

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 в конкретном регионе 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 о его однородности и полноте. Следует отметить, что в первую очередь (если мы говорим об упоминаемых выше параметрах сейсмичности) чувствительными к качеству каталога являются: 1 – число землетрясений N ; 2 – наклон графика повторяемости γ ; 3 – 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, мы можем использовать данную методику даже в том случае, когда

уровень надежной регистрации достаточно низок, но имеются предпосылки того, что сильнейшие 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 2023 г. – настоящий ежегодник [4].

В различных регионах используются разные энергетические классификации землетрясений [5–9].

Если энергетический класс не был представлен в региональном каталоге, то он вычислялся из расчетной магнитуды M [10] по корреляционным зависимостям С.Л. Соловьёва $K_C = 2 \cdot M + 1.2$ [7] (для Сахалина и Курильских островов), Б.Г. Пустовитенко $K_P = 1.8 \cdot M + 4.2$ [9] (для Крымско-Черноморского региона) 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. [11] 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.12. На этих рисунках кружками отмечено значение функции распределения и сейсмической энергии в 2023 году.

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

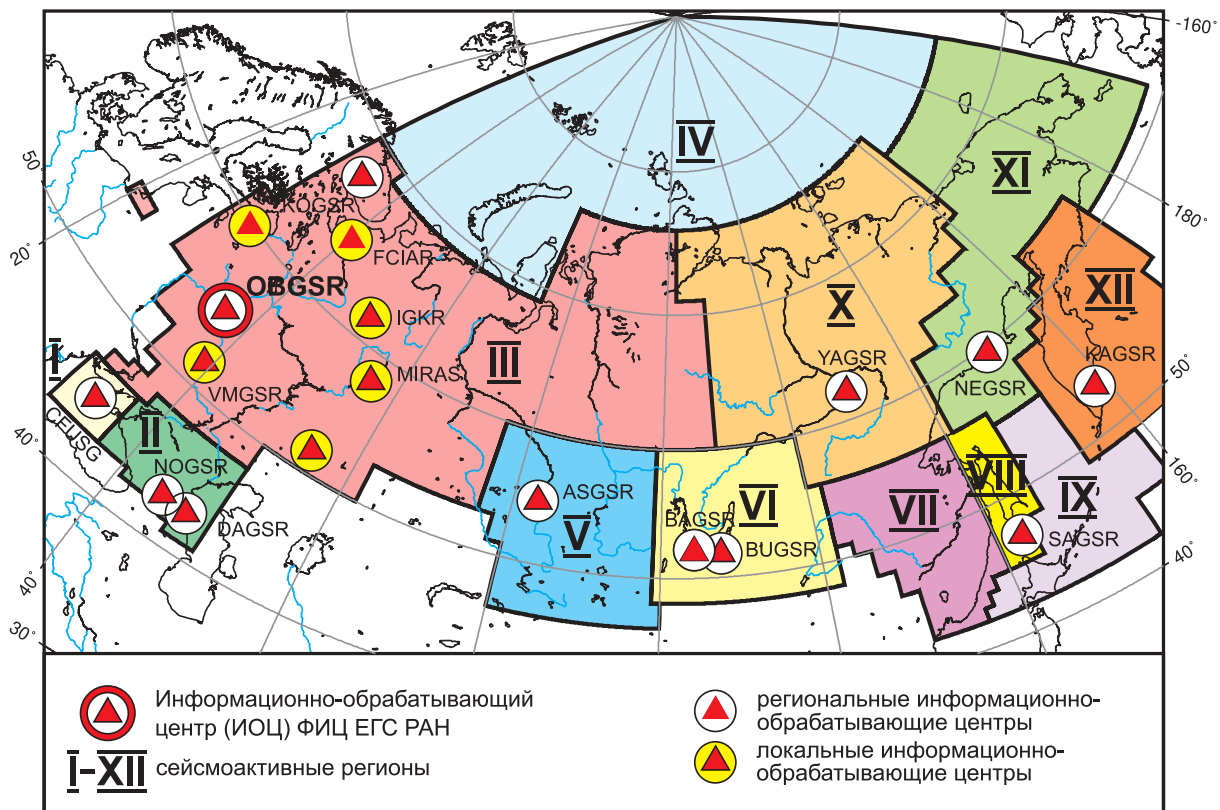


Рис. II.1. Границы сейсмоактивных регионов

I. Крымско-Черноморский регион (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.5).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 1.7$ в Крымско-Черноморском регионе составила $3.30 \cdot 10^{12}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.2). Для 2023 г. $F=0.98 \pm 0.02$, что соответствует высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. в регионе произошли два землетрясения, приведшие к выходу сейсмичности за пределы среднего уровня: первое – 27.02.2023 г. с $M=3.8$ отразилось в высоком уровне сейсмичности во временных окнах 7–24 сут.; второе – 22.06.2023 г. с $M=4.6$ (одно из двух сильнейших землетрясений региона за время детальных сейсмологических наблюдений – с 1962 г.) определило высокий уровень сейсмичности в целом для региона в 2023 г., при этом во временных окнах шириной до четырех месяцев уровень сейсмичности оценивается как экстремально высокий.

