

УДК 550.34

Оценка уровня сейсмичности районов Прибайкалья и Забайкалья в 2020–2022 годах

© 2025 г. Д.П.-Д. Санжиева^{1,2}, Ц.А. Тубанов^{1,2}, Е.А. Кобелева³

¹Буф ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия; ²ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия;

³БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 19.02.2025 г.

Аннотация. Статья посвящена оценке уровня сейсмичности районов Прибайкалья и Забайкалья. Поскольку сейсмичность в регионе неоднородна, мы провели оценку уровня сейсмичности по методике «СОУС’09» для отдельных районов, используя эмпирические функции распределения суммарной выделившейся сейсмической энергии. Использование такого подхода оправданно в случаях качественного сравнения параметров сейсмического режима разных участков, когда одна и та же абсолютная величина сейсмической энергии может быть аномально высокой для одного участка и аномально низкой для другого. С этой целью было проведено районирование области исследования по геоморфологическим и сейсмологическим данным. Для выделенных районов и области исследования, в целом, были проанализированы суммарные графики высвобождения условных упругих деформаций (по Беньоффу), эмпирические функции распределения сейсмической энергии в трёхлетнем временном окне, графики вариаций выделившейся энергии и количества землетрясений. В результате уровень сейсмичности в 2020–2022 гг. был определён как фоновый повышенный для всей области исследования и Хубсугул-Тункинского и Южно-Байкальского районов, и фоновый средний для остальных шести районов. Выявлена величина (энергетический класс) землетрясений, которые можно назвать значимыми (сильными) для каждого района. Эпицентральные районы Прибайкалья и Забайкалья были разделены на три группы с высокой, средней и низкой сейсмической активностью, в зависимости от полученных в данной работе параметров сейсмичности ($K_{\max}$, плотность, диапазоны экстремумов возможной выделившейся энергии и фонового среднего уровня, наклон графика высвобождения условных упругих деформаций).

Ключевые слова: Байкальский рифт, уровень сейсмичности, эмпирическая функция распределения, сейсмическая энергия, сильные землетрясения, районирование, параметры сейсмичности.

Для цитирования: Санжиева Д.П.-Д., Тубанов Ц.А., Кобелева Е.А. Оценка уровня сейсмичности районов Прибайкалья и Забайкалья в 2020–2022 годах // Российский сейсмологический журнал. – 2025. – Т. 7, № 2. – С. 7–22. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.2.01>. – EDN: IGIOEK

Введение

В 2020–2022 гг. в густонаселённой части Байкальского региона произошло несколько сильнейших землетрясений, вызвавших острую реакцию населения Прибайкалья. 21 сентября 2020 г. в 20 км северо-западнее южной оконечности озера Байкал в восточной части Тункинской системы впадин, в зоне влияния Главного Саянского разлома, произошло Быстринское землетрясение с $M_w=5.5$ [Gileva et al., 2020; Seminsky et al., 2021]. Затем 9 декабря 2020 г. в устье реки Селенги произошло Кударинское землетрясение с $M_w=5.5$, приуроченное к заливу Провал [Tubanov et al., 2022; Radziminovich et al., 2022]. В 2021 г. произошло резкое увеличение количества

землетрясений за счёт многочисленных афтершоков сильнейшего Хубсугульского землетрясения (11 января 2021 г. с $M_w=6.7$), возникшего на юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы (БРС) в зоне сочленения Хубсугульской и Тункинской рифтовых впадин [Emanov et al., 2022]. В 2022 г. вблизи дельты р. Голоустной на Южном Байкале зафиксированы эпицентры Голоустненских землетрясений (8 июня 2022 г. с $M_w=5.2$ и 14 октября 2022 г. с $m_b=5.0$), макросейсмические эффекты которых детально исследованы в [Радзиминович и др., 2023].

Как показано в работах [Салтыков, 2009; Saltykov, 2011], актуальной проблемой является предоставление информации о текущем состоянии сейсмичности. В круг заинтересованных лиц

входят не только учёные, но и структуры, по роду своей деятельности связанные с мониторингом природной среды (в частности, МЧС, административные структуры). Основной задачей является предоставление информации о землетрясениях в сейсмоопасных регионах на основе всестороннего изучения процессов подготовки сильного землетрясения, которые характеризуются, в частности, изменениями сейсмического режима [Соболев, 2011].

Необходимо отметить, что изучению параметров сейсмичности в сейсмоактивных регионах и таких её характеристик, как интенсивность сейсмического потока, параметры закона повторяемости землетрясения, максимальная возможная региональная магнитуда, ускорения грунта и др., в последнее время уделяется большое внимание [Marzocchi, Sandri, 2009; Nava et al., 2017; Herrmann et al., 2022; El-Isa, Eaton, 2014; Taroni, Carafa, 2023; Radziminovich et al., 2019; Pisarenko, Rodkin, 2020; 2022; Vermeulen, Kijko, 2017; Holschneide et al., 2011; Beirlant et al., 2019]. Сейсмическая энергия, выделившаяся за определённый период времени, — это одна из часто используемых в России характеристик сейсмического режима территории, наряду с общим числом землетрясений N , активностью (A_{10} в частности) и наклоном графика повторяемости (b — при использовании магнитудной шкалы или γ — при использовании шкалы энергетических классов), но более устойчивая, в сравнении с ними, к полноте и однородности каталогов, поскольку основная выделившаяся сейсмическая энергия в регионе определяется наиболее сильными событиями [Saltykov, 2011]. В настоящее время оценки годового уровня сейсмичности всего Байкальского региона с использованием методики статистической оценки уровня сейсмичности [Saltykov, 2011] публикуются в сборниках «Землетрясения России». В нашей работе были проанализированы вариации уровня сейсмичности выделенных эпицентральных районов Байкальского региона на примере сейсмической активизации 2020–2022 гг.

Районирование

Байкальский регион, который включает Прибайкалье и Забайкалье, является одним из наиболее сейсмоактивных районов России. За инструментальный период наблюдений с 1950 г. в пределах территории 48–60°N и 99–122°E зарегистрировано 17 землетрясений с магнитудой больше 6, среди них наиболее известные: Мондинское 5 апреля 1950 г. с $M=7.0$,

Кяхтинское 6 февраля 1957 г. с $M=6.5$, Муйское 27 июня 1957 г. с $M=7.6$, Нюкжинское и Олёкминское 5 января и 14 сентября 1958 г. с $M=6.5–6.4$, Среднебайкальское 29 августа 1959 г. с $M=6.8$, Могодское 5 января 1967 г. с $M=7.8$, Тас-Юряхское 18 января 1967 г. с $M=7.0$, Култукское 27 августа 2008 г. с $M_w=6.3$, Хубсугульское 11 января 2021 г. с $M_w=6.7$ [Новый каталог ..., 1977; Каталог землетрясений ..., 2024] (рис. 1).

Исследования [Сейсмогеология ..., 1981; Солоненко, Штейман, 1994; Klyuchevskii, Dem'yanovich, 2003; Radziminovich et al., 2013; Pisarenko et al., 2022] показали, что пространственно-временная структура эпицентрального поля Байкальского рифта и сопредельных территорий неоднородна и обусловлена особенностями геологического строения и режима современного тектонического развития. В работе [Мельникова и др., 2003] показано, что эпицентрально-поле сейсмичности Прибайкалья и Забайкалья можно качественно разделить на три зоны: Сибирская платформа, с практическим отсутствием сейсмической активности; Байкальская рифтовая система (БРС), являющаяся наиболее сейсмоактивной зоной; Забайкалье, которое охватывает частично территорию Северной Монголии, со слабой сейсмичностью в Западном Забайкалье и умеренной сейсмичностью в Восточном Забайкалье. Данное деление на три больших зоны из семи районов было обобщением детального анализа [Голенецкий и др., 1973], основанного на предположении о блоковом строении земной коры, авторы которого выделили 22 района. Деление на блоки проводилось и ранее по различным признакам, например, в [Кочетков и др., 1977] было выделено пять крупных районов: Тункинский, Байкальский, Центральный, Чара-Муйский и Олёкминский, по максимальным значениям сейсмической активности, параметрам графиков повторяемости, и другим критериям. По эпицентральному полю, механизмам очагов и по динамике сейсмических волн в [Мишарина, Солоненко, 1990] была установлена иерархическая система блоков с кратными значениями линейных размеров 15, 30, 60 и 120 км. Изучение фрактальной размерности распределения землетрясений по площади позволило определить в БРС области с устоявшимся (центральные районы) и неустойчивым сейсмическим режимом (юго-западный фланг зоны) [Солоненко, Штейман, 1994]. В работах С.И. Шермана с соавторами [Шерман, Леви, 1978; Шерман и др., 1996] фланги БРС являются зонами контакта блоков коры вдоль трансформных разломов и отличаются от центральной части БРС, ими были

