

II. Количественный анализ сейсмичности

Оценка уровня сейсмичности регионов России

¹В.А. Салтыков, ¹А.А. Коновалова, ²С.Г. Пойгина

¹КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск

Введение

При общей количественной оценке уровня сейсмичности какой-либо территории за какой-либо период часто используются такие параметры, как суммарная энергия произошедших землетрясений E и их число N , активность (A_{10} в частности) и наклон графика повторяемости (b – при использовании магнитудной шкалы или γ – при использовании энергетических классов). Однако при необходимости качественной оценки сейсмического режима (т.е. при необходимости заключения об аномально высоком или низком уровне сейсмичности, или при необходимости сравнения состояния сейсмичности в двух регионах) возникают определенные сложности и использование напрямую упомянутых параметров не дает ответа на данный вопрос. Например, одна и та же выделившаяся сейсмическая энергия может быть аномально высокой для одного региона и аномально низкой для другого. В данной работе приведены результаты использования статистической функции распределения энергии конкретного региона в качестве параметра, характеризующего уровень его сейсмичности.

Методика

Оценивается состояние сейсмичности региона в целом по эмпирической функции распределения, выделившейся за определенный временной интервал сейсмической энергии: $F(K)=P(\lg E \leq K)$, где E – суммарная сейсмическая энергия в Дж. Тогда, задавая пороговые значения F и зная выделившуюся энергию E , мы можем сделать заключение о повышенной (например, если $F > 0.9$) либо пониженной (например, если $F < 0.1$) активности региона. Отметим, что расчет широко известных статистических параметров, таких, как математическое ожидание и дисперсия, не может использоваться для энергии (или ее логарифма – энергетического класса), так как их распределение не относится к «красивым» распределениям, для которых аналогичный вывод можно было бы сделать, используя известные статистические критерии, без построения эмпирической функции распределения.

Обычно предъявляются достаточно высокие требования к используемому каталогу. Речь идет об его однородности и полноте. Следует отметить, что в первую очередь (если мы говорим об упоминаемых выше параметрах сейсмичности) чувствительными к качеству каталога являются: число землетрясений N ; наклон графика повторяемости γ ; активность A_{10} . Энергия E ведет себя гораздо более устойчиво, так как практически вся выделившаяся энергия определяется наиболее сильными землетрясениями. Это легко продемонстрировать на следующем примере: рассмотрим типичный случай, когда наклон графика повторяемости $\gamma=0.5$, и рассчитаем суммарную энергию землетрясений различного класса, а число таких землетрясений получим из закона Гутенберга–Рихтера [1]. Оказывается, что при использовании диапазона верхних энергетических классов в три единицы мы получаем оценку суммарной выделившейся энергии, составляющую около 98% от полной, а оценка соответствующего эквивалентного энергетического класса $K=\lg E$ отличается от истинной лишь на 0.01, что обычно пренебрежимо мало.

Таким образом, можно использовать данную методику даже в том случае, когда уровень надежной регистрации достаточно низок, но имеются предпосылки того, что сильнее-шие из произошедших событий все-таки регистрируются.

В развитие этого подхода ранее В.А. Салтыковым [2] была предложена шкала уровня сейсмичности «СОУС'09», определяющая уровень сейсмичности, исходя из величины функции распределения F . Шкала включает пять основных и три дополнительные градации.

Основные градации:

- экстремально низкий – $F \leq 0.005$,
- низкий – $0.005 < F \leq 0.025$,
- фоновый – $0.025 < F < 0.975$,
- высокий – $0.975 \leq F < 0.995$,
- экстремально высокий – $F \geq 0.995$.

Фоновый уровень может быть разбит на три дополнительные градации:

- фоновый пониженный – $0.025 < F \leq 0.15$,
- фоновый средний – $0.15 < F < 0.85$,
- фоновый повышенный – $0.85 \leq F < 0.975$.

Используемые каталоги землетрясений

Каталог землетрясений, используемый в расчетах, собран из перечисленных ниже каталогов:

- региональные каталоги землетрясений с 1962 по 1991 г. – ежегодные сборники «Землетрясения в СССР» (электронная версия);
- региональные каталоги землетрясений за 1992–1998 гг. – ежегодные сборники «Землетрясения Северной Евразии» (электронная версия);
- региональные каталоги землетрясений за 1999–2019 гг. – ежегодные сборники «Землетрясения Северной Евразии» (компакт-диски, прилагаемые к сборникам научных трудов);
- сводные каталоги землетрясений за 2003–2022 гг. – база данных «Землетрясения России» [3];
- сводный каталог землетрясений 2022 г. – настоящий ежегодник [4].

В различных регионах используются разные энергетические классификации землетрясений [5–8].

Если энергетический класс не был представлен в региональном каталоге, то он вычислялся из расчетной магнитуды M [9] по корреляционным зависимостям С.Л. Соловьёва $K_C = 2 \cdot M + 1.2$ [7] (для Сахалина и Курильских островов) или Т.Г. Раутиан $K_P = 1.8 \cdot M + 4$ [5, 6] – для остальных регионов (кроме Камчатки).

Разделение на регионы

Территория России, в соответствии с принятой в ФИЦ ЕГС РАН регионализацией (см. [10] и Приложение), разделена для исследований на 12 регионов (рис. II.1).

Функции распределения годовой сейсмической энергии для отдельных регионов

Функция распределения сейсмической энергии, выделившейся в течение одного года для вышеуказанных регионов, и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии показаны на рис. II.2–II.11. На этих рисунках (а, б, в) кружками отмечено значение функции распределения и сейсмической энергии в 2022 году.

