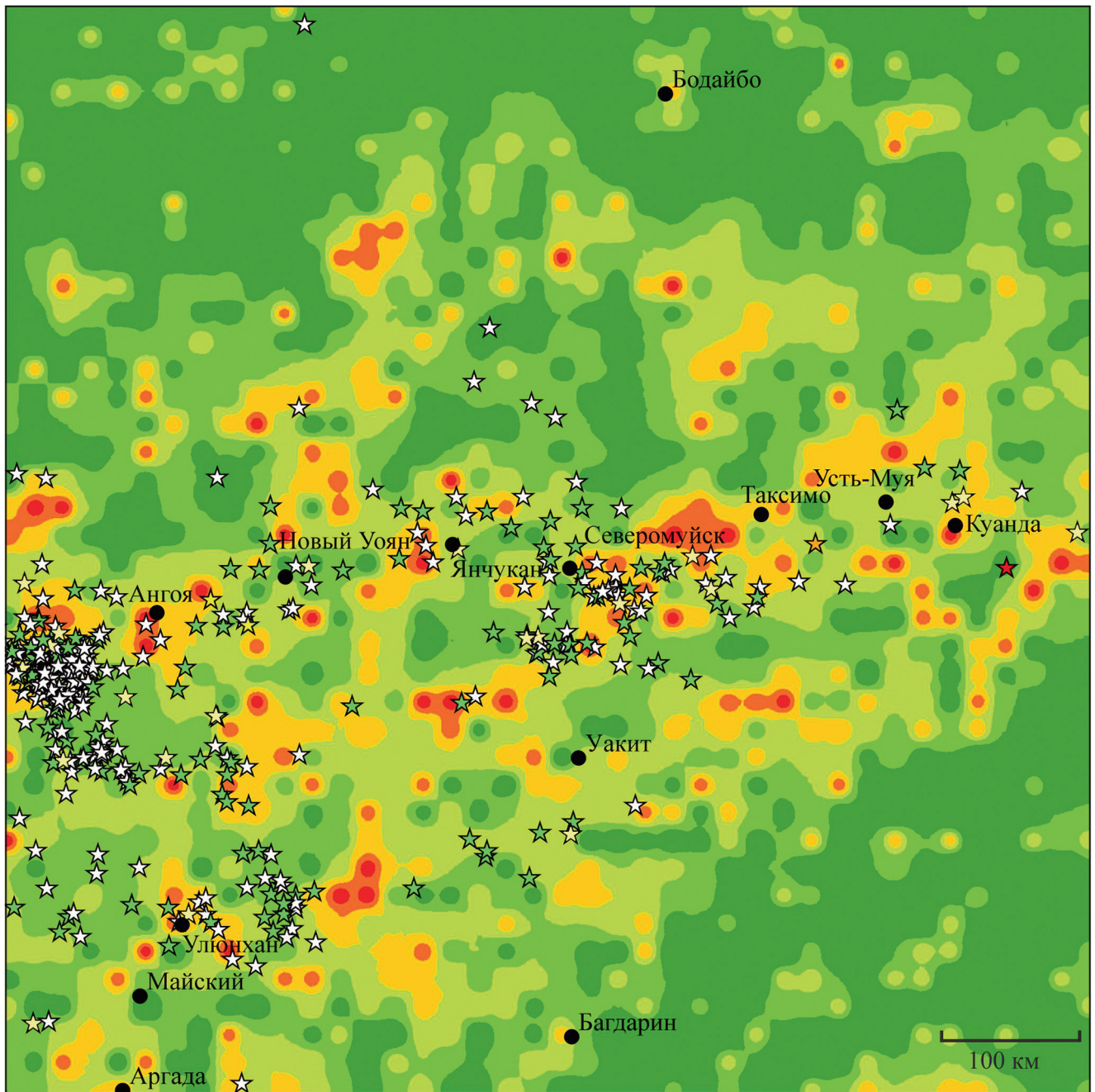
где X_n , Y_n — координаты пункта ГНСС в n -ый день года (в метрах), X_{n+1} , Y_{n+1} — координаты того же пункта, определенные после его смещения за 1 сутки.