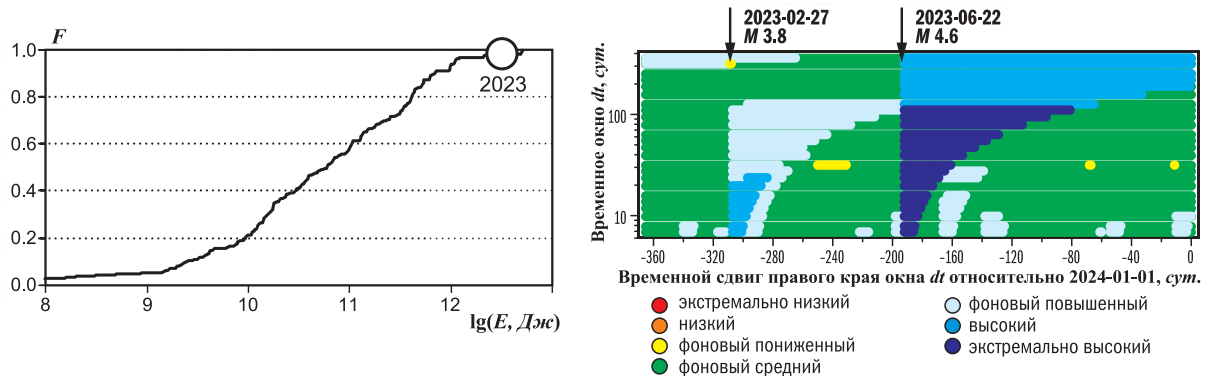


Рис. II.2 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для Крымско-Черноморского региона в 2023 г. (справа)

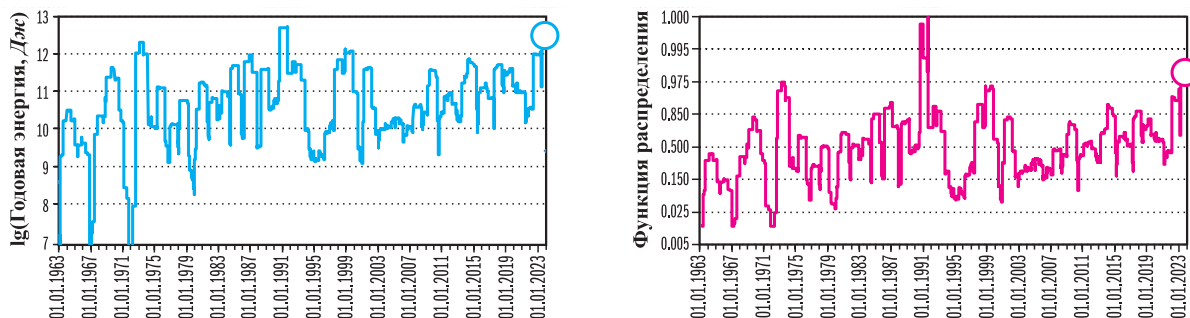


Рис. II.2 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для Крымско-Черноморского региона в 2023 г.

II. Северный Кавказ (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.8).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 3.3$ на Северном Кавказе составила $7.0 \cdot 10^{12}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.3). Для 2023 г. $F = 0.52 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Повышение уровня сейсмичности на коротких временных интервалах (высокий в окнах от 7 до 16 сут.) связывается с землетрясением 03.07.2023 г. с $M = 5.3$ в акватории Каспийского моря. Отмечается предвещающее это землетрясение снижение уровня сейсмичности региона до фонового пониженного в течение семи месяцев (временное окно 192 сут.).

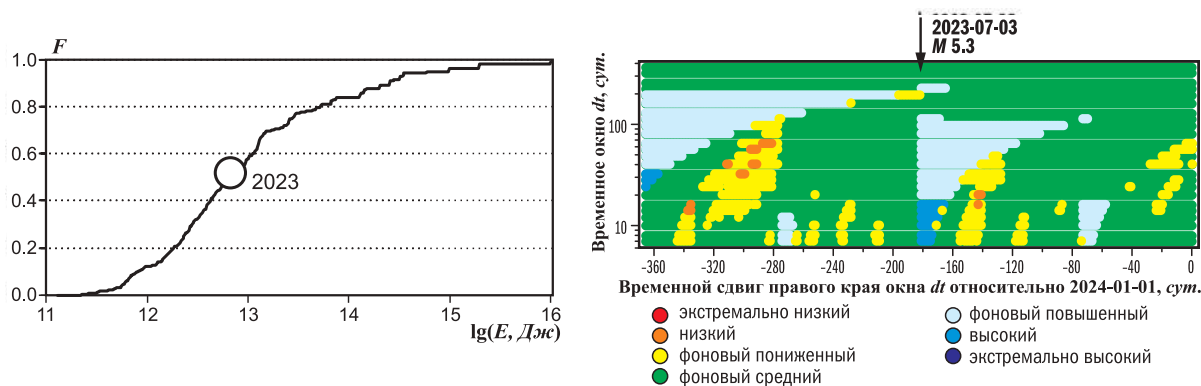


Рис. II.3 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Северный Кавказ в 2023 г. (справа)

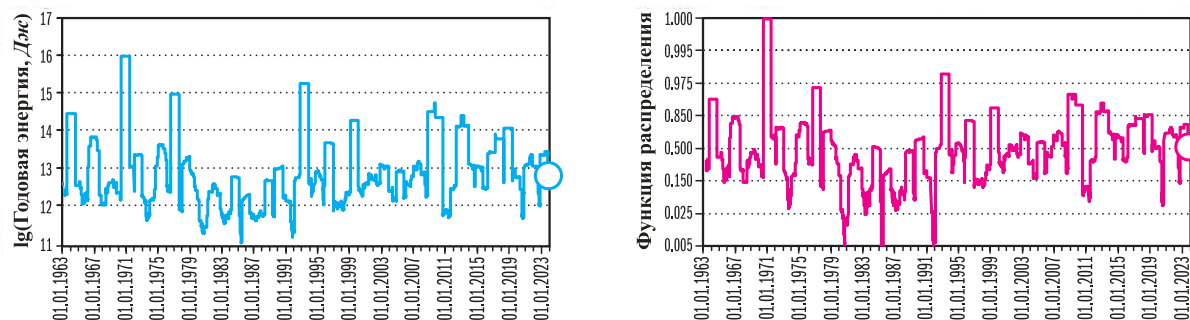


Рис. II.3 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Северный Кавказ в 2023 г.

III. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 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 2023 г. см. на рис. I.14).

В 2023 г. суммарная энергия всех зарегистрированных землетрясений в Арктике составила $2.1 \cdot 10^{11}$ Дж. Однако представительных землетрясений (уровень представительности каталога Арктики в целом в 1965–2023 гг. равен $M=4.1$) в 2023 г. не зарегистрировано. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1965–2023 гг. (рис. II.4). Для 2023 г. $F=0.07 \pm 0.03$, что соответствует фоновому пониженному уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

Временных интервалов, соответствующих высокому или низкому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», в 2023 г. не выявлено.

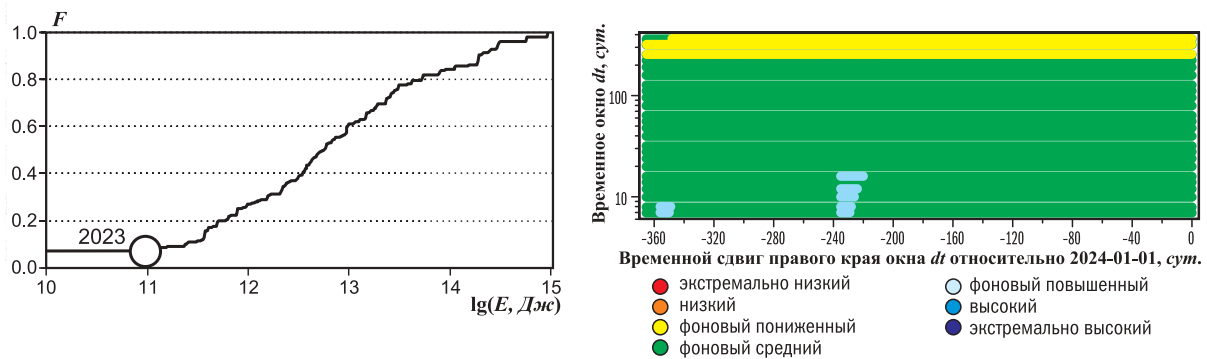


Рис. II.4 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Арктика в 2023 г. (справа)

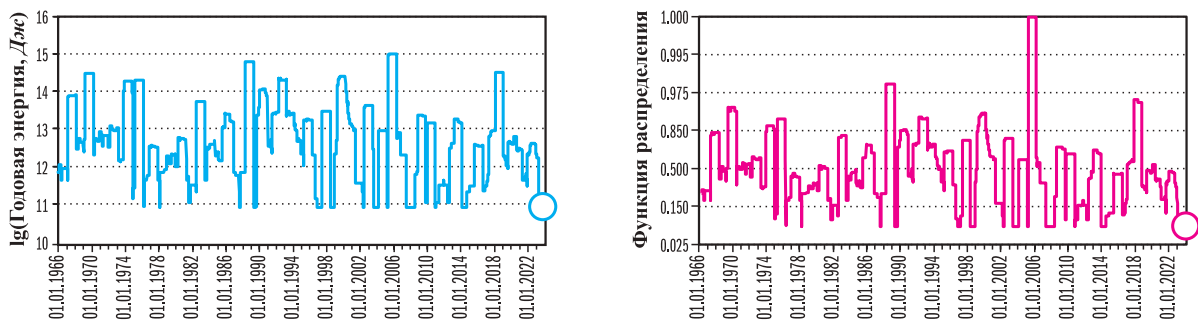


Рис. II.4 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Арктика в 2023 г.

V. Алтай и Саяны (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.17).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 3.3$ в регионе Алтай и Саяны составила $4.0 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.5). Для 2023 г. $F=0.59 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. выявлены три временных интервала в диапазоне 1–2 недели, соответствующие высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», связанные с землетрясениями 22.02.2023 г. с $M=5.4$ (Восточный Саян), 04.03.2023 г. с $M=5.6$ (Сангиленское нагорье), 06.10.2023 г. с $M=5.3$ (там же).

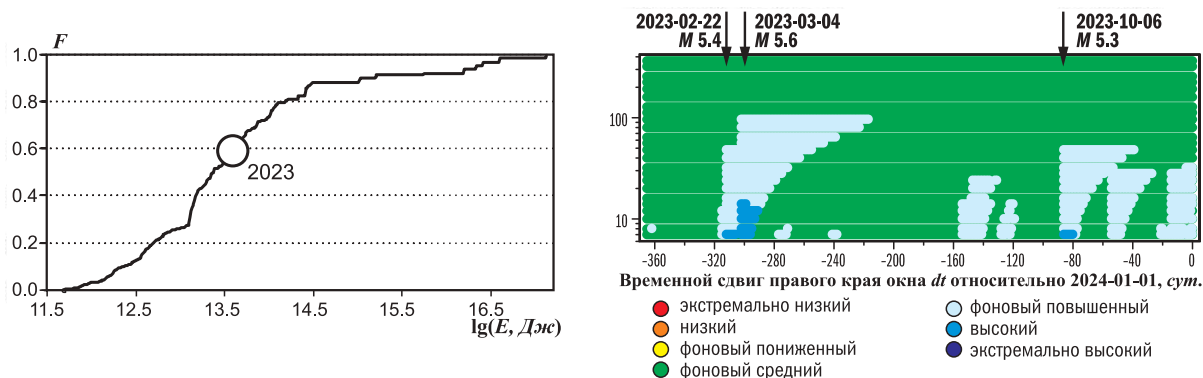


Рис. II.5 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Алтай и Саяны в 2023 г. (справа)