Для визуализации временного хода уровня сейсмичности в широком диапазоне временных окон построена СОУСграмма, где цвет точки соответствует шкале «СОУС'09», ее ордината – ширина скользящего временного окна, а абсцисса – время правого края временного окна.

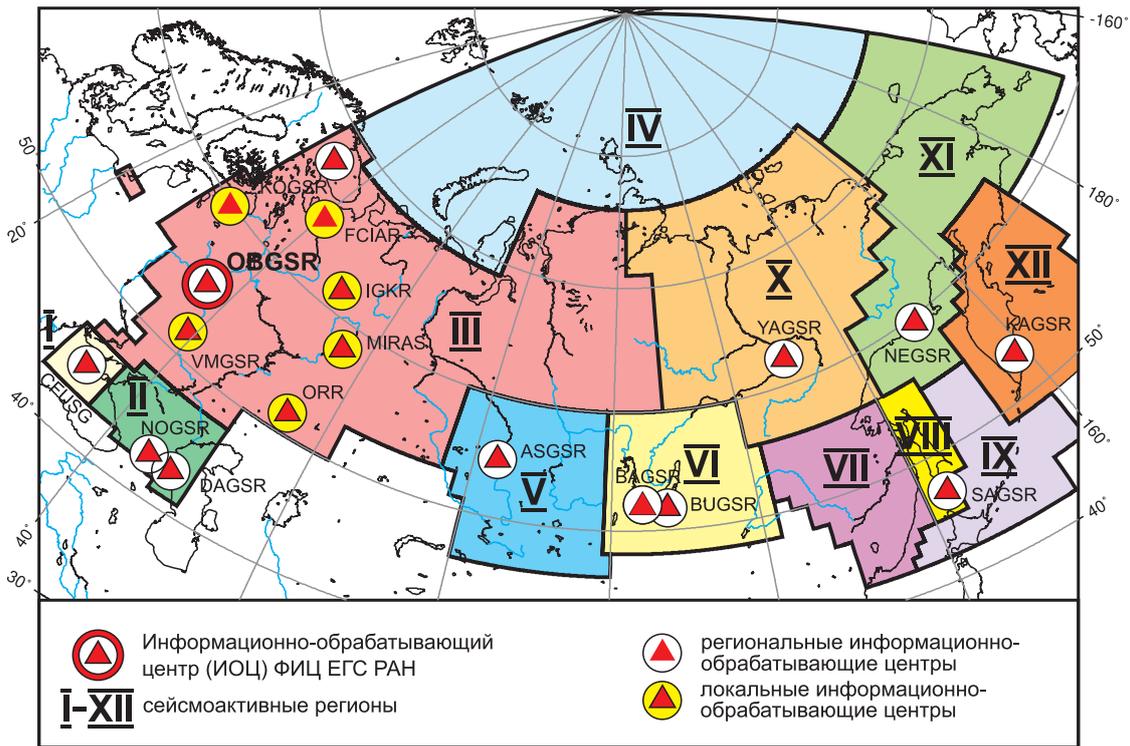


Рис. II.1. Границы сейсмоактивных регионов

I. Крымско-Черноморский регион (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.5).

На время формирования настоящего сборника получение оценок сейсмичности Крымско-Черноморского региона затруднительно по техническим причинам.

II. Северный Кавказ (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.8).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 3.3$ на Северном Кавказе составила $2.64 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2022 гг. (рис. II.2). Для 2022 г. $F=0.75 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Повышение уровня сейсмичности на коротких временных интервалах (экстремально высокий в окне 7 сут. и высокий в окнах от 8 до 32 сут.) связывается с землетрясением 08.12.2022 г. с $M=5.7$ на территории Дагестана. Отмечается в течение 4 мес. снижение до фонового пониженного или низкого уровня сейсмичности региона в целом (в различных временных окнах), предворяющее это землетрясение.

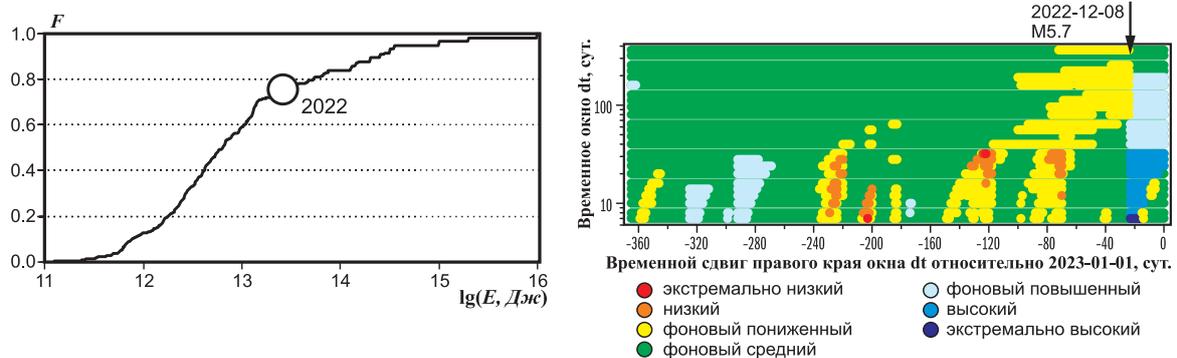


Рис. II.2 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Северный Кавказ в 2022 г. (справа)