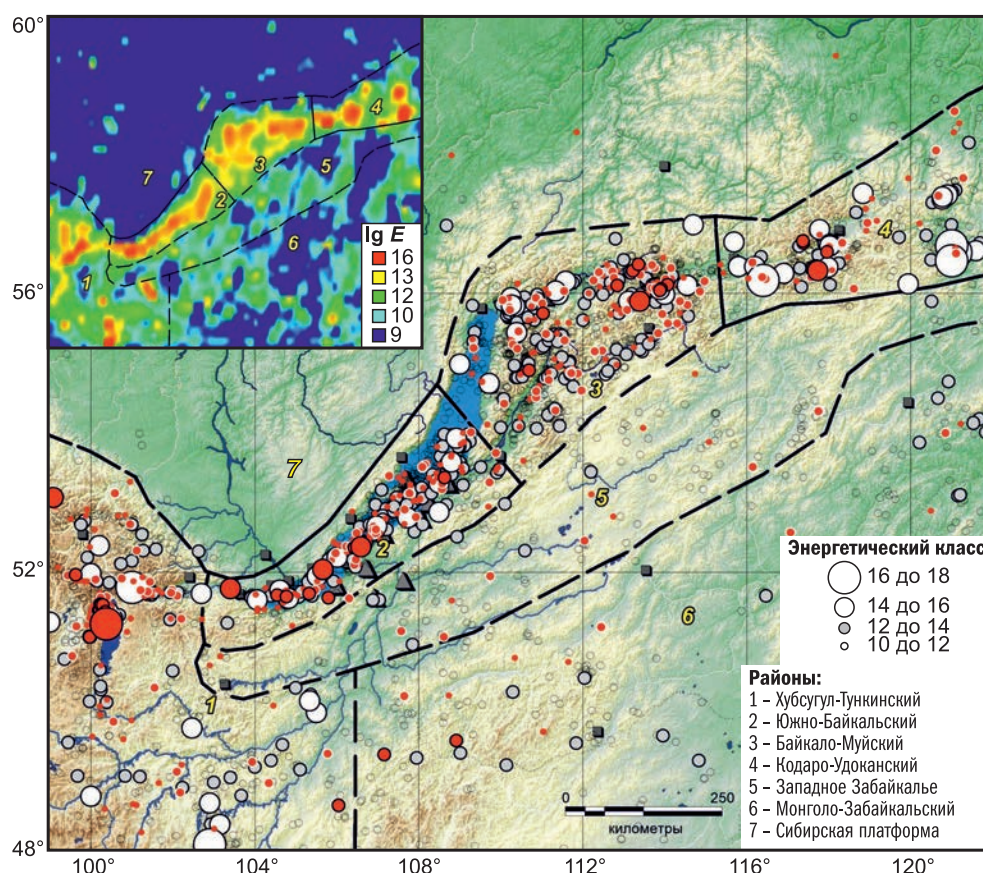


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 1950–2023 гг.

Жёлтые цифры – номера районов, красным цветом отмечены землетрясения за 2020–2022 гг., треугольниками отмечены сейсмостанции ГИН СО РАН и БуФ ФИЦ ЕГС РАН, квадратами – БФ ФИЦ ЕГС РАН, во врезке – карта логарифма сейсмической энергии, выделившейся за 1950–2023 гг. в ячейках 50×50 км

выделены региональные и локальные тектонические блоки с размерами 60, 90 и 120 км. На анализе плотности эпицентрального поля основывалось разделение на эпицентральные сейсмические районы в работе [Мельникова и др., 2003], в которой было показано, что карты плотности эпицентров с 10-летним интервалом характеризуются «стабильностью» расположения эпицентров землетрясений – с течением времени места наибольшей плотности эпицентров продолжают заполняться сейсмическими событиями в большей степени, чем окружающая территория.

В настоящей работе нами были выделены эпицентральные районы на основании геоморфологического районирования Прибайкалья и Забайкалья [Воскресенский, 1968] и сейсмических районов по [Мельникова и др., 2003], с учётом анализа не только плотности, но и интенсивности эпицентрального поля по современным данным до 2023 года. Карта распределения сейсмической энергии, выделившейся за период 1950–2023 гг. (рис. 1, врезка), хорошо согласу-

ется с выделенными районами, границы районов остаются в тех же пределах, что при разделении по плотностям эпицентров.

На кумулятивных графиках снятия упругих деформаций по Беньоффу, которые по высвобождению сейсмической энергии условно характеризуют сброс упругих напряжений [Benioff, 1951], прослеживается дифференциация протекания сейсмического процесса в выделенных эпицентральных районах (рис. 2). Районы, относящиеся к флангам БРС: Западное Забайкалье, Монголо-Забайкальский район и Сибирская платформа. Они характеризуются полными кумулятивными графиками Беньоффа с незначительным ростом на протяжении всего инструментального периода наблюдений, тогда как для районов, относящихся непосредственно к самому рифту (Хубсугул-Тункинского, Южно-Байкальского, Байкало-Муйского, Кодаро-Удоканского), характерны не только резкие скачки изменений, но и постоянный положительный тренд кумулятивного графика.

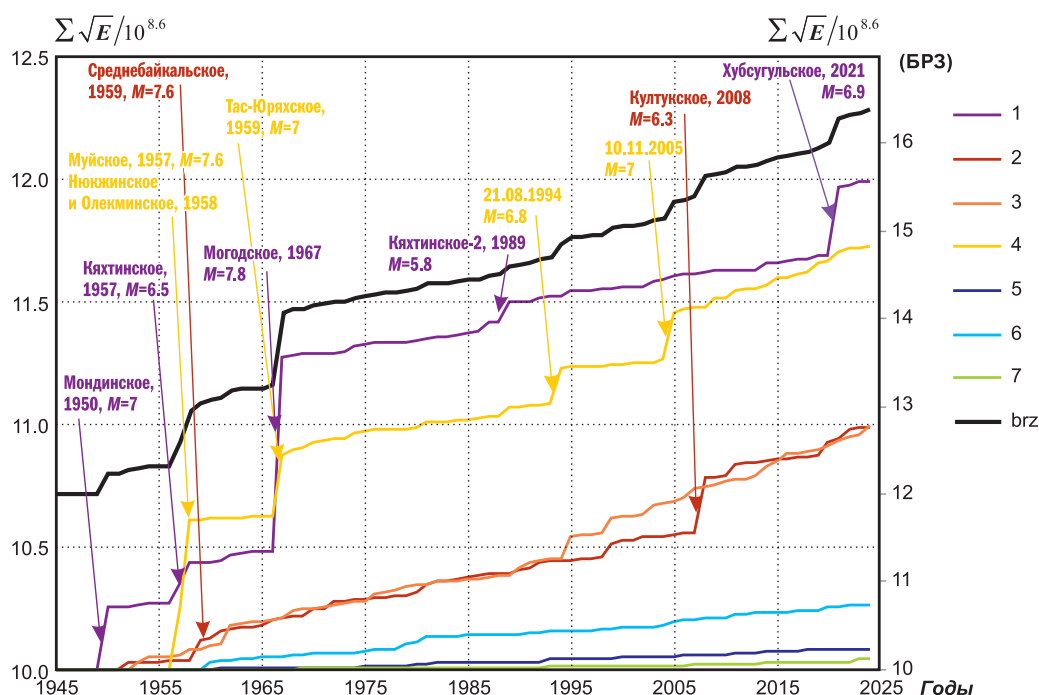


Рис. 2. Графики снятия упругих деформаций по Бенъоффу для сейсмических районов:

1 — Хубсугул-Тункинский, 2 — Южно-Байкальский, 3 — Байкало-Муйский, 4 — Кодаро-Удоканский, 5 — Западное Забайкалье, 6 — Монголо-Забайкальский, 7 — Сибирская платформа. brz — для всего региона

Юго-западный фланг БРС (район 1, Хубсугул-Тункинский) — переходная зона от рифтовых структур центральных районов БРС к структурам регионального сжатия Северной Монголии, представлен системой Тункинских впадин и является зоной действия крупных активных разломов (Главного Саянского и Тункинского). Тектонически район представляет собой область интенсивного горообразования. Район 2 (Южно-Байкальский), включает южную котловину и часть северной котловины озера Байкал с обрамляющими хребтами. Сейсмичность здесь контролируется несколькими крупными активными разломами, такими как Обручевский, Академический, Приморский, Сахалин-Энхалукский и др., и распределена по площади выделенного района, в целом, равномерно. Байкало-Муйский район (район 3) расположен между Северо-Байкальским нагорьем и Витимским плоскогорьем, включает в себя систему различно ориентированных рифтовых структур от северной части северной котловины Байкала до Муйской впадины. Кодаро-Удоканский район — северо-восточный фланг БРС, расположен к северо-востоку от границы Байкало-Муйского района за участком пониженной плотности землетрясений и более низких значений выделившейся сейсмической

энергии. Он захватывает часть рифтовой зоны, включающую Муйско-Чарскую межвпадинную перемычку и крупную Чарскую впадину и контролируется сложной и разветвлённой сетью Кодаро-Удоканской системы разломов. Сейсмичность распределена по площади района неравномерно, образует четыре очага повышенных значений E . Район Западного Забайкалья (район 5) обрамляет центральные районы БРС с юго-восточного края и образован хребтами Селенгинской Даурии и Витимского плоскогорья. Монголо-Забайкальский район включает в себя не только Даурский свод, наиболее приподнятую часть Забайкалья, но и степные котловины Восточного Забайкалья и частично территорию Северной Монголии. Новейший этап развития этой зоны характеризуется умеренными и слабыми тектоническими движениями положительного знака. Район 7, Сибирская платформа, самый большой по площади из выделенных районов, охватывает юго-восточную часть данной платформы и характеризуется слабой сейсмической активностью (рис. 1 и врезка).