В большинстве случаев величина горизонтального смещения для обеих станций составляет несколько миллиметров в сутки, что не согласуется со скоростью горизонтального перемещения, рассчитанной в мм/год. Так, пункт IRKJ смещается в северном направлении со скоростью $-6,659 \pm 0,089$ мм/год, а в восточном — $25,306 \pm 0,062$ мм/год. Соответствующие значения для станции BADG равны $-6,521 \pm 0,059$ и $26,534 \pm 0,042$ мм/год. Эта разница объясняется колебательным характером современных движений: в течение нескольких дней нередко меняется и направление, и знак перемещения (восходящие дви-

жения сменяются нисходящими). Такие флуктуации нивелируются при расчете скорости смещения за длительный интервал времени (мм/год). Как отмечено в [Borre, Tiberius, 2000], изменчивая во времени компонента движения может быть условно обозначена как «шум», а вторая, более устойчивая — как «сигнал». Значения $X_{\text{сигнал}}$, $Y_{\text{сигнал}}$ на 2 порядка ниже X и Y , а временные вариации $V_{\text{сигнал}}$ незначительно связаны с современной сейсмичностью. В связи с этим в нашей работе проанализированы только значения V , хотя данные о погрешности определения X и Y в [GNSS..., 2024] отсутствуют. Несмотря на этот существенный методический недостаток, полученный нами результат представляется достаточно достоверным, поскольку в [Бабешко и др., 2012] был использован аналогичный подход к обработке временных рядов координат с суточным разрешением. При этом временные ряды компонент местоположения пунктов ГНСС в районе Большого Сочи были определены с точностью 3–6 мм в горизонтальной плоскости [Шестопапов и др., 2020]. В [Панжин, 2024] также рассмотрены посуточные временные ряды координат нескольких станций, расположенных на территории Кузнецкого угольного бассейна. Точность их определения в горизонтальной плоскости составляет 2–3 мм. Сходное значение 2,5 мм получено для точности координат семи станций в Антарктиде [Матвеев и др., 2012]. В районе Петропавловского геодинамического полигона ошибки определения координат составили первые миллиметры [Гаврилов и др., 2023]. Таким образом, несмотря на низкую точность определения координат с суточным разрешением, разные авторы сочли возможным провести анализ посуточных временных рядов. Отметим также, что во всех упомянутых случаях использованы данные региональных и локальных сетей. Логично предположить, что точность данных Международной сети ГНСС должна быть существенно выше.

Результаты и их обсуждение. В районе Северомуйского тоннеля значения гипсометрического интеграла варьируют от 0,05 до 0,70 при медиане 0,43, что указывает на достаточно активное развитие рельефа и подчеркивает неслучайный характер взаимосвязи морфометрических параметров и сейсмичности. Около 40% эпицентров землетрясений локализовано в пределах трех крупных впадин — Верхнеангарской, Муйско-Куандинской и Баргузинской, занимающих ~7% площади рассмотренной территории. Они интерпретируются как фланговые присдвиговые структуры, развивающиеся в условиях сочетания левостороннего сдвига и северо-западного растяжения. Концентрация деформаций (в том числе инициирующих сейсмические события) в их пределах объяснима тектонофизической моделью, рассмотренной в [Семинский, Когут, 2009].

В рельефе впадины (и особенно их границы) выделяются по положительным аномалиям трех морфометрических параметров — глубины верти-



Значения интегрального морфометрического параметра S , рассчитанного методом равнозначных градаций