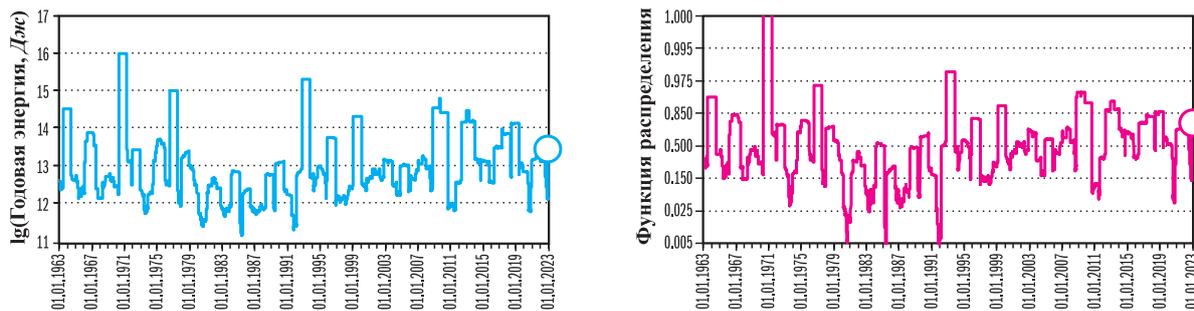


Рис. II.2 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Северный Кавказ в 2022 г.

III. *Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь* (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.11).

Для данного региона оценки функции распределения не рассчитывались в силу недостаточной статистики и неоднородности каталога.

IV. *Арктика* (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.14).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 4.1$ в Арктике составила $6.5 \cdot 10^{11}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1965–2022 гг. (рис. II.3). Для 2022 г. $F = 0.21 \pm 0.05$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС’09».

Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС’09», в 2022 г. не выявлено.

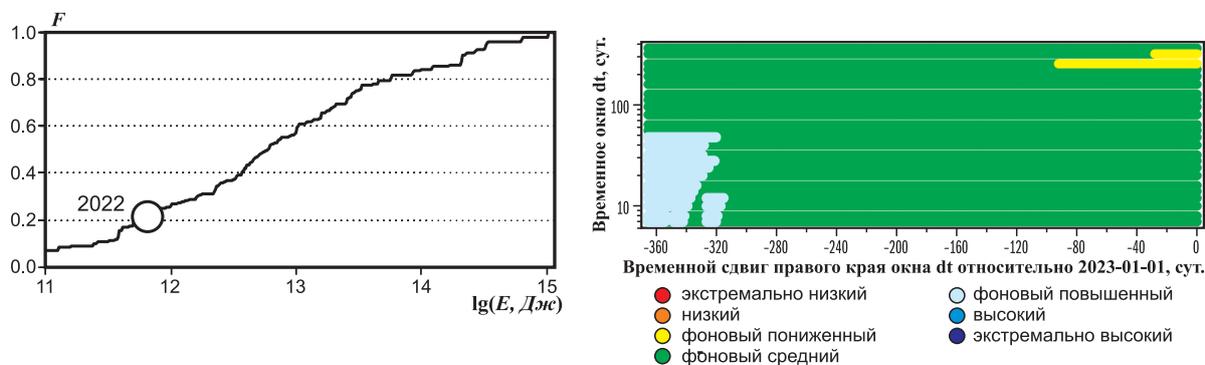


Рис. II.3 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Арктика в 2022 г. (справа)

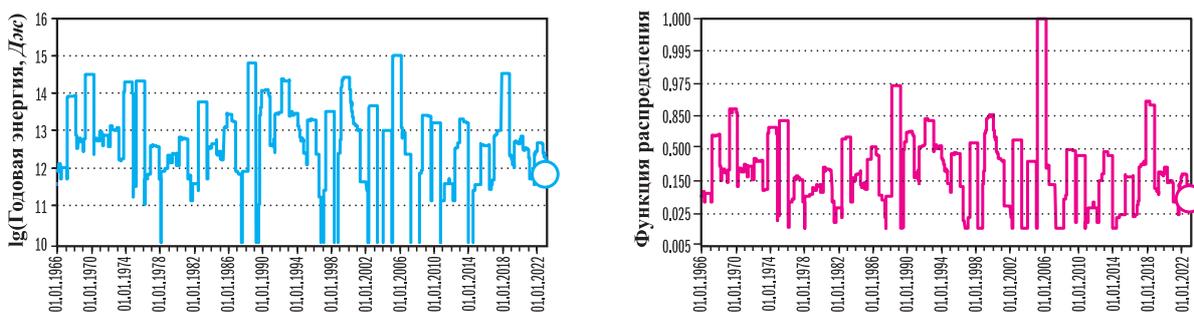


Рис. II.3 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Арктика в 2022 г.

V. Алтай и Саяны (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.17).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 3.3$ в регионе Алтай и Саяны составила $1.15 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2022 гг. (рис. II.4). Для 2022 г. $F=0.27 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», в 2022 г. не выявлено.

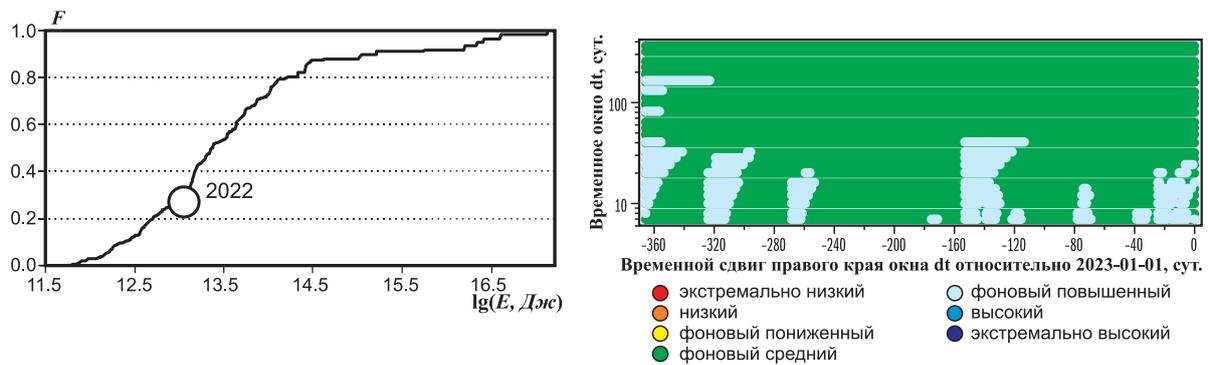


Рис. II.4 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Алтай и Саяны в 2022 г. (справа)