Методика и результаты

Нами было проведено сравнение интенсивности сейсмичности эпицентральных районов

Байкальского региона с использованием эмпирической функции распределения выделившейся сейсмической энергии $F(K)=P(\lg E \leq K)$, где E – суммарная выделившаяся энергия в Джоулях [Saltykov, 2011]. Использование такого подхода обусловлено тем, что, например, при сопоставлении сейсмичности разных районов возникают сложности, связанные с тем, что одна и та же абсолютная величина выделившейся сейсмической энергии может быть аномально высокой для одного региона и аномально низкой для другого. В работах [Салтыков, 2009; Saltykov, 2011] показано, что в таких случаях более оправдано использование эмпирической функции распределения суммарной выделившейся сейсмической энергии, в отличие от применения абсолютных параметров. Также следует отметить, что удобным свойством энергетической величины является возможность её непосредственного суммирования в любых пределах изменения энергии, в то время как, например, параметры сейсмичности, связанные с наклоном графика повторяемости, имеет смысл рассматривать в пределах достаточно узких интервалах изменения энергии [Ризниченко, 1985]. В России величина землетрясений оценивается через энергетический класс (K), определяемый как десятичный логарифм излучаемой энергии в Джоулях. Шкала энергетических классов насыщается для землетрясений выше 15 класса, но для умеренных и слабых землетрясений её преимущество заключается в более дробном делении. Для Прибайкалья $K=K_p$, определяется по номограмме Т.Г. Раутиан, разработанной для внутриконтинентальных условий [Rautian, 1964; Rautian et al., 2007]. Таким образом, для всех землетрясений в выборке, выделившаяся сейсмическая энергия (E) рассчитывалась по формуле:

$$E = \sum_{i=1}^N 10^{K_i},$$

где N – количество землетрясений за промежуток времени, K_i – энергетический класс i -го землетрясения.

В настоящей работе для оценки интенсивности сейсмичности используется понятие «уровень сейсмичности» и шкала уровней сейсмичности на основе работы [Saltykov, 2011], в которой понятие фоновый уровень связано с определением «фон – обычный, наиболее часто встречающийся». В целом применение методики «СОУС'09» в прогностических целях подразумевает использование разных временных окон для оценки уровня сейсмичности. Это позволяет

детально для определённой территории исследовать во времени характер возникновения аномалий сейсмичности и изучить их природу. Но следует отметить, что возможность оценки уровня сейсмичности на разных временных интервалах (от дней до нескольких лет) определяется представительностью каталога. В настоящей работе проведён анализ оценки уровня сейсмичности для сейсмоактивных районов территории Прибайкалья и Забайкалья во временном окне 3 года, чтобы исключить разрывы на графиках выделившейся сейсмической энергии, связанные с ограниченными возможностями сети сейсмостанций на этапе её становления.

Для каждого из выделенных районов и для всего региона в целом были построены эмпирические функции распределения (ЭФР) выделившейся энергии за 1950–2023 гг. с $\Delta T=3$ года (рис. 3). Параметры кривых ЭФР количественно характеризуют сейсмичность районов. Смещение функций распределения отдельных районов по оси абсцисс говорит об уровне сейсмического потенциала, так что, чем правее верхнее окончание графика, тем выше сейсмический потенциал в рамках данного временного периода, положение начальной (нижней) точки графика характеризует значения минимально возможной выделившейся энергии для данного района.

Районы 5 (Западное Забайкалье) и 7 (Сибирская платформа) обладают наименьшим значением минимально возможной энергии – на уровне нижней границы представительности каталога $10^{9.0}$ Дж, и практически совпадающими значениями максимальной энергии $10^{13.3}$ и $10^{13.6}$ Дж соответственно. При этом они отличаются по значению фонового среднего уровня, функция распределения для Западного Забайкалья смещена вправо, что говорит о более высоких значениях «фоновых» землетрясений для этого района по сравнению с Сибирской платформой. Максимальное значение энергии E соответствует Хубсугул-Тункинскому району (фиолетовая линия) и является практически максимумом и для всего региона в целом. Хубсугул-Тункинский район характеризуется также и максимальным размахом возможных энергий E (больше 5 логарифмических единиц). Байкало-Муйский район (3) характеризуется минимальным размахом в 3 логарифмических единицы (таблица) и минимальным диапазоном для фонового среднего уровня <1.5 логарифмической единицы. Оценки уровня сейсмичности в районах Прибайкалья для 2020–2022 гг. показаны в таблице.

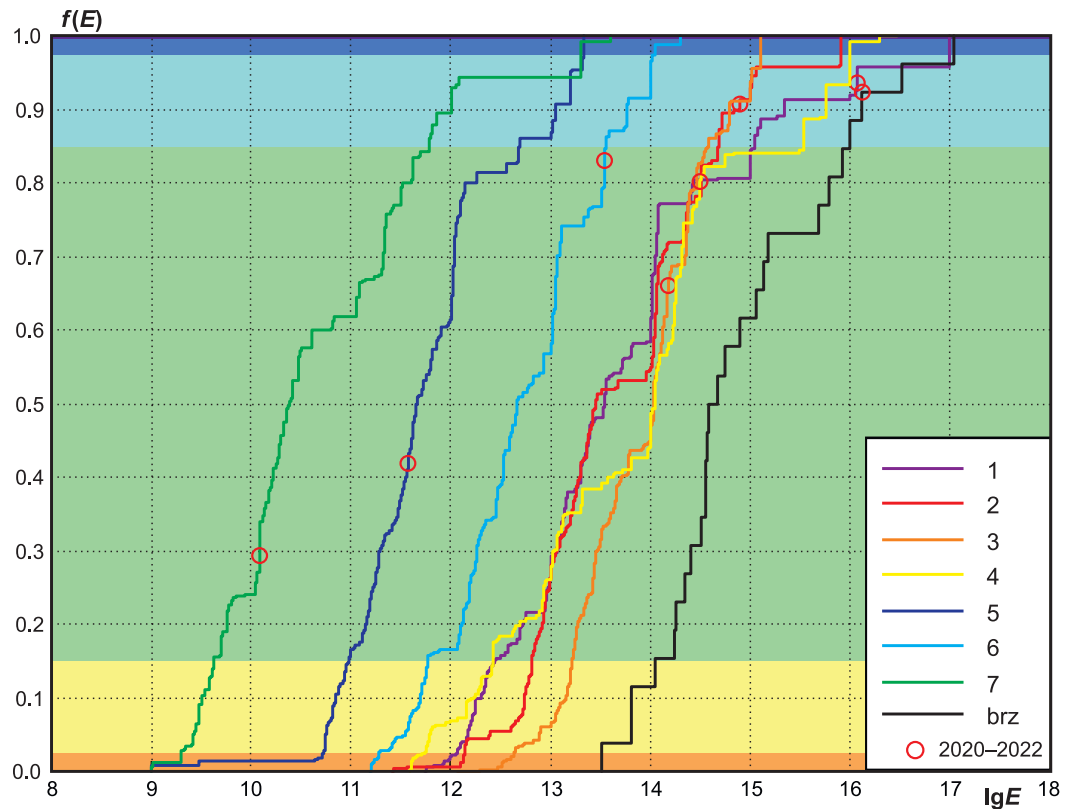


Рис. 3. Эмпирические функции распределения для выделенных районов ($\Delta T=3$ года) за 1950–2023 гг.

Цифрами обозначены районы: 1 – Хубсугул-Тункинский, 2 – Южно-Байкальский, 3 – Байкало-Муйский, 4 – Кодаро-Удоканский, 5 – Западное Забайкалье, 6 – Монголо-Забайкальский, 7 – Сибирская платформа. brz – Байкальская рифтовая система. Красной точкой обозначен десятичный логарифм выделившейся энергии за 2020–2022 гг. Цветом фона выделены уровни сейсмичности по [Салтыков, 2009; Saltykov, 2011]: оранжевый – низкий, жёлтый – фоновый пониженный, зелёный – фоновый средний, голубой – фоновый повышенный, синий – высокий, фиолетовый – экстремально высокий

Таблица. Параметры сейсмичности эпицентральных районов Прибайкалья и Забайкалья (параметры функций распределения и уровень сейсмичности в 2020–2022 гг.)

№ р-на	Район	N^*	$K_{\max}$	S , тыс. км ²	ρ , N/ 1000 км ²	Диапазон $E_{\text{крит.}}$, Дж	Диапазон $E_{\text{ср. фон.}}$, Дж	Значения для 2020–2022 гг.		
								E , Дж	F	уровень сейсмичности
1	Хубсугул-Тункинский	2861	17.0	232.6	12	$10^{11.74}–10^{17.00}$	$10^{12.44}–10^{15.04}$	$10^{16.08}$	0.936	фоновый повышенный
2	Южно-Байкальский	3775	15.9	78.8	48	$10^{11.42}–10^{15.92}$	$10^{12.82}–10^{14.69}$	$10^{14.9}$	0.907	фоновый повышенный
3	Байкало-Муйский	7919	15.1	116.4	68	$10^{12.06}–10^{15.10}$	$10^{13.22}–10^{14.58}$	$10^{14.19}$	0.660	фоновый средний
4	Кодаро-Удоканский	2418	16.0	88.6	27	$10^{11.59}–10^{16.48}$	$10^{12.42}–10^{15.54}$	$10^{14.50}$	0.801	фоновый средний
5	Западное Забайкалье	447	13.3	210.2	2	$10^{9.00}–10^{13.33}$	$10^{10.97}–10^{12.69}$	$10^{11.57}$	0.419	фоновый средний
6	Монголо-Забайкальский	861	14.0	595.3	1	$10^{11.19}–10^{14.31}$	$10^{11.77}–10^{13.56}$	$10^{13.55}$	0.831	фоновый средний
7	Сибирская платформа	122	13.6	742.4	<1	$10^{9.0}–10^{13.60}$	$10^{9.62}–10^{11.78}$	$10^{10.08}$	0.294	фоновый средний
	БРС	18403	17.0	2064.3	9	$10^{13.51}–10^{17.04}$	$10^{14.05}–10^{16.00}$	$10^{16.12}$	0.923	фоновый повышенный