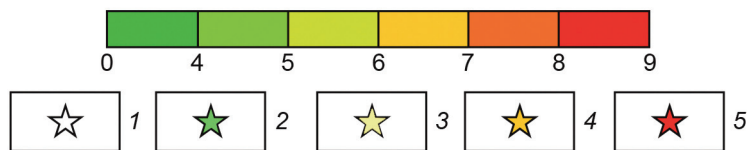
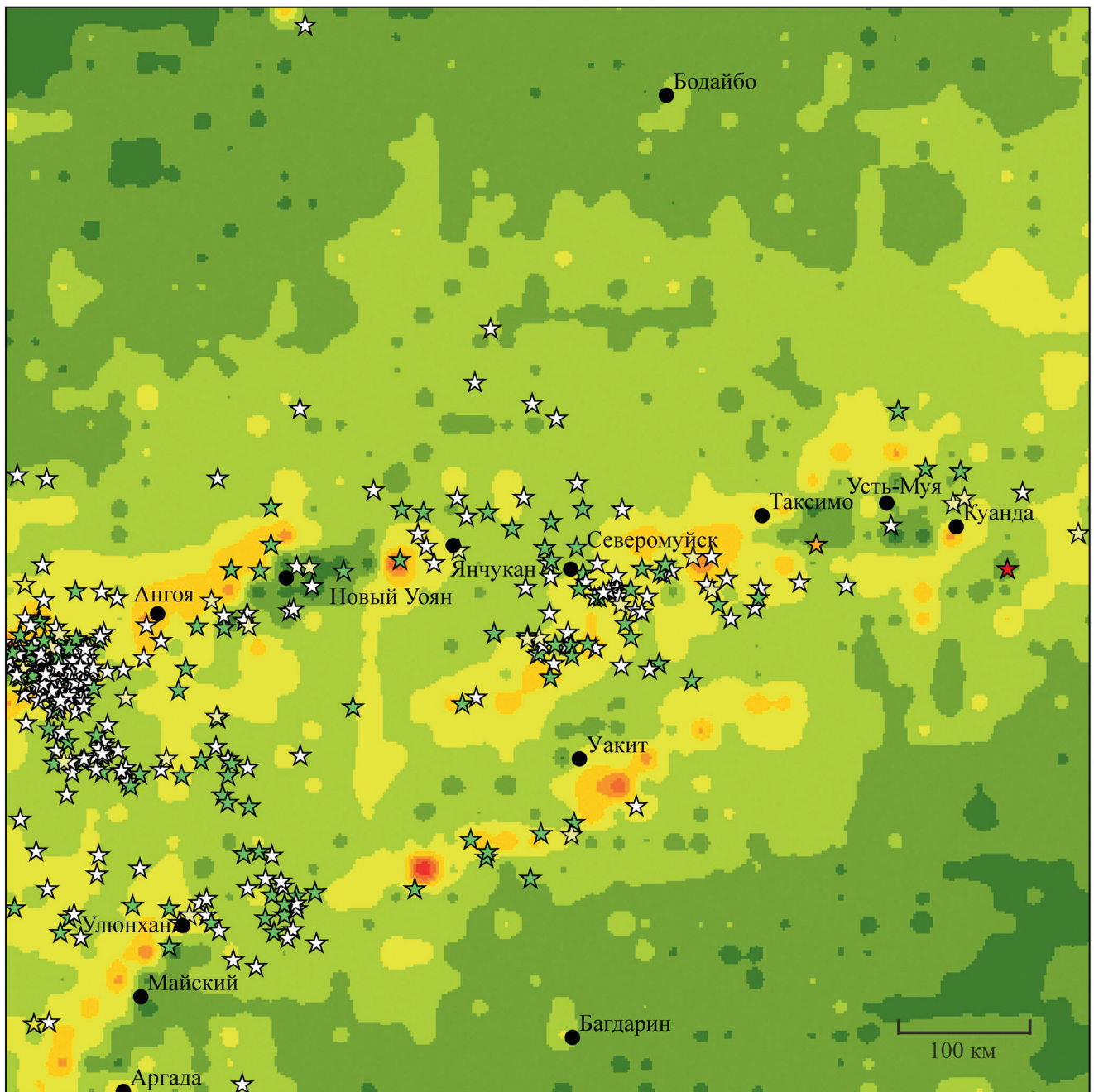


Рис. 3. Схема интегрального морфометрического параметра S , рассчитанного методом равнозначных градаций: 1–5 — эпицентры землетрясений с моментной магнитудой, по [United..., 2024]: 1 — 3–4, 2 — 4–5, 3 — 5–6, 4 — 6–7, 5 — 7–7,4

кального расчленения, асимметрии и эксцесса высот. Эти аномалии могут быть оконтурены по значениям, превышающим как медиану, так и 3-й квартиль: в первом случае они занимают половину площади рассмотренного района, и в их пределах локализовано от 59 до 66 % эпицентров землетрясений, а во втором — 1/4 площади, на которую приходится от

42 до 46 % эпицентров (табл. 1, 2). При обработке 3-х морфометрических параметров как методом равнозначных градаций (рис. 3), так и γ -оператором нечеткой логики (рис. 4) сейсмоактивные участки выделяются по повышенным значениям S . Судя по табл. 3 и 4, оба подхода в равной мере информативны. Достоверность применения нечеткой логики



Значения интегрального морфометрического параметра S , рассчитанного с использованием нечеткой логики