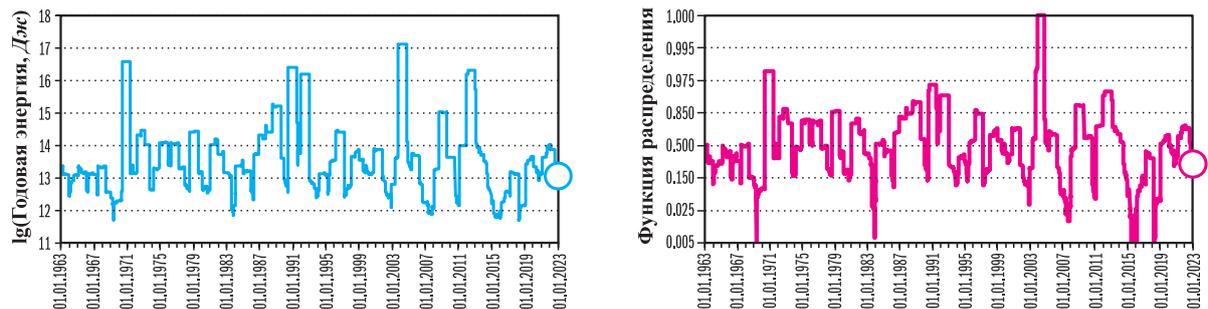


Рис. II.4 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Алтай и Саяны в 2022 г.

VI. Прибайкалье и Забайкалье (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.20).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 4.0$ в регионе Прибайкалье и Забайкалье составила $2.25 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2022 гг. (рис. II.5). Для 2022 г. $F=0.28 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

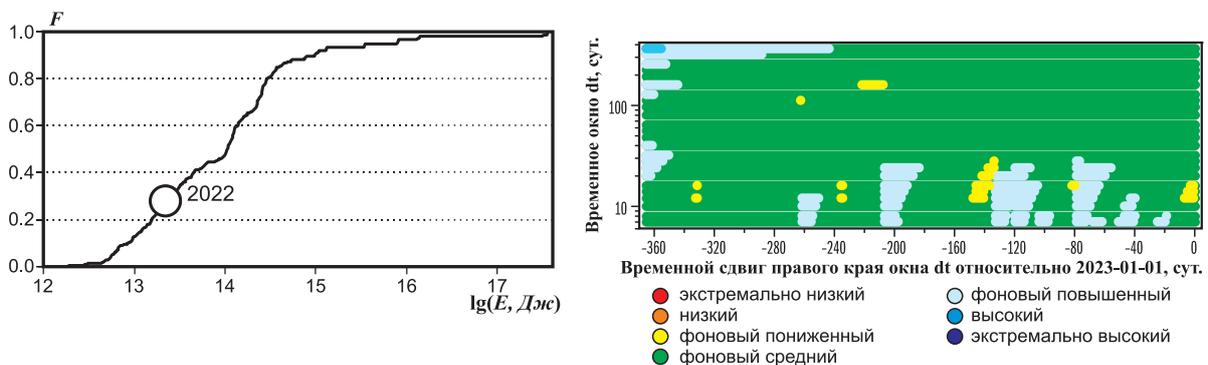


Рис. II.5 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Прибайкалье и Забайкалье в 2022 г. (справа)

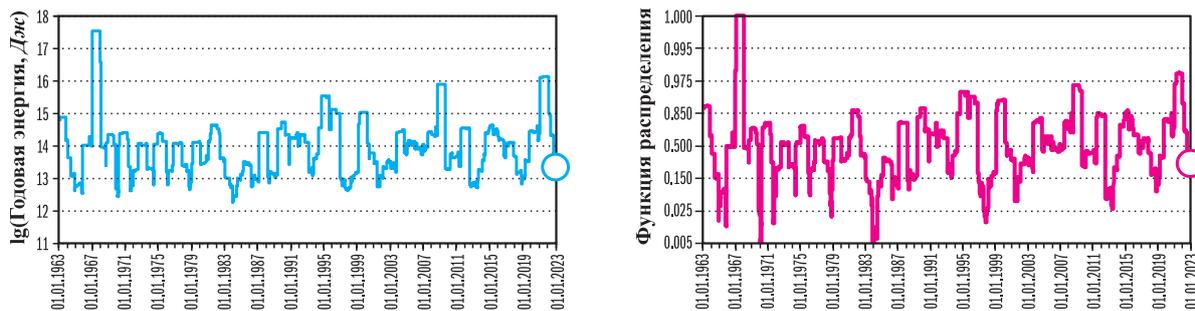


Рис. 11.5 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Прибайкалье и Забайкалье в 2022 г.

Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС’09», в 2022 г. не выявлено (за исключением первой декады января в окне 365 сут., что связывается с Хубсугульским землетрясением 11.01.2021 г. с $M=6.7$).

VII. Приамурье и Приморье (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. 1.23).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.7$ в регионе Приамурье и Приморье составила $4.97 \cdot 10^{12}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1974–2022 гг. (рис. 11.6). Для 2022 г. $F=0.23 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС’09».