Примечание к таблице: № р-на — номер района соответствует обозначению района в описании и на рис. 1; N^* — общее количество землетрясений с $K_p \geq 8.6$ за 1950–2023 гг., при этом за период 2021–2023 гг. в каталоге нет полных данных о землетрясениях с $K_p = 8.6–9.5$; $K_{\max}$ — энергетический класс наиболее сильного землетрясения за 1950–2023 гг.; S , тыс. км² — площадь района; ρ , $N/1000$ км² — плотность землетрясений за 1950–2023 гг.; диапазон $E_{\text{крит.}}$, Дж — диапазон возможных энергий в трёхлетнем временном окне за 1950–2023 гг.; диапазон $E_{\text{ср. фон.}}$, Дж — диапазон фонового среднего уровня в трёхлетнем временном окне за 1950–2023 гг., определённый по ЭФР; E , Дж, F , уровень сейсмичности — значения энергии, функции распределения и уровня сейсмичности для периода 2020–2022 гг.

Обсуждение

На территории Хубсугул-Тункинского района за инструментальный период наблюдений с 1950 г. было зарегистрировано сильнейшее в регионе Могодское землетрясение, поэтому максимальное значение E для всего региона больше 10^{17} Дж относится к этому району (рис. 1, врезка), а плотность составляет 12 событий на 1000 км² (таблица). На территории Хубсугул-Тункинского района также произошли сильнейшие Мондинское, Кяхтинское, Кяхтинское-2 и Хубсугульское землетрясения, отразившиеся в резких скачках кривой на графике Беньоффа не только для самого района (рис. 2, фиолетовая линия), но и для графика всего Прибайкалья и Забайкалья (чёрная линия «brz» на рис. 2). В периоды возникновения этих землетрясений в районе устанавливался фоновый повышенный уровень сейсмичности. Хубсугульская афтершоковая активизация отразилась не только в высвобождении сейсмической энергии, но и в огромном числе произошедших землетрясений, количество которых превышает более чем в 40 раз медианные оценки предыдущих лет (рис. 4). Из анализа кривых изменения количества и выделившейся энергии за три года можно отметить уменьшение количества в 1993–1995, 2014–2016 гг. при увеличении выделившейся энергии в эти периоды, рост числа землетрясений при уменьшении выделившейся энергии в 1996–1998 гг. Сильнейшим событиям района ($K_p \geq 15$), когда уровень сейсмичности района поднимался до фонового повышенного (1948–1950, 1957–1959, 1987–1989, 2020–2022 гг.) и экстремально высокого (1966–1968 гг.) уровней, предшествует фоновый средний уровень сейсмичности, без значительного уменьшения, только перед умеренными землетрясениями 2003 и 2014 гг. (энергетический класс 13.7, 13.9 соответственно) и после Могодского землетрясения (1967 г.) уровень сейсмичности был фоновый пониженный. При общем диапазоне

возможных энергий больше 5 логарифмических единиц, фоновый средний уровень составляет 2.6 единицы, период 2020–2022 гг. характеризуется фоновым повышенным уровнем сейсмичности с $F(10^{16.08}) = 0.936$ (таблица).

Для Южно-Байкальского района (2) при высокой плотности эпицентров землетрясений, 48 событий на 1 тыс. км² (таблица), максимальные значения суммарной сейсмической энергии не превышают 10^{16} Дж (см. на врезке рис. 1), хотя известно, что в этом районе произошло катастрофическое Цаганское землетрясение (12 января 1862 г. с $M \sim 7.5$). За инструментальный период регистрации стоит отметить Среднебайкальское, Култукское, Кударинское, Быстринское, Максимихинское (20 мая 2008 г. с $M = 5.3$), Туркинское (16 июля 2011 г. с $M = 5.3$) и два Голоустненских землетрясения 2022 года. Кривая графика снятия условных упругих деформаций (рис. 2, красная линия) характеризуется стабильным ростом, скачки на кривой соответствуют годам сильных землетрясений, упомянутых ранее. Наиболее сильное землетрясение района (Култукское), поднявшее уровень сейсмичности 2008–2010 гг. до экстремально высокого с $F(10^{15.9123}) = 0.999$, предварялось периодом практически с фоновым пониженным уровнем сейсмичности. Такие понижения уровня сейсмичности («затишья») прослеживаются и перед другими периодами активизаций (1957–1959, 1966–1974, 1981–1983, 1999–2001, 2020–2022 гг.). Количество регистрируемых событий находится в прямой зависимости с выделившейся энергией, за исключением трёх периодов — 1960–1962, 1984–1986 и 2005–2007 гг., — когда число событий возросло при падении выделившейся энергии. Диапазон возможных энергий составляет 4.5 логарифмической единицы, фоновый средний уровень — 1.9 единицы от $10^{12.8}$ до $10^{14.7}$ Дж, в 2020–2022 гг. уровень сейсмичности при $E = 10^{14.9}$ Дж относится к фоновому повышенному уровню, т.к. $F = 0.907$ (таблица).

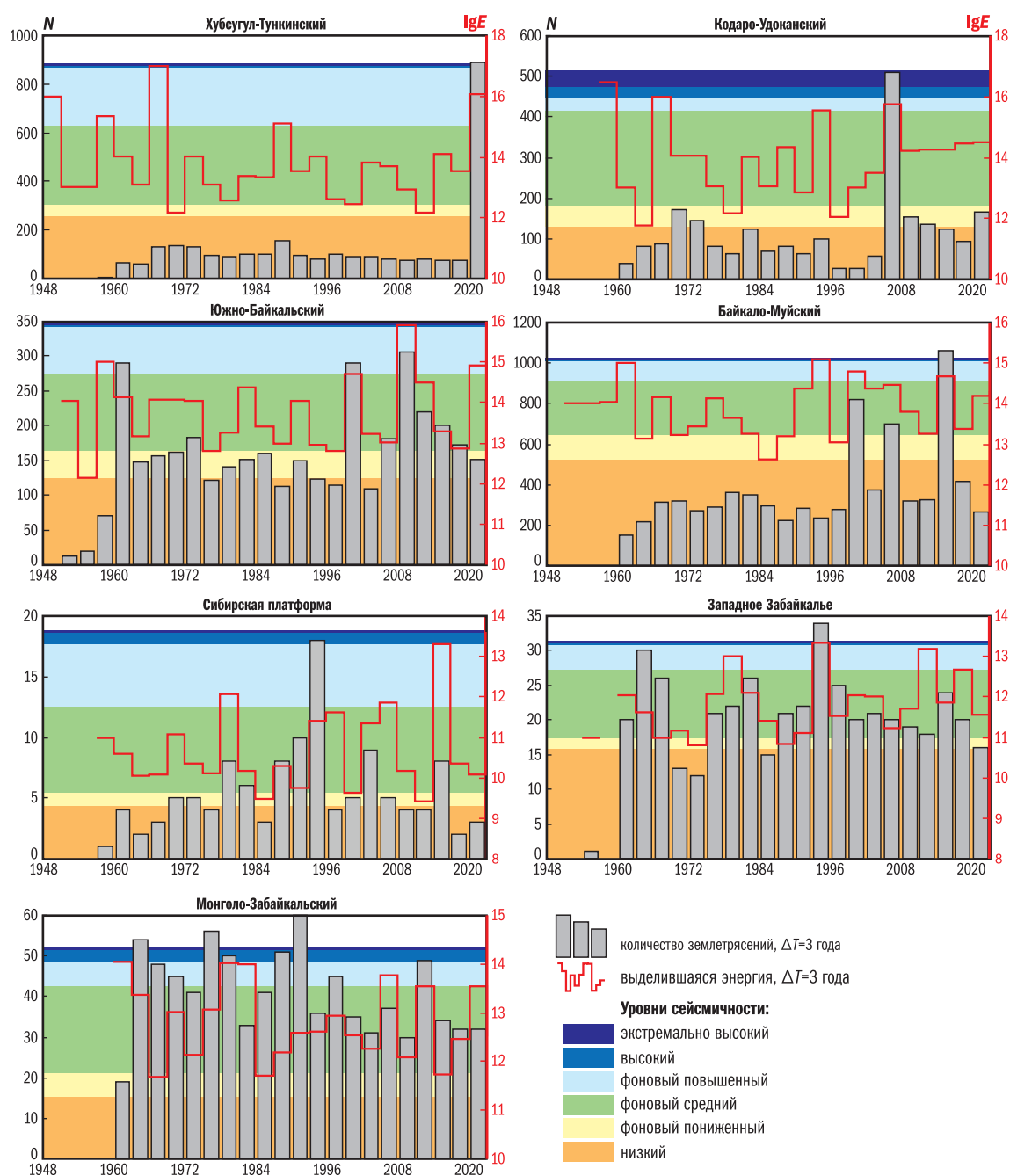


Рис. 4. Вариации во времени количества зарегистрированных землетрясений (левая ось ординат) и выделившейся сейсмической энергии (правая ось ординат)

При относительно небольших для БРС максимальных значениях E до $10^{15.1}$ Дж (рис. 1, врезка) и постепенным ростом суммарной энергии в течение времени (рис. 2, оранжевая линия), Байкало-Муйский район характеризуется наибольшей плотностью эпицентров до 68 на 1000 км^2 (таблица), из-за большого числа роевых активизаций, например, таких как Ангараковский рой, афтершоковая последовательность Кичерского землетрясения 1999 г. и Муяканская последовательность 2014–2015 гг.