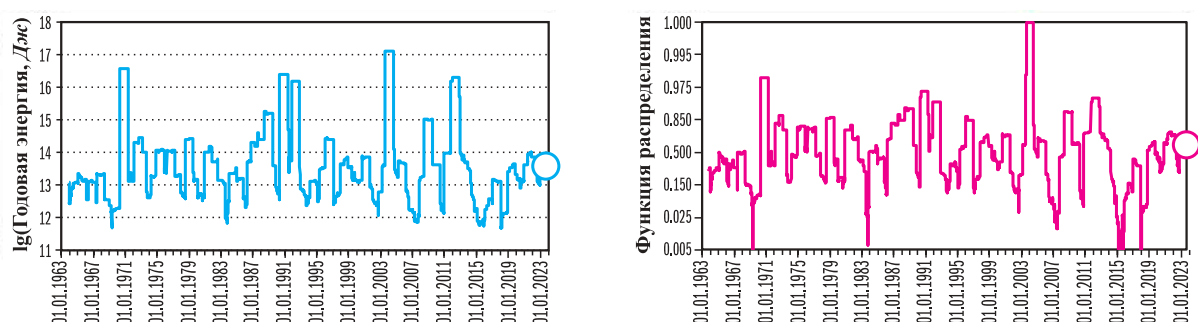


Рис. II.5 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Алтай и Саяны в 2023 г.

VI. Прибайкалье и Забайкалье (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.20).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 4.0$ в регионе Прибайкалье и Забайкалье составила $1.87 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.6). Для 2023 г. $F=0.24 \pm 0.05$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. выявлены два временных интервала в диапазоне 1–4 недели, соответствующие высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», связанные с землетрясениями 14.01.2023 г. с $M=5.3$ и 27.12.2023 г. с $M=5.3$.

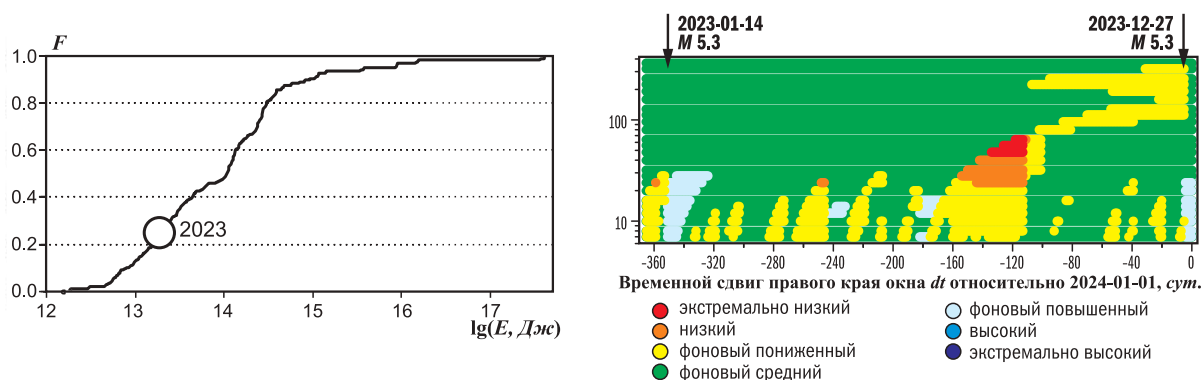


Рис. II.6 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Прибайкалье и Забайкалье в 2023 г. (справа)

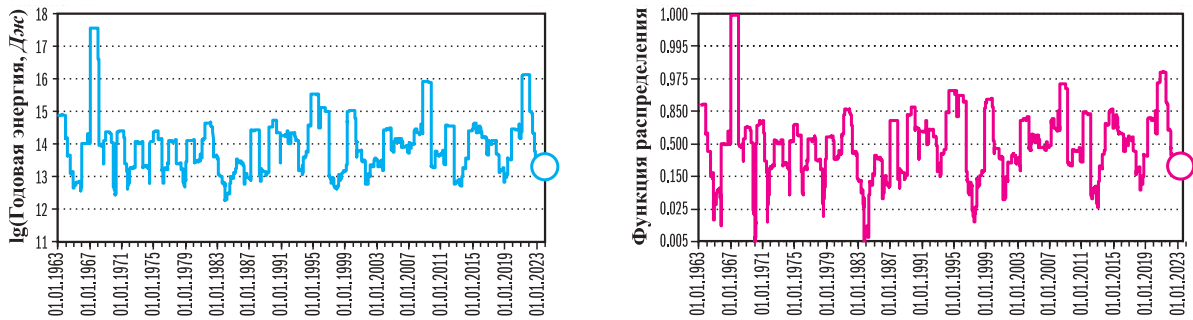


Рис. II.6 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Прибайкалье и Забайкалье в 2023 г.

Примечательным является экстремально низкий уровень сейсмичности региона в целом в течение июля–августа (временные окна 48–64 сут.) и низкий уровень в то же время во временных окнах 24–40 сут.