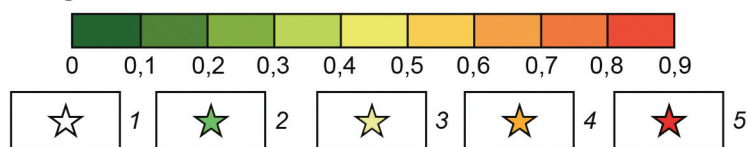


Рис. 4. Схема интегрального морфометрического параметра S , рассчитанного с использованием нечеткой логики: 1–5 — эпицентры землетрясений с моментной магнитудой, по [United..., 2024]: 1 — 3–4, 2 — 4–5, 3 — 5–6, 4 — 6–7, 5 — 7–7,4

подтверждена значением AUC (area under curve, площадь под кривой), равном 0,79 (максимально возможное значение — 1,0). Сходное значение AUC получено при оценке достоверности результатов применения метода равнозначной градации — 0,72 (рис. 5). На наш взгляд, его достоинством служит простота расчета, а использование аппарата нечет-

кой логики дает возможность варьировать алгоритм определения S за счет изменения значений γ , способа преобразования раstra в нечеткое множество и типа наложения (вместо γ -оператора можно использовать нечеткую сумму, нечеткое произведение, операторы «и» и «или»).

Таблица 1

Значения медианы и 3-го квартиля морфометрических параметров рельефа района Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали

Параметр	Медиана	3-й квартиль
Асимметрия высот	0,174	0,534
Экссесс высот	-0,487	-0,056
Глубина вертикального расчленения рельефа, м	688	926

Таблица 2

Доля эпицентров землетрясений, расположенных в областях, где значения морфометрических параметров рельефа превышают медиану и 3-й квартиль

Параметр	Доля эпицентров землетрясений, расположенных в областях, где значения морфометрических параметров рельефа превышают	
	медиану	3-й квартиль
Асимметрия высот	0,59	0,43
Экссесс высот	0,62	0,42
Глубина вертикального расчленения рельефа, м	0,66	0,46

Таблица 3

Доля эпицентров землетрясений, расположенных в областях повышенных значений интегрального морфометрического параметра S, рассчитанного методом равнозначных градаций

Значение интегрального морфометрического параметра S	Доля площади	Доля эпицентров землетрясений
≥4	0,65	0,94
≥5	0,36	0,71
≥6	0,12	0,33

Таблица 4

Доля эпицентров землетрясений, расположенных в областях повышенных значений интегрального морфометрического параметра S, рассчитанного с использованием нечеткой логики

Значение интегрального морфометрического параметра S	Доля площади	Доля эпицентров землетрясений
≥0,3	0,58	0,95
≥0,4	0,16	0,57

Таблица 5

Значения медианы, 1-го и 3-го квартиля расстояния Земля-Луна и Земля-Солнце в 2000–2024 гг.

Параметр	Квартиль	Объект изучения		
		весь мир (N=9172)	землетрясения с Mw≥7, произошедшие во всем мире (N=369)	землетрясения района Северомуйского тоннеля (N=211)
Расстояние Земля — Луна, км	Q1	371121	371242	370191
	Q2	385845 [385199...386505]	385761 [381635...388281]	380638 [377917...387869]
	Q3	399929	399363	396494
Расстояние Земля — Солнце, а. е.	Q1	0,9883	0,9961	0,9851
	Q2	1,0000 [0,9997...1,0008]	0,9992 [0,9876...1,0115]	0,9937 [0,9899...0,9968]
	Q3	1,0120	1,0018	1,0109

Примечание: Q1 и Q3 — 1-й и 3-й квартили, Q2 — медиана; в квадратных скобках — 90%-й доверительный интервал медианы.

Таблица 6

Изменение скорости горизонтальных перемещений пунктов ГНСС IRKJ и BADG во время сейсмических событий

Пункт ГНСС	Скорость горизонтального перемещения, ×10 ⁻⁶ м/сут			N
	Q1	Q2	Q3	
IRKJ	827	1315 [1294; 1338]	1905	7339
	1020	1585 [1135; 1838]	<u>2147</u>	109
BADG	898	1417 [1390; 1446]	2027	4641
	1560	2089 [2089; 2130]	<u>2361</u>	86

Примечание: Q1 и Q3 — 1-й и 3-й квартили, Q2 — медиана; в квадратных скобках — 90%-й доверительный интервал медианы, N — объем выборки. Подчеркнуты значения скорости, рассчитанные в те дни, когда происходили сейсмические события в районе пунктов IRKJ и BADG.