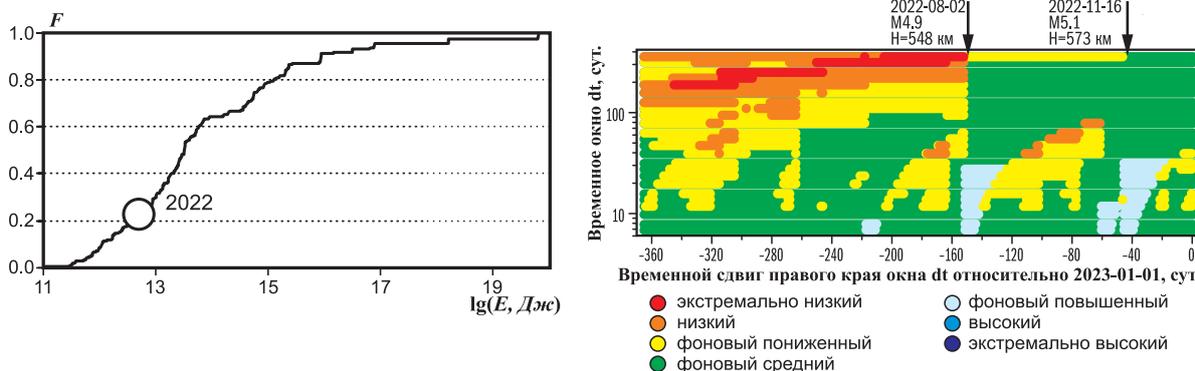


Рис. 11.6 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграма для региона Приамурье и Приморье в 2022 г. (справа)

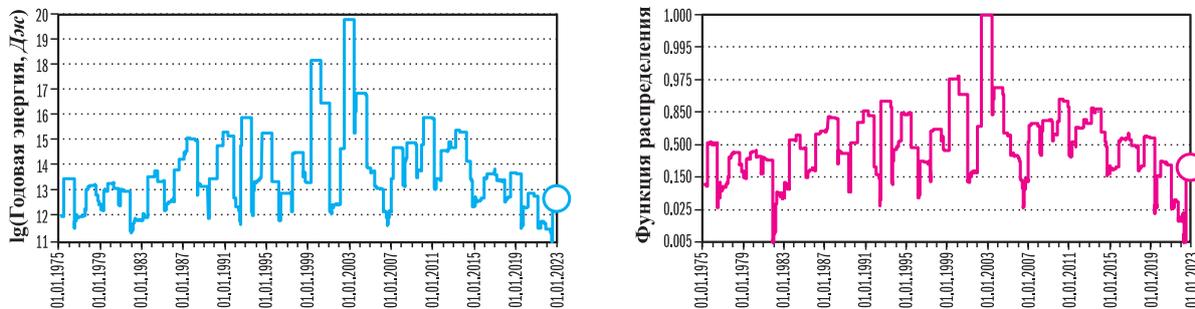


Рис. 11.6 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Приамурье и Приморье в 2022 г.

Особенностью сейсмичности в 2022 г. является продолжение отмеченного ранее в целом для 2021 г. [11] низкого уровня сейсмичности по шкале «СОУС’09» до возникновения глубокого землетрясения 02.08.2022 г. с $M=4.9$. Причем между этим землетрясением

и близким по энергии землетрясением 16.11.2022 г. с $M=5.1$ также наблюдается снижение уровня сейсмичности до низкого.

VIII. Сахалин (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.23).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.5$ в регионе Сахалин составила $7.74 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2022 гг. (рис. II.7). Для 2022 г. $F=0.90 \pm 0.04$, что соответствует фоновому повышенному уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2022 г. в регионе произошло около десяти землетрясений с $M \geq 4.2$, определившие фоновый повышенный уровень сейсмичности региона в целом за год и, как минимум, высокий уровень на коротких временных интервалах. В первую очередь это землетрясения 08.02.2022 г. с $M=5.0$ и 02.07.2022 г. с $M=6.0$, которые привели к экстремально высокому уровню сейсмичности во временных окнах до 8 и до 16 сут. и, соответственно, к высокому уровню во временных окнах до 48 и до 80 суток.

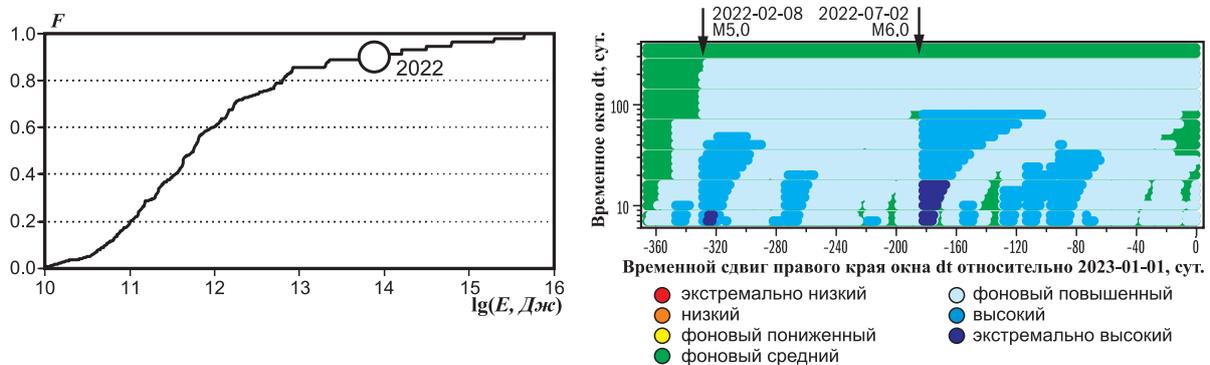


Рис. II.7 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Сахалин в 2022 г. (справа)