Но не все сильные события сопровождаются большим количеством афтершоков — таким исключением стало, например, Южно-Муйское землетрясение 1995 года. Уровень сейсмичности перед сильными землетрясениями в этом районе не всегда стремится к низким значениям, в отличие от Южно-Байкальского района. Фоновый пониженный уровень сейсмичности характерен периодам после сильных событий региона ($K_p \geq 14.6$) в 1995, 1962, 2014 гг. После Кичерского землетрясения (1999 г. с $K_p=14.5$) за счёт

активизации и большого количества афтершоков уровень сейсмичности остаётся на протяжении последующих шести лет у верхней границы фонового среднего уровня. Аномально низкое значение уровня сейсмичности зарегистрировано в 1984–1986 гг., ни до, ни после которого не зафиксировано повышенных значений сейсмичности. Количество зарегистрированных землетрясений варьирует от 147 до 1054 землетрясений с $K_p \geq 8.6$, при медианном значении более 300 событий за три года. При этом Байкало-Муйский район характеризуется минимальным диапазоном выделившейся энергии, в 3 логарифмических единицы, при минимальном же диапазоне фонового среднего уровня в 1.36 логарифмической единицы. В 2020–2022 гг. уровень сейсмичности района был фоновым средним при $F(10^{14.2})=0.660$ (таблица).

Сейсмичность Кодаро-Удоканского района распределена по площади района неравномерно, образует четыре очага повышенных значений E до $10^{16.5}$ Дж (рис. 1, врезка), за счёт произошедших сильных землетрясений: Муйского, Нюкжинского, Олёкминского и Тас-Юряхского, отразившихся на графике Бенъофа резкими скачками (рис. 2, жёлтая линия). К этой же территории относят сильнейшее для БРС Восточно-Сибирское землетрясение 1 февраля 1725 г. с $M \sim 8.2$. Кодаро-Удоканский район при средних показателях по плотности (27 землетрясений на 1000 км^2) и силе землетрясений ($K_{\max}=16$) (таблица) характеризуется максимальным ростом выделившейся энергии (рис. 2). Периоды возникновения сильнейших землетрясений района (1957–1959 и 1966–1968 гг.) характеризуются экстремально высоким и высоким уровнями сейсмичности соответственно, перед которыми, как и в Южно-Байкальском районе, уровень сейсмичности низкий (рис. 4). Корреляция между выделившейся энергией и количеством зарегистрированных землетрясений практически всё время прямая, исключение составляют периоды 1963–1965 гг., когда на фоне резкого понижения уровня сейсмичности число регистрируемых землетрясений выросло, и 2017–2019 гг., когда число регистрируемых землетрясений сократилось при росте выделившейся энергии. Аномальная количественная активизация была зарегистрирована в 2005–2007 гг., в результате форшоков и афтершоков землетрясения 10 ноября 2005 г. с $M=5.6$, сформировавшее северо-восточный очаг повышенных значений E (рис. 1, врезка). Кодаро-Удоканский район характеризуется одним из самых широких диапазонов фонового среднего уровня

более 3 логарифмических единиц, при общем диапазоне возможных энергий менее 5 единиц. Период 2020–2022 гг. характеризуется фоновым средним уровнем с $F(10^{14.5})=0.801$ (таблица), продолжая стабильное течение с 2008 года.

Район Западного Забайкалья характеризуется значениями энергии E до $10^{13.3}$ Дж (рис. 1, врезка) и плотностью эпицентров два землетрясения на 1000 км^2 (таблица), что по характеру сейсмичности сходно с районом Сибирской платформы со слабой и рассеянной сейсмичностью. Но стоит отметить ощутимые землетрясения, произошедшие на данной территории – Оронгойское (2 октября 1980 г. с $K_p=13$), землетрясение 5 сентября 1993 г. с $K_p=13.3$ и Заганское (1 февраля 2011 г. с $K_p=13.2$). Уровень сейсмичности превышал фоновый средний не только в периоды этих землетрясений, но и в 2017–2019 гг., когда произошло два землетрясения с $K_p > 12$. Кривая выделившейся энергии – пологая с незначительным ростом за весь период наблюдений (рис. 2, синяя линия). Уровень выделившейся энергии и число зарегистрированных землетрясений, начиная с 1999 г., находится практически в обратной зависимости, хотя до этого периода зависимость $N \sim E$ была чаще прямой (рис. 4). В 2020–2022 гг. уровень сейсмичности понизился до $F(10^{11.57})=0.419$, но не вышел за пределы фонового среднего уровня (таблица).

Монголо-Забайкальский район характеризуется значениями энергии E до $10^{14.3}$ Дж (рис. 1, врезка) и плотностью эпицентров чуть больше одного землетрясения на 1000 км^2 , несмотря на его огромную территорию (таблица). Кривая выделившейся энергии пологая, но с небольшими (на фоне остальных районов) скачками в периоды сильных землетрясений ($K_p > 13.5$) в 1960, 1979 и 1981 гг. (рис. 2, голубая линия). Этим же периодам соответствуют повышенный и высокий уровни сейсмичности района (рис. 4). При этом можно наблюдать как рост выделившейся энергии в периоды перед сильными землетрясениями, так и её снижение. Период 1978–1983 гг. интересен тем, что, когда произошли одни из самых сильных землетрясений района, число зарегистрированных землетрясений снижалось относительно предыдущего периода. В 2005–2007 гг. уровень сейсмичности района был фоновым повышенным за счёт произошедших двух землетрясений с $K_p=13.3$, одно из которых – Бaleyское (6 января 2006 г. с $M_w=4.5$), которое, несмотря на умеренное значение магнитуды, ощущалось на достаточно большой территории [Radziminovich et al., 2012]. В 2020–2022 гг. уровень сейсмичности вырос

до $E=10^{13.55}$ Дж, но не вышел за пределы фонового среднего уровня с $F=0.83$ (таблица).

Сейсмическая активность района 7 тяготеет к краевому шву между платформой и БРС и образует территорию рассеянной сейсмичности в полосе 150–300 км [Семинский и др., 2008; Seminskii, Radziminovich, 2007]. Несмотря на сейсмический потенциал $M=6.0–6.5$ [Chipizubov et al., 2001; Овсяченко и др., 2007; Radziminovich, Shchetnikov, 2008], в настоящее время сейсмическая энергия района Сибирской платформы не превышает $10^{13.6}$ Дж, а плотность эпицентров за счёт большой территории низкая – менее одного события на 1000 км^2 (таблица). График Бенъофа (рис. 2, зелёная линия), имеет пологий характер, с минимальным ростом значений суммарной энергии на протяжении всего периода. Анализ графиков изменения количества зарегистрированных землетрясений и выделившейся энергии в районе (рис. 4) показывает увеличение числа событий в 1960–1962, 1972–1974, 1990–1992, 1999–2001 и 2020–2022 гг. при уменьшении выделившейся энергии, а также резкое уменьшение количества в 1996–1998 гг. после постепенного подъёма в период с 1987 по 1995 г., при повышении уровня выделившейся энергии в 1996–1998 гг. Ту же обратную зависимость количества землетрясений и энергии, но с увеличением выделившейся энергии при уменьшении количества можно наблюдать в 2005–2007 гг. Прямая корреляция между количеством зарегистрированных землетрясений и их энергией фиксируется в половине трёхлетних периодов – шесть периодов повышения и шесть совместного понижения. Повышенный и высокий уровни сейсмичности района, связанные с сильными событиями с $K_p \geq 11.8$ (1980, 2014 гг.) и активизацией 2005–2007 гг., когда произошли два события с энергетическим классом 11.5 и 11.6 соответственно, предваряются периодами с низким уровнем сейсмичности. Фоновый средний уровень сейсмичности составляет почти две логарифмические единицы, при общем диапазоне возможных энергий 5 логарифмических единиц (таблица). Период 2020–2022 гг. характеризуется фоновым средним уровнем с $F(10^{10.9})=0.461$, который предваряет повышение уровня выделившейся энергии по данным всего за один 2023 год.

Заключение

Хубсугул-Тункинский и Южно-Байкальский районы и вся область Прибайкалья и Забайкалья в 2020–2022 гг. характеризуются фоновым повы-

шенным уровнем сейсмичности, из-за произошедших в этот период сильных землетрясений: Быстринского (21 сентября 2020 г., $M_w=5.5$), Кударинского (9 декабря 2020 г., $M_w=5.5$), Хубсугульского (11 января 2021 г., $M=6.5$) и двух Голоустненских (8 июня 2022 г., $M_w=5.2$ и 4 октября 2022 г. $m_b=5.0$). Остальные пять районов характеризуются фоновым средним уровнем сейсмичности в 2020–2022 гг. Период 2020–2022 гг. характеризуется фоновым повышенным уровнем сейсмичности для всего региона, обусловленным сильными землетрясениями, произошедшими в Хубсугул-Тункинском и Южно-Байкальском районах в эти годы.