VII. Приамурье и Приморье (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.23).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.7$ в регионе Приамурье и Приморье составила $3.34 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1974–2023 гг. (рис. II.7). Для 2023 г. $F = 0.55 \pm 0.07$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

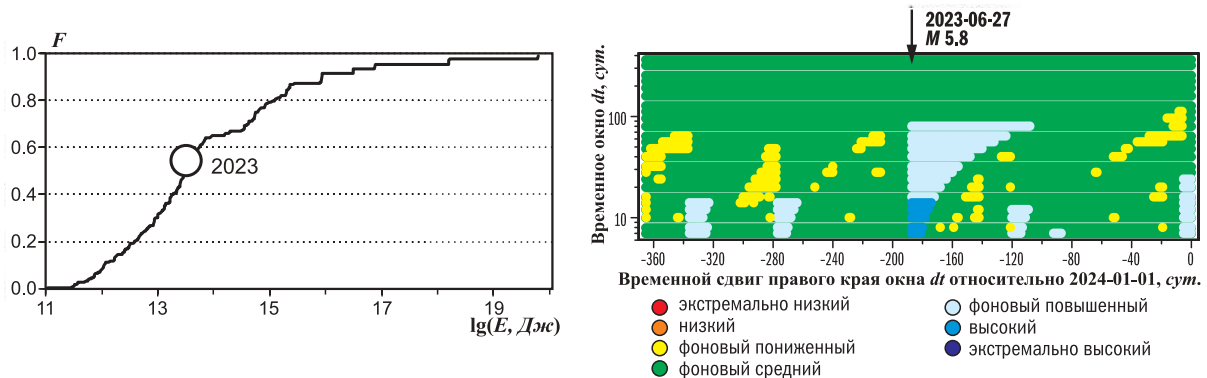


Рис. II.7 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Приамурье и Приморье в 2023 г. (справа)

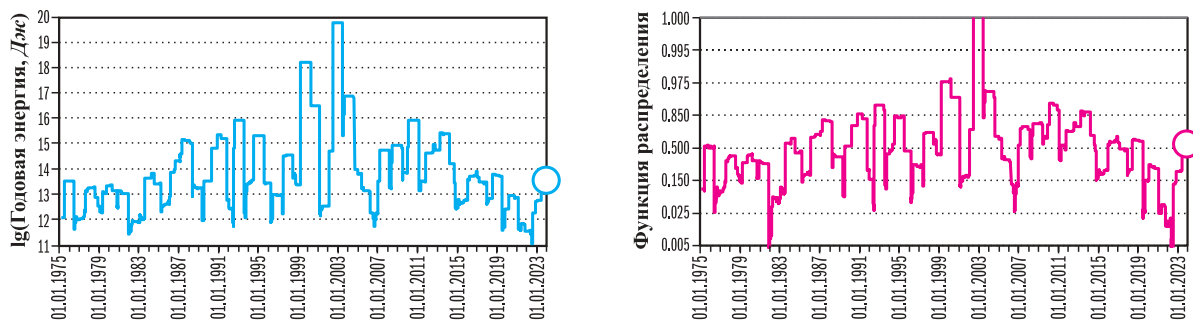


Рис. II.7 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Приамурье и Приморье в 2023 г.

В 2023 г. выявлен один временной интервал в диапазоне окон 1–2 недели, соответствующий высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», связанный с глубоким ($h=442$ км) землетрясением 27.06.2023 г. с $M=5.8$.

VIII. Сахалин (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.23).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.7$ в регионе Сахалин составила $2.78 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.8). Для 2023 г. $F=0.88 \pm 0.04$, что соответствует фоновому повышенному уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. в регионе произошли три землетрясения с $M \geq 4.4$, определившие фоновый повышенный уровень сейсмичности региона в целом за год и, как минимум, высокий уровень на коротких временных интервалах. В первую очередь это – землетрясение 23.06.2023 г. с $M=5.7$ (Юго-Восточный район), которое привело к экстремально высокому уровню сейсмичности во временных окнах до 7 и до 12 сут. и к высокому уровню во временных окнах до 64 сут.

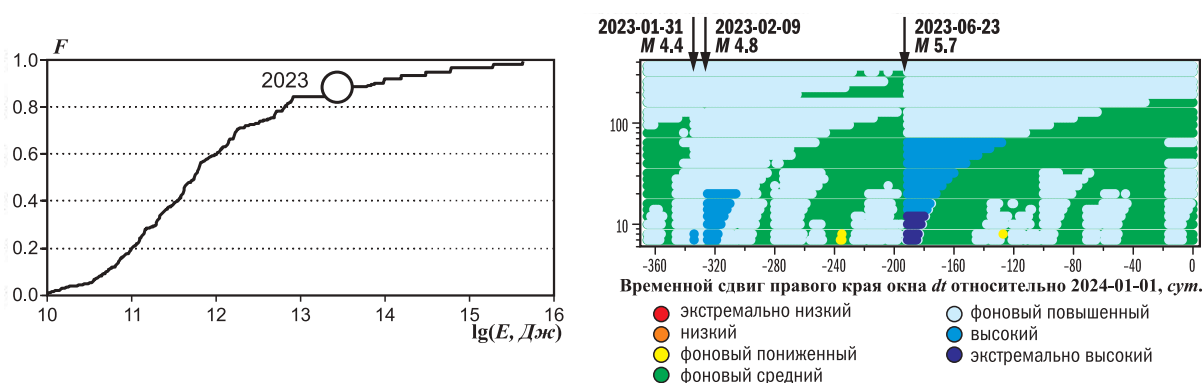


Рис. II.8 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Сахалин в 2023 г. (справа)