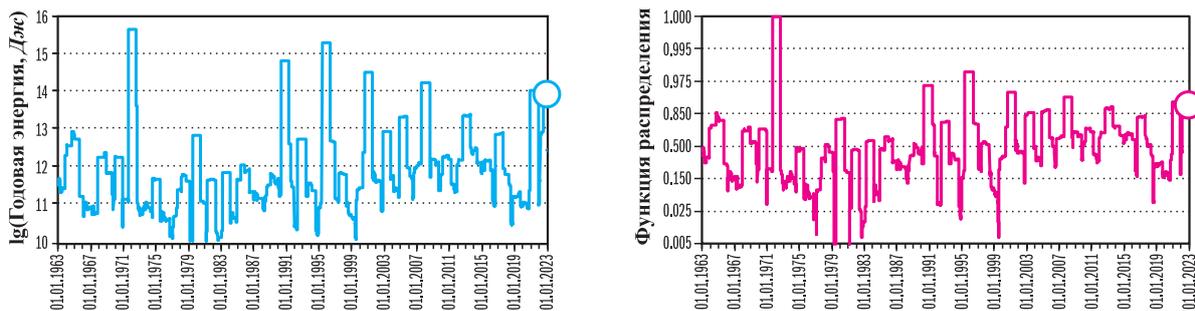


Рис. II.7 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Сахалин в 2022 г.

IX. Курило-Охотский регион (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.23).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 4.7$ в Курило-Охотском регионе составила $3.91 \cdot 10^{14}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2022 гг. (рис. II.8). Для 2022 г. $F=0.41 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», в 2022 г. не выявлено.

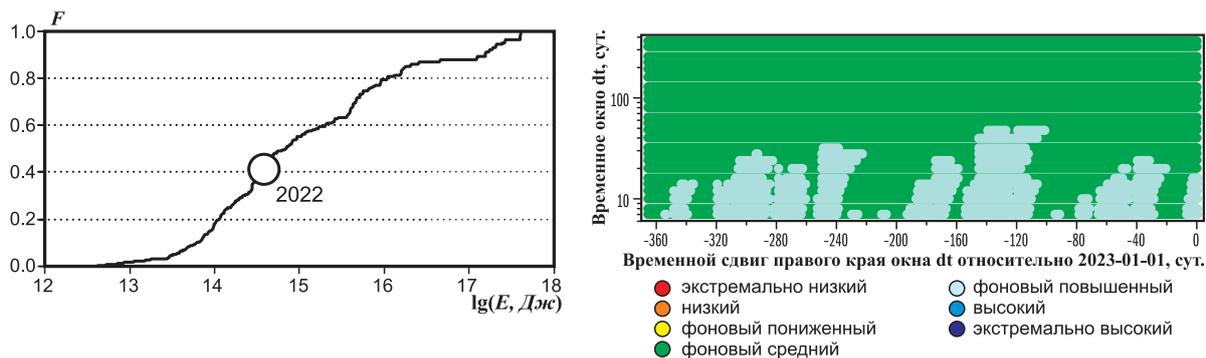


Рис. 2.8 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для Курило-Охотского региона в 2022 г. (справа)

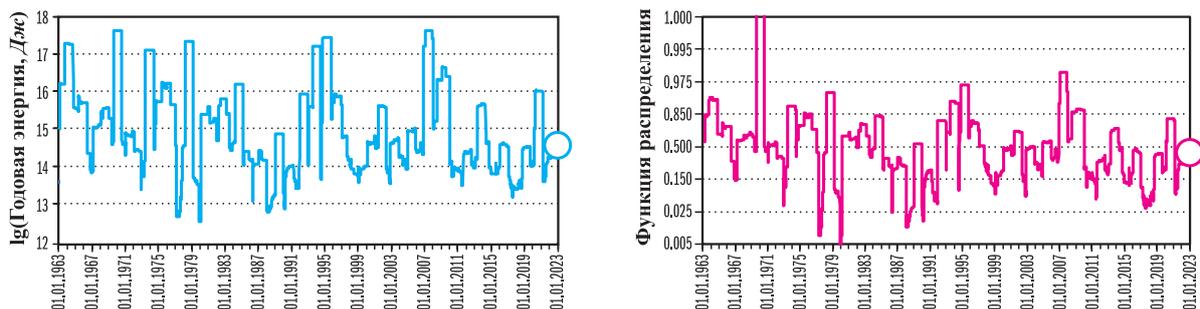


Рис. 2.8 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для Курило-Охотского региона в 2022 г.

Х. Якутия (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. 1.28).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.8$ в Якутском регионе составила $7.08 \cdot 10^{11}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1968–2022 гг. (рис. 2.9).

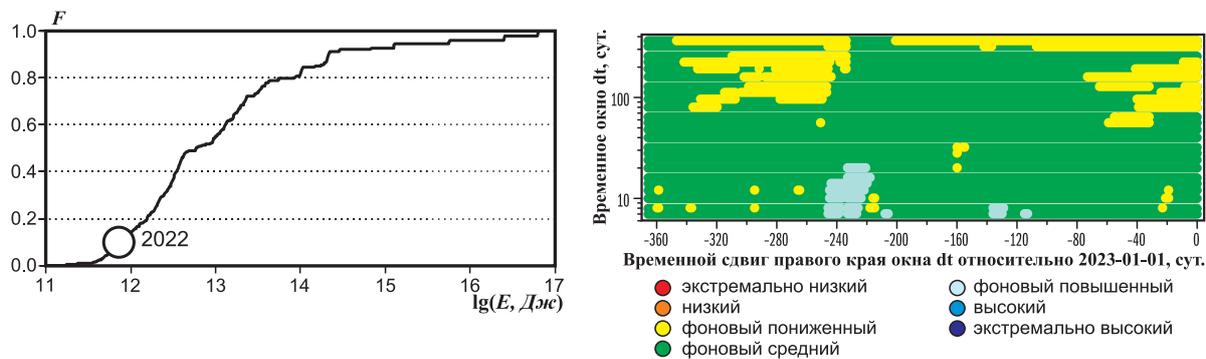


Рис. 2.9 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для Якутского региона в 2022 г. (справа)