По графику снятия упругих деформаций (рис. 2) и характеристикам сейсмичности (рис. 3, таблица) районы можно разделить на три группы: (1) Хубсугул-Тункинский и Кодаро-Удоканский районы – фланги БРС – районы с максимальными значениями выделившейся энергии, при средних значениях плотности землетрясений, сильнейшими землетрясениями для этих районов являются землетрясения с $K_p > 15$ и 15.5 соответственно; (2) Южно-Байкальский и Байкало-Муйский – районы с наибольшей плотностью землетрясений при умеренных значениях максимальных энергий, сильными землетрясениями для этих районов являются землетрясения с $K_p \geq 14.7$ и 14.6 соответственно; (3) Сибирская платформа, Западное Забайкалье и Монголо-Забайкальский – районы с низкой активностью, низкой плотностью землетрясений, плавным ростом выделившейся энергии, сильными землетрясениями для этих районов являются землетрясения с $K_p > 11.8$, 12.7 и 13.6 соответственно.

Изучение вариаций уровня сейсмичности эпицентральных районов с использованием подхода [Saltykov, 2011] позволило дать детальную количественную характеристику сейсмического режима Байкальского региона, которая может стать основой для дальнейших исследований в области оценки сейсмической опасности и прогноза сильных землетрясений.

Работа выполнена в рамках гос. задания № АААА-А21-121011890033-1 и № 075-00604-25 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

- Воскресенский С.С. Геоморфология СССР. — М.: Высшая школа, 1968. — 368 с.
- Голенецкий С.И., Букина К.И., Анисимова Л.В., Мельникова Г.Л., Новомейская Ф.В., Первалова Г.И., Солоненко Н.В., Третьяк Э.А., Фомина Е.В. Землетрясения Прибайкалья // Землетрясения в СССР в 1969 году. — М.: Наука, 1973. — С. 106–121.
- Каталог землетрясений Прибайкалья 01.01.1960 г. — 31.12.2023 г. — URL: <http://seis-bykl.ru> (дата обращения 10.01.2024 г.).
- Кочетков В.М., Боровик Н.С., Леонтьева Л.Р., Гилёва Н.А. Детальный анализ сейсмического поля Прибайкалья // Сейсмичность и сейсмогеология Восточной Сибири. — М.: Наука, 1977. — С. 62–73.
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Курушин Р.А., Масальский О.К., Шлаевская Н.С. Выделение условных районов для ежегодных обзоров сейсмичности региона Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. — Обнинск: Изд-во ФОП, 2003. — С. 107–117.
- Мишарина Л.А., Солоненко А.В. Влияние блоковой делимости земной коры на распределение сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне // Сейсмичность Байкальского рифта. Прогностические аспекты. — Новосибирск: Наука (СО), 1990. — С. 70–78.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
- Овсяченко А.Н., Шварев С.В., Мараханов А.В. Голоценовая геологическая активность разломов центральной части Иркутского амфитеатра // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы Всероссийского совещания с международным участием. В 2-х т. Т. 2. — Иркутск, ИЗК СО РАН, 2007. — С. 60–67. — EDN: QKGUBV
- Радзиминович Я.Б., Лухнева О.Ф., Новопашина А.В., Цыдыпова Л.Р., Тубанов Ц.А., Гилёва Н.А. Землетрясение 08.06.2022 г. ($M_w=5.2$) в Южном Прибайкалье: анализ макросейсмических данных // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2023. — Т. 50, № 2. — С. 25–48. — DOI: 10.21455/VIS2023.2-2. — EDN: MCMJSG
- Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Тр. ИФЗ АН СССР; № 32(199)). — М.: Наука, 1964. — С. 88–93.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
- Салтыков В.А. Формализованная оценка уровня сейсмичности на примере Камчатки и Байкальского региона // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвертой Международной сейсмологической школы. — Обнинск: ГС РАН, 2009. — С. 178–182. — EDN: SWDXVR
- Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Под ред. В.П. Солоненко. — Новосибирск: Наука, 1981. — 168 с.
- Семинский К.Ж., Гладков А.С., Вахромеев А.Г., Черемных А.В., Бобров А.А., Козут Е.И. Разломы и сейсмичность юга Сибирской платформы: особенности проявления на разных масштабных уровнях // Литосфера. — 2008. — № 4. — С. 3–21. — EDN: JVJDJN
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. — М.: ИФЗ РАН, 2011. — 56 с. — EDN: QKJYEV
- Солоненко А.В., Штейман Е.А. Самоподобие поля сейсмичности Байкальского рифта // Доклады Академии наук. — 1994. — Т. 337, № 2. — С. 253–257.
- Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны и сейсмичность её флангов // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. — М.: Наука, 1978. — С. 7–18.
- Шерман С.И., Черемных А.В., Адамович А.Н. Разломно-блоковая делимость литосферы: закономерности структурной организации и тектонической активности // Геодинамика и эволюция Земли (Материалы к научной конференции РФФИ). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. — С. 74–76.
- Beirlant J., Kijko A., Reynkens T., Einmahl J. Estimating the maximum possible earthquake magnitude using extreme value methodology: The Groningen case // Natural Hazards. — 2019. — V. 98. — P. 1091–1113. — DOI: 10.1007/s11069-017-3162-2
- Benioff H. Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks) // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1951. — V. 41, N 1. — P. 31–62. — DOI: 10.1785/BSSA0410010031
- Chipizubov A.V., Arzhannikova A.V., Vorob'eva G.A., Berdnikov N.E. Buried paleoseismodislocations in the southern Siberian platform // Doklady Earth Sciences. — 2001. — V. 379. — P. 586–588. — EDN: LGPRKP
- El-Isa Z.H., Eaton D.W. Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude–frequency distributions: Classification and causes // Tectonophysics. — 2014. — V. 615–616. — P. 1–11. — DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.001
- Emanov A.F., Emanov A.A., Shevkunova E.V., Fateev A.V., Gladyshev E.A., Arapov V.V., Artemova A.I., Podkorytova V.G., Chechel'nitskii V.V., Radziminovich Y.B.,

- Kobeleva E.A. The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 ($M_w=6.7$, $M_L=6.9$) and early aftershocks // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2022. — V. 58, N 1. — P. 59–73. — DOI: 10.1134/S1069351322100019. — EDN: EHDBHU
- Gileva N.A., Kobeleva E.A., Radziminovich Ya.B., Melnikova V.I., Chechelnitsky V.V. The September 21, 2020, $M_w=5.5$, Bystraya earthquake in the Southern Baikal region: Preliminary results of instrumental and macroseismic observations // *Seismic Instruments*. — 2021. — V. 57, N 2. — P. 175–186. — DOI: 10.3103/s0747923921020237. — EDN: QYEGTG
- Herrmann M., Piegari E., Marzocchi W. Revealing the spatiotemporal complexity of the magnitude distribution and b-value during an earthquake sequence // *Nature Communications*. — 2022. — V. 13, N 5087. — DOI: 10.1038/s41467-022-32755-6
- Holschneider M., Zöller G., Hainzl S. Estimation of the maximum possible magnitude in the framework of a doubly truncated Gutenberg-Richter model // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2011. — V. 101, N 4. — P. 1649–1659. — DOI: 10.1785/0120100289
- Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M. Correspondence between spatiotemporal variations in geodynamic and seismic processes in the Baikal region // *Doklady Earth Sciences*. — 2003. — V. 390, N 4. — P. 615–619. — EDN: LIFMKX
- Marzocchi W., Sandri L. A review and new insights on the estimation of the b-value and its uncertainty // *Annals of Geophysics*. — 2009. — V. 46, N 6. — DOI: 10.4401/ag-3472
- Nava F.A., Márquez-Ramírez V.H., Zúñiga F.R., Ávila-Barrientos L., Quinteros C.B. Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size // *Journal of Seismology*. — 2017. — V. 21. — P. 127–135. — DOI: 10.1007/s10950-016-9589-1
- Pisarenko V.F., Rodkin M.V. Approaches to solving the maximum possible earthquake magnitude (M_{max}) problem // *Surveys in Geophysics*. — 2022. — V. 43. — P. 561–595. — DOI: 10.1007/s10712-021-09673-1
- Pisarenko V.F., Rodkin M.V. Statistics and spatial-temporal structure of ground acceleration caused by earthquakes in the North-Western Pacific // *Pure and Applied Geophysics*. — 2020. — V. 177. — P. 2563–2578. — DOI: 10.1007/s00024-019-02415-w
- Pisarenko V.F., Ruzhich V.V., Skorkina A.A., Levina E.A. The structure of seismicity field in the Baikal rift zone // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2022. — V. 58, N 3. — P. 329–345. — DOI: 10.1134/S1069351322030053. — EDN: QVUHWK
- Radziminovich N.A., Gileva N.A., Melnikova V.I., Ochkovskaya M.G. Seismicity of the Baikal rift system from regional network observations // *Journal of Asian Earth Sciences*. — 2013. — V. 62. — P. 146–161. — DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.10.029
- Radziminovich N.A., Miroshnichenko A.I., Zuev F.L. Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal basin, Baikal rift system // *Tectonophysics*. — 2019. — V. 759. — P. 44–57. — DOI: 10.1016/j.tecto.2019.04.002. — EDN: ZFHPAC
- Radziminovich Y.B., Lukhneva O.F., Novopashina A.V., Gileva N.A., Tubanov T.A., Tsydyypova L.R. The December 9, 2020, M_w 5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): Internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis // *Bulletin of Earthquake Engineering*. — 2022. — V. 20, N 3. — P. 1297–1324. — DOI: 10.1007/s10518-021-01305-8. — EDN: EVMQWQ
- Radziminovich Ya.B., Mel'nikova V.I., Serechkina A.I., Gileva N.A., Radziminovich N.A., Papkova A.A. The Balei earthquake of 6 January 2006 ($M_w=4.5$): A rare case of seismic activity in eastern Transbaikalia // *Russian Geology and Geophysics*. — 2012. — V. 53, N 10. — P. 1100–1110. — DOI: 10.1016/j.rgg.2012.08.010. — EDN: RGHVCB
- Radziminovich Ya.B., Shchetnikov A.A. Historical seismicity on the southern margin of the Siberian craton: new data // *Russian Geology and Geophysics*. — 2008. — V. 49, N 9. — P. 698–707. — DOI: 10.1016/j.rgg.2007.12.013. — EDN: LLBANX
- Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian Energy K-class system and its relationship to magnitude scales // *Seismological Research Letters*. — 2007. — V. 78, N 6. — P. 579–590. — DOI: 10.1785/gssrl.78.6.579
- Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka // *Journal of Volcanology and Seismology*. — 2011. — V. 5, N 2. — P. 123–128. — DOI: 10.1134/S0742046311020060. — EDN: OHTIXN
- Seminskii K.Zh., Radziminovich Ya.B. Seismicity of the southern Siberian platform: Spatiotemporal characteristics and genesis // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2007. — V. 43, N 9. — P. 726–737. — DOI: 10.1134/S1069351307090029. — EDN: LKKZXF
- Seminsky K.Zh., Borneyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., San'kov V.A., Bobrov A.A., Il'yasova A.M., Salko D.V., San'kov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Mialle P., Ulzibat M. The Bystrinskoe earthquake in the Southern Baikal region (21 September 2020, $M_w=5.4$): Main parameters, precursors, and accompanying effects // *Russian Geology and Geophysics*. — 2021. — V. 62, N 5. — P. 589–603. — DOI: 10.2113/RGG20204296. — EDN: GARUFH
- Taroni M., Carafa M.M.C. Earthquake size distributions are slightly different in compression vs extension // *Communications Earth & Environment*. — 2023. — V. 4. — A. 398. — DOI: 10.1038/s43247-023-01059-y