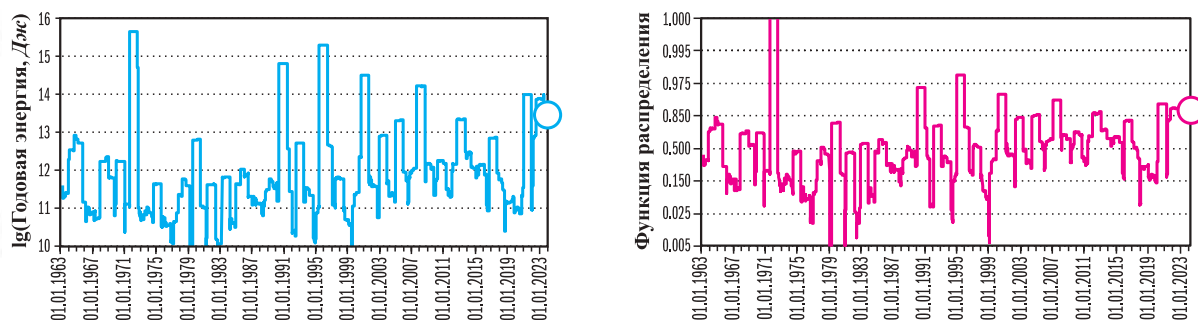


Рис. II.8 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Сахалин в 2023 г.

IX. Курило-Охотский регион (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.23).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 4.1$ в Курило-Охотском регионе составила $7.01 \cdot 10^{14}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.9). Для 2023 г. $F=0.51 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. выявлен один временной интервал в диапазоне окон 7–8 сут., соответствующий высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», связанный с землетрясением 28.12.2023 г. с $M=6.4$ (Северо-Итурупский район).

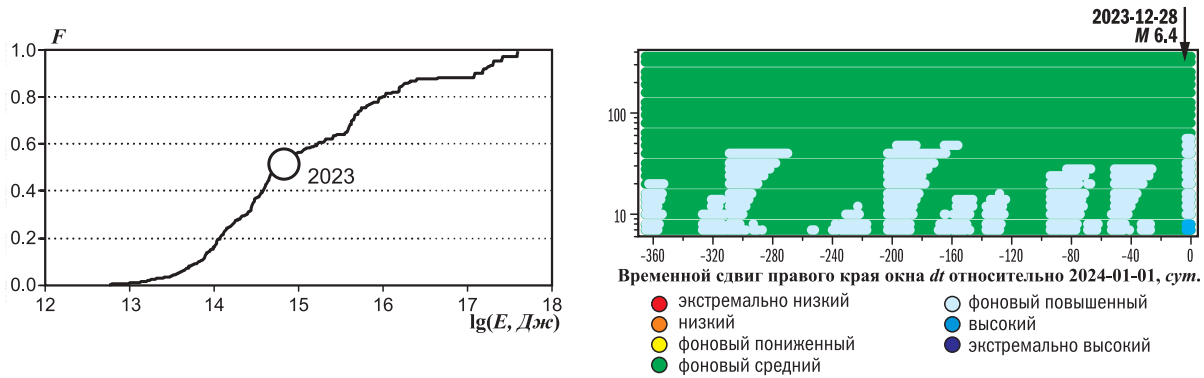


Рис. II.9 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для Курило-Охотского региона в 2023 г. (справа)

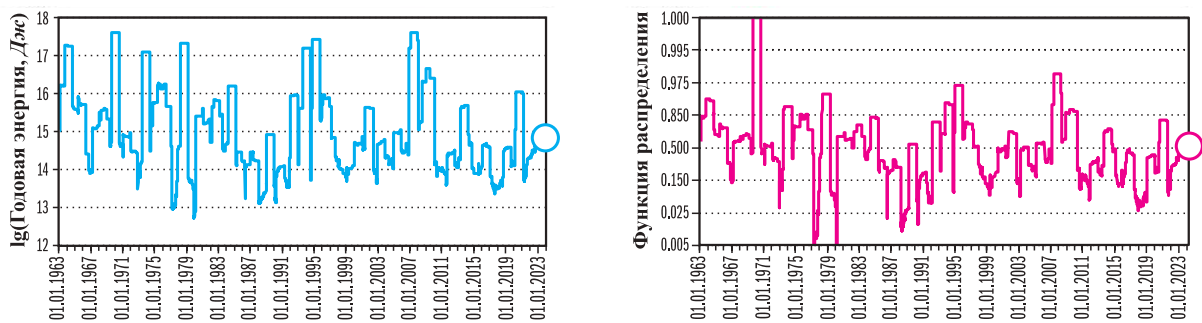


Рис. II.9 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для Курило-Охотского региона в 2023 г.

Х. Якутия (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.28).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.8$ в Якутском регионе составила $3.51 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1968–2023 гг. (рис. II.10). Для 2023 г. $F = 0.42 \pm 0.07$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. выявлен один временной интервал в диапазоне окон 7–10 сут., соответствующий высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», связанный с землетрясением 13.07.2023 г. с $M = 5.1$ (Лаптевский район). Отмечается низкий уровень сейсмичности во временных окнах 256–365 сут. перед этим землетрясением.

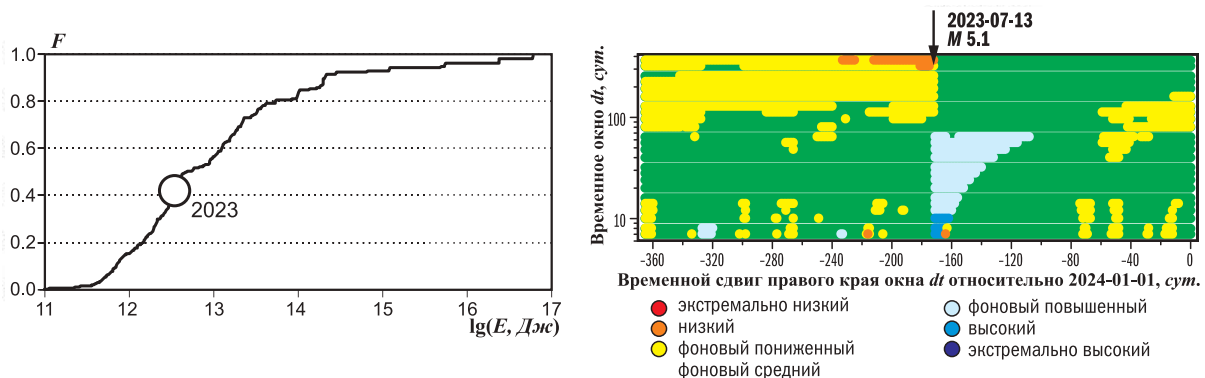


Рис. II.10 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для Якутского региона в 2023 г. (справа)