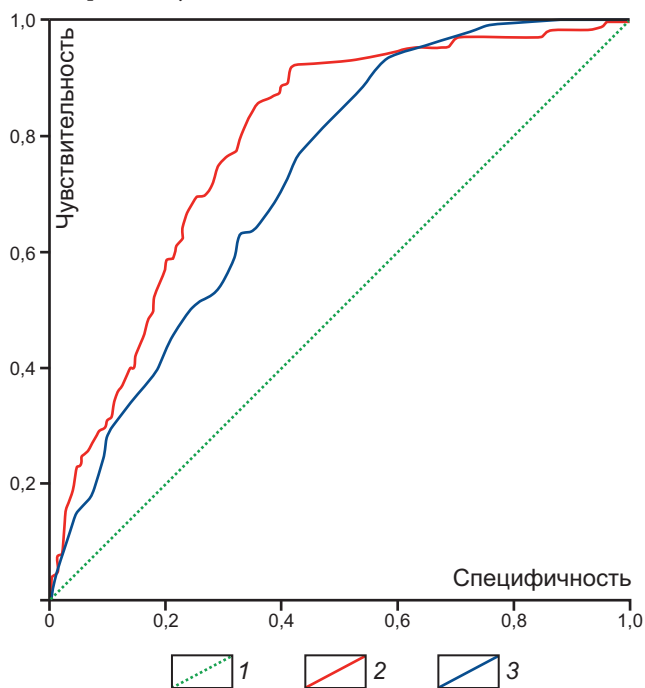


Рис. 5. ROC-диаграмма, показывающая достоверность результатов расчета интегрального морфометрического параметра S с использованием нечеткой логики и методом равнозначных градаций: 1 — линия случайного распределения; 2–3 — ROC-кривые, построенные для оценки достоверности результатов анализа морфометрических параметров: 2 — γ -оператором нечеткой логики, 3 — методом равнозначных градаций