- Tubanov Ts.A., Sanzhieva D.P.-D., Kobeleva E.A., Predein P.A., Tsydyпова L.R.* Kudara earthquake of September 12, 2020 ($M_w=5.5$) on Lake Baikal: Results of instrumental and macroseismic observations // *Seismic Instruments*. – 2022. – V. 58, N 1. – P. 86–98. – DOI: 10.3103/S0747923922010108. – EDN: ELCJRI
- Vermeulen P., Kijko A.* More statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation // *Acta Geophysica*. – 2017. – V. 65. – P. 579–587. – DOI: 10.1007/s11600-017-0048-3

Сведения об авторах

Санжиева Дарима Пурба-Доржиевна, инженер Бурятского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БуФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Улан-Удэ, Россия; мл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ, Россия. E-mail: gindarima@mail.ru

Тубанов Цырен Алексеевич, канд. геол.-мин. наук, директор БуФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия; зав. лаб. ГИН СОРАН, г. Улан-Удэ, Россия. E-mail: geos@ginst.ru

Кобелева Елена Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, директор Байкальского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Иркутск, Россия. E-mail: ekobeleva@crust.irk.ru

Assessment of the seismicity level of the Baikal and Transbaikal regions in 2020–2022

© 2025 D.P.-D. Sanzhieva^{1,2}, Ts.A. Tubanov^{1,2}, E.A. Kobeleva³

¹BuB GS RAS, Ulan-Ude, Russia; ²GIN SB RAS, Ulan-Ude, Russia; ³BB GS RAS, Irkutsk, Russia

Received February 19, 2025

Abstract The article is devoted to the assessment of the seismicity level of the Baikal and Transbaikal regions. Since seismicity in the region is heterogeneous, we assessed the seismicity level using the SESL'09 method for individual regions, using empirical distribution functions of the total released seismic energy. The use of such an approach is justified in cases of qualitative comparison of seismic regime parameters of different areas, when the same absolute value of seismic energy can be abnormally high for one area and abnormally low for another. For this purpose, the study area was divided into zones based on geomorphological and seismological data. For the selected areas and the study area as a whole, the total graphs of conditional elastic deformation release (according to Benioff), empirical distribution functions of seismic energy in a three-year time window, graphs of variations in released energy and the number of earthquakes were analyzed. As a result, the seismicity level in 2020–2022 was defined as background increased for the entire study area and the Khuvsgul-Tunkinsky and South Baikal regions, and background average for the remaining six regions. The magnitude (energy class) of earthquakes that can be called significant (strong) for each region was identified. The epicentral regions of the Baikal and Transbaikal regions were divided into three groups with high, medium and low seismic activity, depending on the seismicity parameters obtained in this work ($K_{\max}$, density, ranges of extremes of possible released energy and the average background level, the slope of the release graph of conditional elastic deformations).

Keywords Baikal rift, seismicity level, empirical distribution function, seismic energy, strong earthquakes, zonation, seismicity parameters.

For citation Sanzhieva, D.P.-D., Tubanov, Ts.A., & Kobeleva, E.A. (2025). [Assessment of the seismicity level of the Baikal and Transbaikal regions in 2020–2022]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(2), 7–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.2.01>. EDN: IGIOEK

References

- Beirlant, J., Kijko, A., Reynkens, T., & Einmahl, J. (2019). Estimating the maximum possible earthquake magnitude using extreme value methodology: The Groningen case. *Natural Hazards*, 98, 1091–1113. DOI: 10.1007/s11069-017-3162-2
- Benioff, H. (1951). Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 41(1), 31–62. DOI: 10.1785/BSSA0410010031
- Chipizubov, A.V., Arzhannikova, A.V., Vorob'eva, G.A., & Berdnikov, N.E. (2001). Buried paleoseismodislocations in the southern Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 379, 586–588. EDN: LGPRKP
- El-Isa, Z.H., & Eaton, D.W. (2014). Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude–frequency distributions: Classification and causes. *Tectonophysics*, 615–616, 1–11. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.001
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Shevkunova, E.V., Fateev, A.V., Gladyshev, E.A., Arapov, V.V., Artemova, A.I., Podkorytova, V.G., Chechel'nitskii, V.V., Radzimovich, Y.B., & Kobeleva, E.A. (2022). The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 ($M_w=6.7$, $M_L=6.9$) and early aftershocks. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58(1), 59–73. DOI: 10.1134/S1069351322100019. EDN: EHDBHU
- Gileva, N.A., Kobeleva, E.A., Radzimovich, Y.B., Melnikova, V.I., & Chechel'nitsky, V.V. (2021). The September 21, 2020, $M_w=5.5$, Bystraya Earthquake in the Southern Baikal Region: Preliminary Results of Instrumental and Macroseismic Observations. *Seismic Instruments*, 57, 173–186. DOI: 10.3103/S0747923921020237
- Golenetskii, S.I., Bukina, K.I., Anisimova, L.V., Myl'nikova, G.L., Novomeiskaia, F.V., Perevalova, G.I., Solonenko, N.V., Tret'iak, E.A., & Fomina, E.V. (1973). [Earthquakes in the Baikal region]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1969 godu* [Earthquakes in the USSR, 1969] (pp. 106–121). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Herrmann, M., Piegari, E., & Marzocchi, W. (2022). Revealing the spatiotemporal complexity of the magnitude distribution and b-value during an earthquake sequence. *Nature Communications*, 13(5087). DOI: 10.1038/s41467-022-32755-6