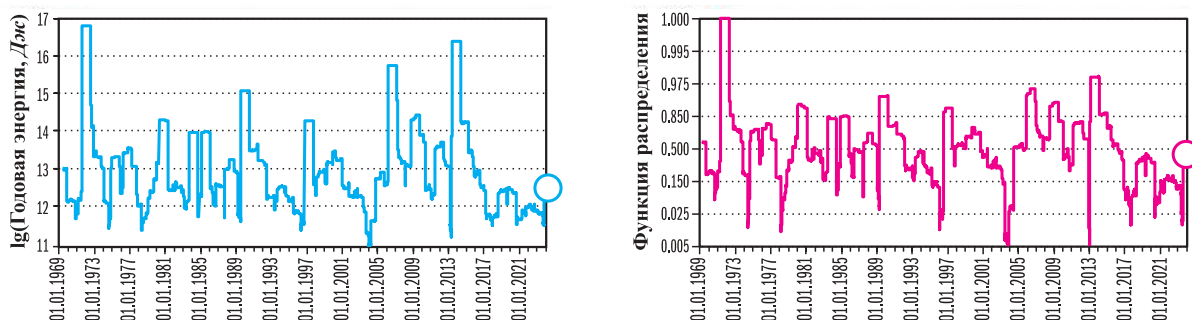


Рис. П.10 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для Якутского региона в 2023 г.

XI. Северо-Восток России и Чукотка (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.31).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений с $M \geq 2.8$ в регионе Северо-Восток России и Чукотка составила $5.20 \cdot 10^{12}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1968–2023 гг. (рис. П.11). Для 2023 г. $F=0.56 \pm 0.07$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

В 2023 г. выявлен один временной интервал в диапазоне окон 7–16 сут., соответствующий высокому уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09», связанный с землетрясениями 19.03.2023 г. с $M=5.1$ и 21.03.2023 г. с $M=4.9$ (Колыма).

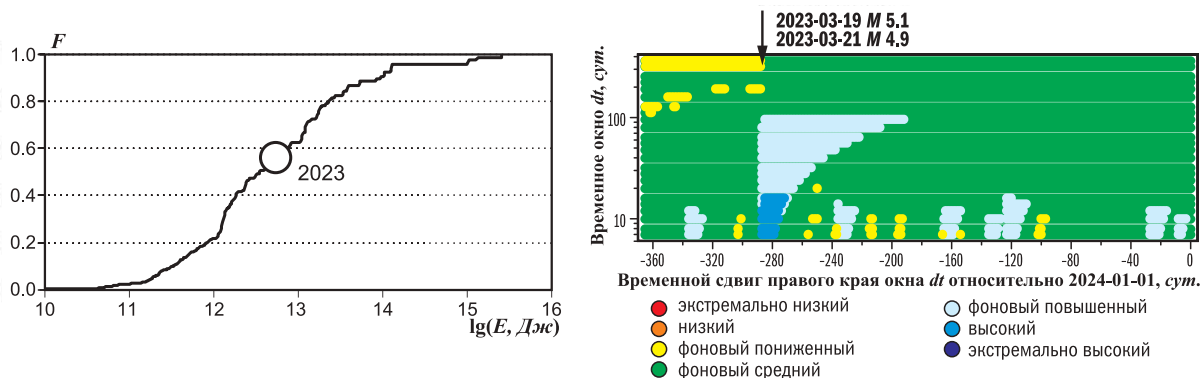


Рис. П.11 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Северо-Восток России и Чукотка в 2023 г. (справа)

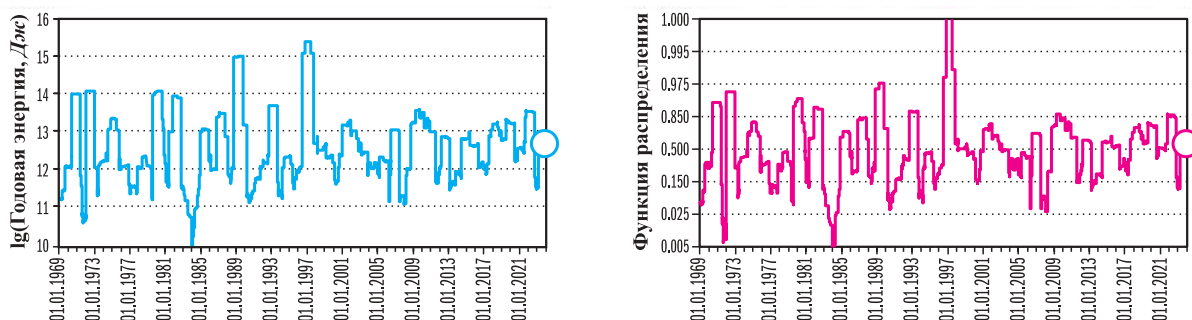


Рис. П.11 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Северо-Восток России и Чукотка в 2023 г.

ХII. Камчатка и Командорские острова (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2023 г. см. на рис. I.34).