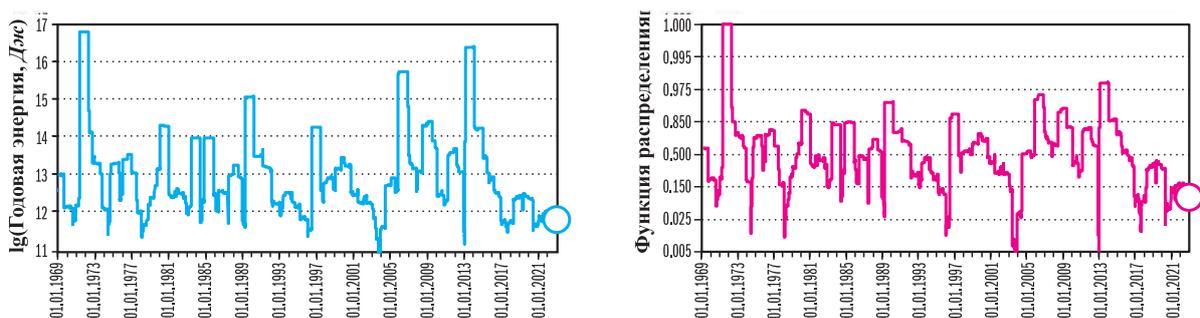


Рис. 2.9 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для Якутского региона в 2022 г.

Для 2022 г. $F=0.10\pm 0.04$, что соответствует фоновому пониженному уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09». Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», в 2022 г. не выявлено.

XI. Северо-Восток России и Чукотка (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.31).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M\geq 2.8$ в регионе Северо-Восток России и Чукотка составила $3.36\cdot 10^{11}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1968–2022 гг. (рис. II.10). Для 2022 г. $F=0.11\pm 0.04$, что соответствует фоновому пониженному уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», в 2022 г. не выявлено.

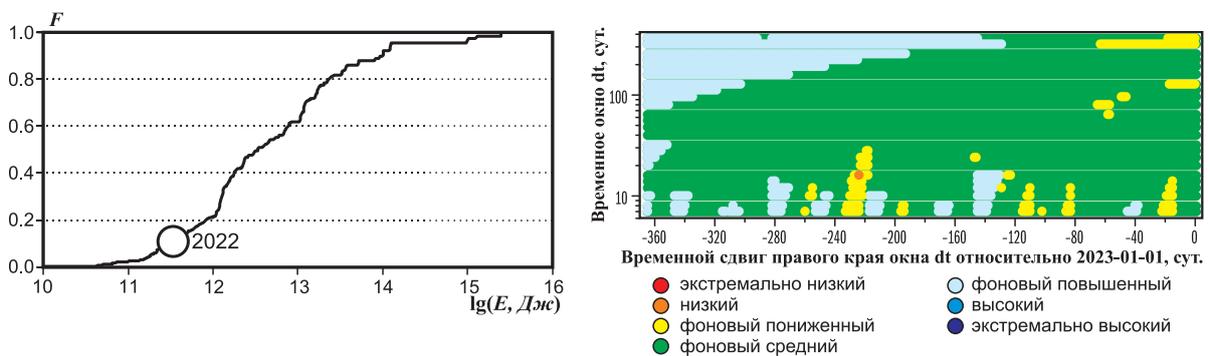


Рис. II.10 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Северо-Восток России и Чукотка в 2022 г. (справа)

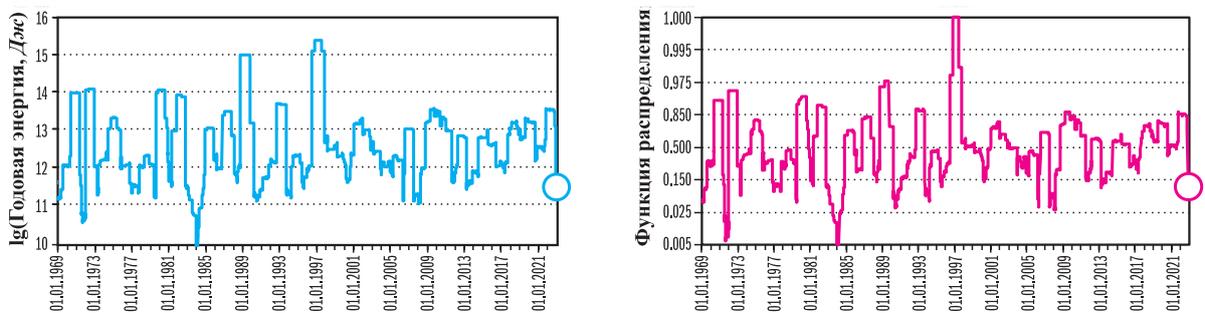


Рис. II.10 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Северо-Восток России и Чукотка в 2022 г.