- Holschneider, M., Zöller, G., & Hainzl, S. (2011). Estimation of the Maximum Possible Magnitude in the Framework of a Doubly Truncated Gutenberg–Richter Model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1649–1659. DOI: 10.1785/0120100289
- Katalog zemletriasenii Pribaikal'ia 01.01.1960–31.12.2023 gg. [Catalogue of earthquakes in the Baikal region 01.01.1960–31.12.2023] (2024). Retrieved from <http://seis-bykl.ru> (In Russ.).
- Klyuchevskii, A.V., & Dem'yanovich, V.M. (2003). Correspondence between spatiotemporal variations in geodynamic and seismic processes in the Baikal region. *Doklady Earth Sciences*, 390(4), 615–619. EDN: LIFMKX
- Kochetkov, V.M., Borovik, N.S., Leont'eva, L.R., & Gileva, N.A. (1977). [Detailed analysis of the seismic field of the Baikal region]. In *Seismichnost' i seismogeologiya Vostochnoi Sibiri* [Seismicity and seismogeology of Eastern Siberia] (pp. 62–73). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1977). *Novyy katalog sil'nykh zemletryaseniy na territorii SSSR s drevnejshih vremyon do 1975 g.* [New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
- Marzocchi, W., & Sandri, L. (2009). A review and new insights on the estimation of the b-value and its uncertainty. *Annals of Geophysics*, 46(6). DOI: 10.4401/ag-3472
- Mel'nikova, V.I., Gileva, N.A., Kurushin, R.A., Masal'skii, O.K., & Shlaevskaia, N.S. (2003). [Allocation of conditional areas for annual seismicity reviews of the Baikal and Transbaikalian regions]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 1997 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 1997] (pp. 107–117). Obninsk, Russia: FOP Publ. (In Russ.).
- Misharina, L.A., & Solonenko, A.V. (1990). [The influence of block divisibility of the earth's crust on the distribution of seismicity in the Baikal rift zone]. In *Seismichnost' Baikalskogo rifta. Prognosticheskie aspekty* [Seismicity of the Baikal Rift. Prognostic Aspects] (pp. 70–78). Novosibirsk, Russia: Nauka (SB) Publ. (In Russ.).
- Nava, F.A., Márquez-Ramírez, V.H., Zúñiga, F.R., Ávila-Barrientos, L., & Quinteros, C.B. (2017). Gutenberg–Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, 21, 127–135. DOI: 10.1007/s10950-016-9589-1
- Ovsichenko, A.N., Shvarev, C.V., & Marakhanov, A.V. (2007). [Holocene geological activity of faults in the central part of the Irkutsk amphitheater]. In *Problemy sovremennoi seismogeologii i geodinamiki Tsentral'noi i Vostochnoi Azii: Materialy Vserossiiskogo soveshchaniia s mezhdunarodnym uchastiem. V 2-kh t. T. 2.* [Problems of modern seismogeology and geodynamics of Central and East Asia: Materials of the All-Russian meeting with international participation. In 2 vols. Vol. 2] (pp. 60–67). Irkutsk, Russia: IEC SB RAS Publ. (In Russ.). EDN: QKGUBB
- Pisarenko, V.F., & Rodkin, M.V. (2020). Statistics and Spatial–Temporal Structure of Ground Acceleration Caused by Earthquakes in the North-Western Pacific. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 2563–2578. DOI: 10.1007/s00024-019-02415-w
- Pisarenko, V.F., & Rodkin, M.V. (2022). Approaches to solving the maximum possible earthquake magnitude ($M_{\max}$) problem. *Surveys in Geophysics*, 43, 561–595. DOI: 10.1007/s10712-021-09673-1
- Pisarenko, V.F., Ruzhich, V.V., Skorkina, A.A., & Levina, E.A. (2022). The structure of seismicity field in the Baikal rift zone. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58(3), 329–345. DOI: 10.1134/S1069351322030053. EDN: QVUHWK
- Radziminovich, N.A., Gileva, N.A., Melnikova, V.I., & Ochkovskaya, M.G. (2013). Seismicity of the Baikal rift system from regional network observations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 146–161. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.10.029
- Radziminovich, N.A., Miroshnichenko, A.I., & Zuev, F.L. (2019). Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal Basin, Baikal Rift System. *Tectonophysics*, 759, 44–57. DOI: 10.1016/j.tecto.2019.04.002. EDN: ZFHPAC
- Radziminovich, Y.B., Lukhneva, O.F., Novopashina, A.V., Gileva, N.A., Tubanov, T.A., & Tsydypova, L.R. (2022). The December 9, 2020, M_w 5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(3), 1297–1324. DOI: 10.1007/s10518-021-01305-8
- Radziminovich, Ya.B., & Shchetnikov, A.A. (2008). Historical seismicity on the southern margin of the Siberian craton: new data. *Russian Geology and Geophysics*, 49(9), 698–707. DOI: 10.1016/j.rgg.2007.12.013. EDN: LLBANX
- Radziminovich, Ya.B., Lukhneva, O.F., Novopashina, A.V., Tsydypova, L.R., Tubanov, T.A., & Gileva, N.A. (2023). [The June 8, 2022, M_w 5.2 earthquake in the Southern Baikal region: macroseismic data analysis]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Questions of Engineering Seismology], 50(2), 25–48. (In Russ.). DOI: 10.21455/VIS2023.2-2. EDN: MCMJSG
- Radziminovich, Ya.B., Mel'nikova, V.I., Seredkina, A.I., Gileva, N.A., Radziminovich, N.A., & Papkova, A.A. (2012). The Balei earthquake of 6 January 2006 ($M_w=4.5$): A rare case of seismic activity in eastern Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*, 53(10), 1100–1110. DOI: 10.1016/j.rgg.2012.08.010. EDN: RGHVCB
- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Ekspperimental'naya seismika. Trudy IFZ AN SSSR N 32(199)* [Experimental seismic. Proceedings of the IPE AS USSR N 32(199)] (pp. 88–93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Rautian, T.G., Khalturin, V.I., Fujita, K., Mackey, K.G., & Kendall, A.D. (2007). Origins and methodology of the Russian Energy K-Class System and its

- relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6), 579-590. DOI: 10.1785/gssrl.78.6.579
- Riznichenko, Yu.V. (1985). *Problemy seismologii. Izbrannye trudy* [Seismology problems. Selected Works]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 408 p. (In Russ.).
- Saltykov, V.A. (2009). [Formalized estimation of seismicity level by the example of Kamchatka and Baikal region]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: Materialy Chetvertoi Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the Fourth International Seismological Workshop] (pp. 178-182). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: SWDXVR
- Saltykov, V.A. (2011). A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*, 5(2), 123-128. DOI: 10.1134/S0742046311020060. EDN: OHTIXN
- Seminskii, K.Zh., & Radziminovich, Ya.B. (2007). Seismicity of the southern Siberian platform: Spatio-temporal characteristics and genesis. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 43(9), 726-737. DOI: 10.1134/S1069351307090029. EDN: LKKZXF
- Seminskii, K.Zh., Gladkov, A.S., Vakhromeev, A.G., Cheremnykh, A.V., Bobrov, A.A., & Kogut, E.I. (2008). [Faults and seismicity of the south of the Siberian platform: features of manifestation at different scale levels]. *Litosfera* [Lithosphere], 4, 3-21. (In Russ.). EDN: JVJDJN
- Seminsky, K.Zh., Bornyakov, S.A., Dobrynina, A.A., Radziminovich, N.A., Rasskazov, S.V., San'kov, V.A., Bobrov, A.A., Il'yasova, A.M., Salko, D.V., San'kov, A.V., Seminsky, A.K., Chebykin, E.P., Shagun, A.N., German, V.I., Tubanov, Ts.A., Mialle, P., & Ulzibat, M. (2021). The Bystrinskoe earthquake in the Southern Baikal region (21 September 2020, $M_w=5.4$): Main parameters, precursors, and accompanying effects. *Russian Geology and Geophysics*, 62(5), 589-603. DOI: 10.2113/RGG20204296. EDN: GARUFH
- Sherman, S.I., & Levi, K.G. (1978). [Transform faults of the Baikal rift zone and seismicity of its flanks]. In *Tektonika i seismichnost' kontinental'nykh riftovykh zon* [Tectonics and seismicity of continental rift zones] (pp. 7-18). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Sherman, S.I., Cheremnykh, A.V., & Adamovich, A.N. (1996). [Fault-block divisibility of the lithosphere: patterns of structural organization and tectonic activity]. In *Geodinamika i evoliutsiia Zemli (Materialy k nauchnoi konferentsii RFFI)* [Geodynamics and Evolution of the Earth (Materials for the scientific conference of the Russian Foundation for Basic Research)] (pp. 74-76). Novosibirsk, Russia: SB RAS Publ., Research Center of the Institute of Geology and Geochemistry. (In Russ.).
- Sobolev, G.A. (2011). *Kontseptsiiia predskazuemosti zemletriasenii na osnove dinamiki seismichnosti pri triggerom vozdeistvii* [The concept of earthquake predictability based on seismicity dynamics under triggering]. Moscow, Russia: IEP RAS Publ., 56 p. (In Russ.). EDN: QKJYEB
- Solonenko, A.V., & Shteiman, E.A. (1994). [Self-similarity of the seismicity field of the Baikal rift]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 337(2), 235-257. (In Russ.).
- Solonenko, V.P. (Ed.). (1981). *Seismogeologiya i detal'noe seismicheskoe raionirovanie Pribaikalia* [Seismogeology and detailed seismic zoning of the Baikal region]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 168 p. (In Russ.).
- Taroni, M., & Carafa, M.M.C. (2023). Earthquake size distributions are slightly different in compression vs extension. *Communications Earth & Environment*, 4, 398. DOI: 10.1038/s43247-023-01059-y
- Tubanov, Ts.A., Sanzhieva, D.P.-D., Kobleva, E.A., Predein, P.A., & Tsydypova, L.R. (2022). Kudara earthquake of September 12, 2020 ($M_w=5.5$) on Lake Baikal: Results of instrumental and macroseismic observations. *Seismic Instruments*, 58(1), 86-98. DOI: 10.3103/S0747923922010108. EDN: ELCJRI
- Vermeulen, P., & Kijko, A. (2017). More statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation. *Acta Geophysica*, 65, 579-587. DOI: 10.1007/s11600-017-0048-3
- Voskresenskiy, S.S. (1968). *Geomorfologiya SSSR* [Geomorphology of the USSR]. Moscow, Russia: Vysshaya shkola Publ., 368 p. (In Russ.).

Information about authors

Sanzhieva Darima Purba-Dorzhiyeva, Engineer of the Buryat Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BuB GS RAS), Ulan-Ude, Russia; Junior Researcher of Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (GIN SB RAS), Ulan-Ude, Russia. E-mail: gindarima@mail.ru

Tubanov Tsyren Alekseevich, PhD, Director of the BuB GS RAS, Ulan-Ude, Russia; Head of the Laboratory of the GIN SB RAS, Ulan-Ude, Russia. E-mail: geos@ginst.ru

Kobleva Elena Anatolievna, PhD, Director of the of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BB GS RAS), Irkutsk, Russia. E-mail: ekobleva@crust.irk.ru