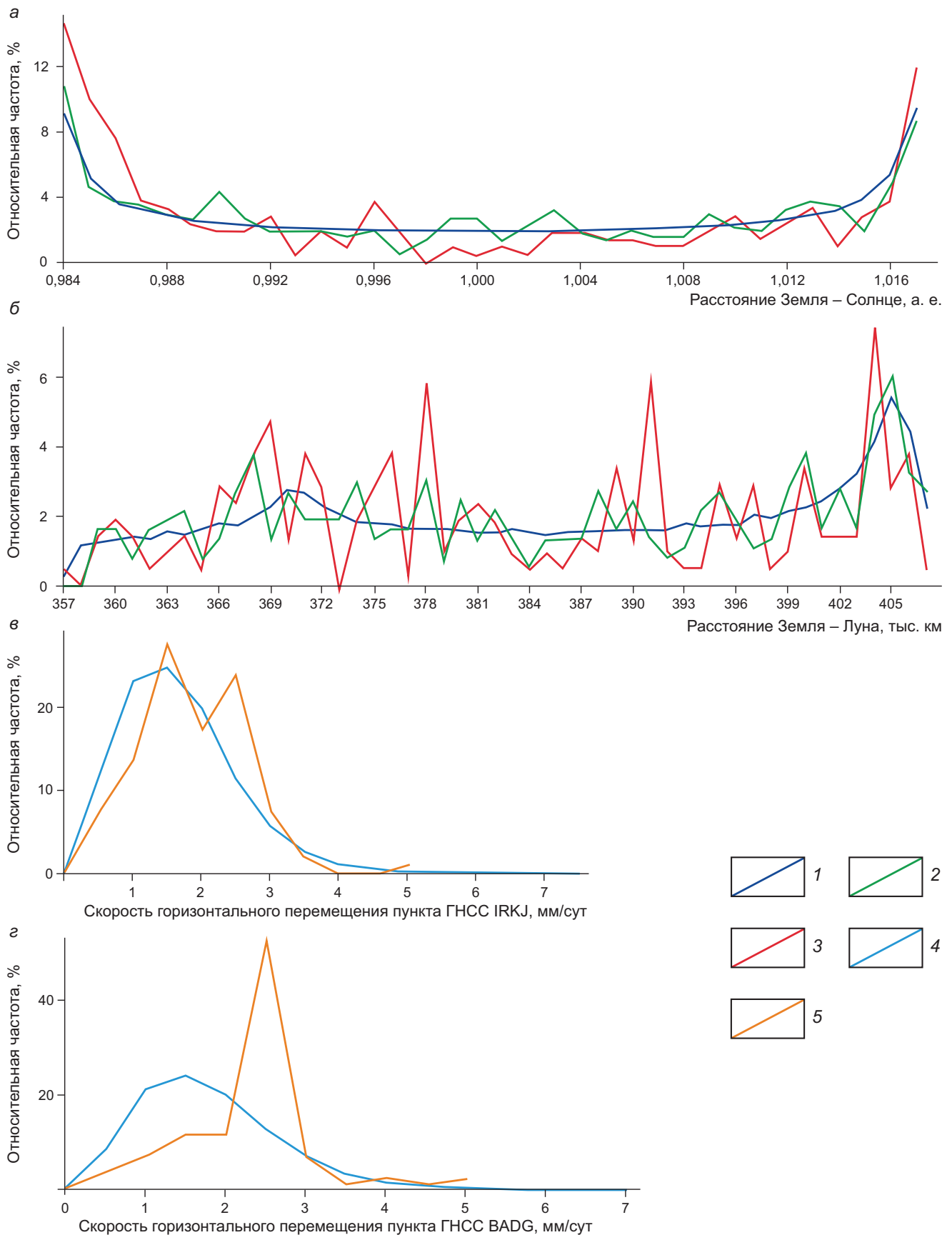


Рис. 6. Графики частотного распределения расстояния Земля — Солнце (а) и Земля — Луна (б), горизонтальной скорости пунктов ГНСС IRKJ (в) и BADG (з). 1–5 — выборки, элементами которых служат значения показанных на графиках параметров, рассчитанных для: 1 — всего мира; 2 — землетрясений с $M_w \geq 7$, произошедших во всем мире; 3 — землетрясений района Северомуйского тоннеля; 4 — всего периода наблюдений на определенном пункте ГНСС; 5 — для землетрясений, произошедших в радиусе 300 км от определенного пункта ГНСС

Установлено, что землетрясения как во всем мире в целом, так и в районе Северомуйского тоннеля чаще всего происходят при относительно небольших расстояниях от Земли до Луны и Солнца (табл. 5, рис. 6, а, б). Эта закономерность объяснима усилением гравитационного воздействия на литосферу Земли. Согласно [Федоров и др., 2022], сила притяжения между Землей, Луной и Солнцем составляет от $3,45 \times 10^{18}$ до $3,70 \times 10^{18}$ Н, а между Землей и остальными планетами Солнечной системы — от $9,36 \times 10^{13}$ до $3,69 \times 10^{14}$ Н. Расчет был выполнен по классической формуле закона всемирного тяготения с учетом вариаций расстояния от Земли до других планет и Солнца. Таким образом, взаимодействие в системе Солнце—Земля—Луна оказывает наибольшее влияние на сейсмичность, хотя приливное воздействие со стороны других планет также влияет на распределение землетрясений по времени. Это влияние наиболее значимо в отношении Марса и Венеры, поскольку сила притяжения между ними и Землей меняется в десятки раз в процессе орбитальных движений [Федоров и др., 2022].

Показано, что сейсмические события в радиусе 300 км от станций ГНСС IRKJ и BADG сопровождаются увеличением горизонтальной скорости последних, однако этот вывод требует уточнения из-за того, что погрешность определения горизонтальной скорости с посуточным разрешением не оценена с достаточной степенью достоверности (табл. 6; рис. 6, в, г).

Выводы. 1. Установлена приуроченность эпицентров современных землетрясений района Северомуйского тоннеля к положительным аномалиям трех морфометрических параметров рельефа — глубины вертикального расчленения, асимметрии

и эксцесса высот. Границы аномалий могут быть проведены по значениям, превышающим медиану или 3-й квартиль.

2. Обоснована равная степень информативности обработки морфометрических параметров рельефа методом равнозначных градаций и γ -оператором нечеткой логики для выделения сейсмоактивных участков.

3. Показано, что сейсмические события чаще происходят при малом расстоянии от Земли до Луны и до Солнца, что объяснимо усилением гравитационного воздействия на литосферу Земли.

4. Сейсмические события в районах станций ГНСС IRKJ и BADG сопровождаются увеличением горизонтальной скорости перемещения этих пунктов, масштаб которого требует уточнения из-за того, что погрешность временных рядов координат была оценена приближенно.