XII. Камчатка и Командорские острова (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2022 г. см. на рис. I.34).

В 2022 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Камчатском регионе составила $1.64\cdot 10^{14}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2022 гг. (рис. II.11). Для 2022 г. $F=0.18\pm 0.05$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

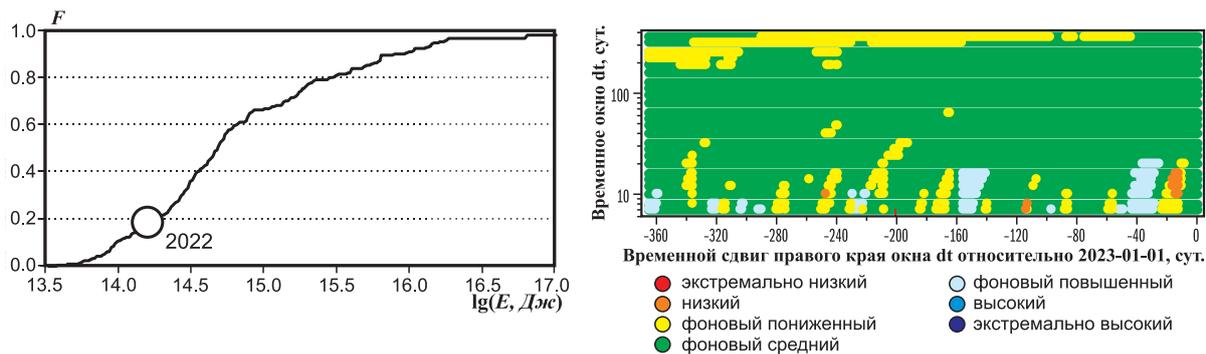


Рис. П.11 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Камчатки и Командорских островов в 2022 г. (справа)

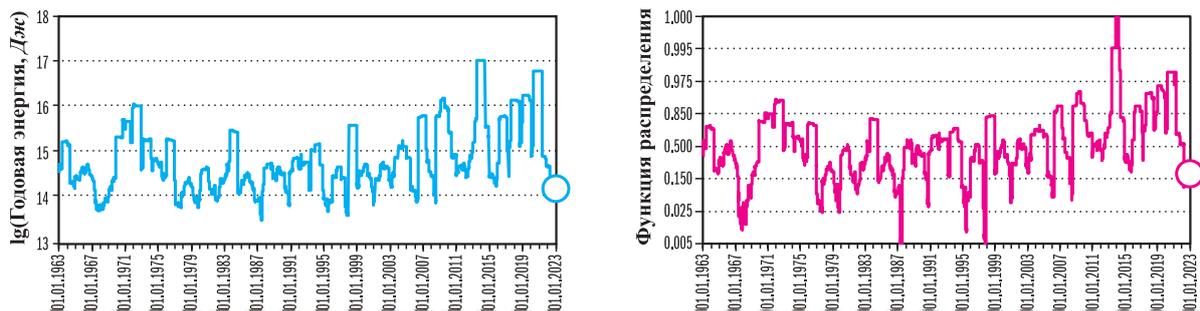


Рис. П.11 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Камчатки и Командорских островов в 2022 г.

Заключение

Оценки уровня сейсмичности в 2022 г. в регионах России в соответствии со шкалой «СОУС’09» показаны в табл. П.1.

Таблица П.1. Значения функции распределения сейсмической энергии и категории уровня сейсмичности согласно шкале «СОУС’09» для 2022 г.

Регион	F	Уровень сейсмичности
Северный Кавказ	0.75 ± 0.06	фоновый средний
Арктика	0.21 ± 0.05	фоновый средний
Алтай и Саяны	0.27 ± 0.06	фоновый средний
Прибайкалье и Забайкалье	0.28 ± 0.06	фоновый средний
Приамурье и Приморье	0.23 ± 0.06	фоновый средний
Сахалин	0.90 ± 0.04	фоновый повышенный
Курило-Охотский регион	0.41 ± 0.06	фоновый средний
Якутия	0.10 ± 0.04	фоновый пониженный
Северо-Восток России и Чукотка	0.11 ± 0.04	фоновый пониженный
Камчатка и Командорские острова	0.18 ± 0.05	фоновый средний

Таким образом, в основном сейсмичность регионов в 2022 г., как и в предыдущем году [11], соответствовала фоновому среднему уровню. Исключение составили три региона – уровень сейсмичности оценивается как фоновый пониженный для Якутии и Северо-Востока России (включая Чукотку) и фоновый повышенный – для Сахалина. Отмечается, что ни для одного региона 2022 г. не оказался сейсмически аномальным: для временного окна 365 сут. нигде не наблюдался низкий или высокий уровень сейсмичности по шкале «СОУС’09».

Литература

1. Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // *Annals of Geophysics*. – 1956. – V. 9, N 1. – P. 1–15.
2. 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: ОНТІХN
3. База данных «Землетрясения России» [сайт]. – Дата обновления 25.01.2024. – URL: <http://eqru.gsras.ru/>.
4. 2022-ER_App28_Total-catalog.xlsx [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2022 году» // *Землетрясения России* [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024]. Системные требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_22.html, свободный.
5. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // *Методы детального изучения сейсмичности*. Глава 4. Труды ИФЗ АН СССР / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – № 9 (176). – С. 75–113.
6. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // *Экспериментальная сейсмика*. Труды ИФЗ АН СССР. – М.: Наука, 1964. – № 32 (199). – С. 88–93.
7. Соловьёв С.Л., Соловьёва О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // *Известия АН СССР, сер. «Физика Земли»*. – 1967. – № 2. – С. 13–22.
8. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
9. Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде // *Землетрясения России в 2022 году*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 145–148.
10. Маловичко А.А., Пойгина С.Г. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Общие сведения о сейсмичности России // *Землетрясения России в 2022 году*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 11–18.
11. Салтыков В.А., Коновалова А.А., Кравченко Н.М., Пойгина С.Г. Количественный анализ сейсмичности. Оценка уровня сейсмической активности регионов России // *Землетрясения России в 2021 году*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 88–94. – EDN: GXJNPQ