Благодарности. Выражаем благодарность члену-корреспонденту РАН, д. ф.-м. н. А.Л. Собисевичу за помощь в подготовке работы, а также проф. РАН, д. ф.-м. н. Г.М. Стеблову и к. ф.-м. н. А.Г. Гоеву за конструктивные замечания.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН, НИР «Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ», «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики», «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений», «Режимы петрогенеза внутренних геосфер Земли» (МГУ имени М.В. Ломоносова) и комплексной экспедиции РГО, приуроченной к 50-летию начала строительства Байкало-Амурской магистрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Андреева М.Ю., Сасорова Е.В., Левин Б.В. Особенности внутригодового распределения землетрясений Курильского региона // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 85–95.

Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Калинин В.В. и др. К проблеме оценки состояния сейсмичности в зонах повышенной геодинамики // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2012. № 2. С. 7–10.

Булатова Н.П. Пространственно-временное исследование сейсмичности Земли: Дисс. ... канд. физ.-мат. н. М., 2004. 136 с.

Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Титков Н.Н. и др. Мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния геосреды в районе Петропавловского геодинамического полигона по данным комплексных скважинных и GPS-измерений на активной фазе подготовки Жупановского землетрясения (30.01. 2016; Mw=7.2) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14, № 6. С. 1–12.

Геоморфология / Под ред. А.Н. Ласточкина, Д.В. Лопатина. М.: Академия, 2005. 528 с.

Жирова А.М., Жиров Д.В. Анализ связи сейсмичности рудника Расвумчорр (Хибины) с солнечно-лунными приливами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 56. С. 254–263.

Захаров В.С., Смирнов В.Б. Физика Земли. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. 328 с.

Зорин Ю.А., Скляр Е.В., Беличенко В.Г. и др. Механизм развития системы островная дуга — задуговый бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее — раннем палеозое // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 209–226.

Копылов И.С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. Пермь, 2019. 132 с.

Матвеев А.Ю., Федоров Д.В., Гребнев В.Н. и др. Высокоточные временные ряды координат, полученные из GNS-наблюдений в Антарктиде: I. Геодезические определения // Геодезия и картография. 2012. № 11. С. 17–23.

Национальный атлас России Т. 2. Природа и экология. М.: ГОСГИСЦЕНТР, 2004. 495 с.

Николаев Н.И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.

Панжин А.А. Исследования природной и техногенной сейсмичности Кузнецкого угольного бассейна // Проблемы недропользования. 2024. № 1 (40). С. 102–114.

Семинский К.Ж., Когут Е.И. Определяющие факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: результаты физического эксперимента // ДАН. 2009. Т. 424, № 1. С. 76–79.

Собисевич А.Л., Стеблов Г.М., Агибалов А.О. и др. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа и сейсмичности острова Сахалин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 32–41.

Трегуб А.И., Жаворонкин О.В. Морфометрия современной поверхности и неотектоническая структура территории ВКМ // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. 2000. № 3. С. 19–26.

Федоров В.М., Залиханов А.М., Дягтерев К.С. Гравитационные факторы и астрономическая хронология вулканической и сейсмической активности Земли. М.: КДУ, Университетская книга, 2022. 308 с.

Шевченко Ю. В., Яковенко В. В. Приливные эффекты в сейсмичности Авачинского вулкана // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5, № 1. С. 89–95.

Шестопалов В.Л., Фоменко В.А., Глазырин Е.А. и др. Многомерный анализ временных рядов GNSS-наблюдений в районе Большого Сочи в 2017–2018 гг. // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления-II»). 2020. С. 109–112.

Borre K., Tiberius C. Time series analysis of GPS observables // Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000). 2000. P. 1885–1894.

GNSS Time Series. URL: <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html> (дата обращения: 01.09.2024).

Lolli B., Gasperini P., 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. P. 805–828.

Sandu I.S. Анализ глобальной сейсмической активности в системе Земля — Солнце и Луна // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии. 2016. № 6–7. С. 38–43.

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 // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24. ES2004.

Solar System Dynamics. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/> (дата обращения: 10.12.2024).

United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения: 10.12.2024).

Yadav S.K., Singh S.K. Morpho-tectonic assessment of Central Northern escarpment of Peninsular India, based on tectonically sensitive geomorphic indices // Physical Geography. 2022. Vol. 43, No. 6. P. 753–783.

Статья поступила в редакцию 25.04.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 30.10.2025