В 2023 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Камчатском регионе составила $1.08 \cdot 10^{15}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2023 гг. (рис. II.12). Для 2023 г. $F=0.71 \pm 0.06$, что соответствует фоновому среднему уровню сейсмичности по шкале «СОУС'09».

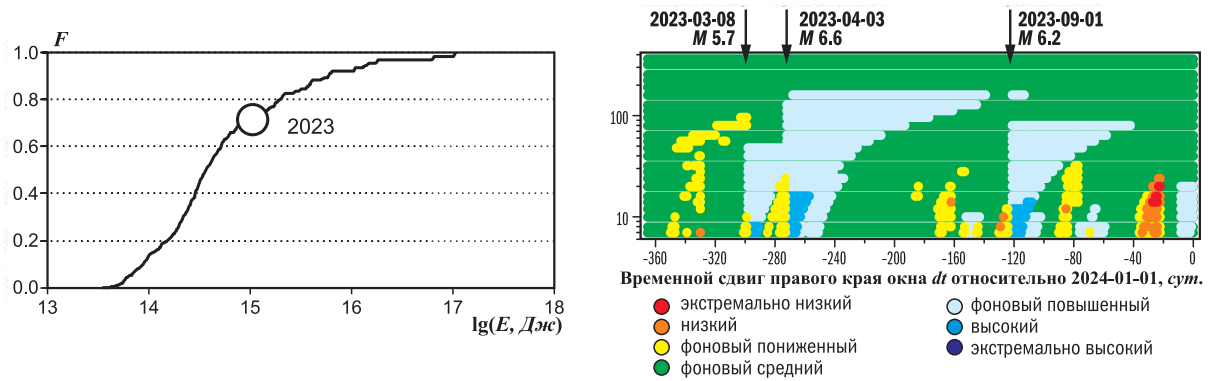


Рис. II.12 а. Функция распределения годовой сейсмической энергии (слева), СОУСграмма для региона Камчатки и Командорских островов в 2023 г. (справа)

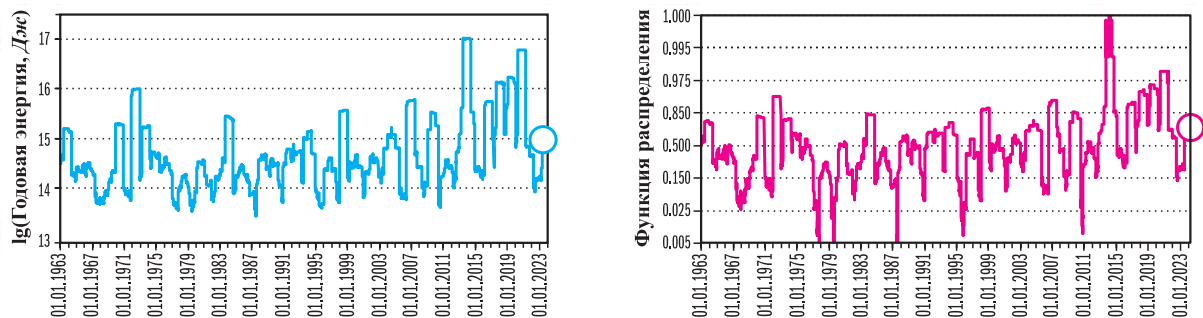


Рис. II.12 б. Временной ход годовой сейсмической энергии (слева), и соответствующие значения функции распределения (справа) для региона Камчатки и Командорских островов в 2023 г.

Заключение

Оценки уровня сейсмичности в 2023 г. в регионах России в соответствии со шкалой «СОУС'09» показаны в табл. II.1.

Таблица II.1. Значения функции распределения сейсмической энергии и категории уровня сейсмичности согласно шкале «СОУС'09» для 2023 г.

Регион	F	Уровень сейсмичности
Крымско-Черноморский регион	0.98 ± 0.02	высокий
Северный Кавказ	0.52 ± 0.06	фоновый средний
Арктика	0.07 ± 0.03	фоновый пониженный
Алтай и Саяны	0.59 ± 0.06	фоновый средний
Прибайкалье и Забайкалье	0.24 ± 0.05	фоновый средний
Приамурье и Приморье	0.55 ± 0.07	фоновый средний
Сахалин	0.88 ± 0.04	фоновый повышенный
Курило-Охотский регион	0.51 ± 0.06	фоновый средний
Якутия	0.42 ± 0.07	фоновый средний
Северо-Восток России и Чукотка	0.56 ± 0.07	фоновый средний
Камчатка и Командорские острова	0.71 ± 0.06	фоновый средний

Таким образом, в основном сейсмичность регионов в 2023 г., как и в предыдущем году [12], соответствовала фоновому среднему уровню. Исключение составили три региона: уровень сейсмичности оценивается как фоновый повышенный для Сахалина, фоновый пониженный – для Арктики и высокий – для Крымско-Черноморского региона.

Литература

1. Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // *Annali di Geofisica*. – 1956. – V. 1, N 9. – P. 1–15.
2. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
3. База данных «Землетрясения России» [сайт]. – Дата обновления 25.01.2025. – URL: <http://eqru.gsras.ru/>
4. 2023-ER_App27_Total-catalog.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2023 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025]. Системные требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_23.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. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона (инструментальный период наблюдений 1927–1986 гг.) / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 36–37.
10. Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 150–153.
11. Маловичко А.А., Пойгина С.Г. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Общие сведения о сейсмичности России // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 11–18.
12. Салтыков В.А., Коновалова А.А., Пойгина С.Г. Количественный анализ сейсмичности. Оценка уровня сейсмической активности регионов России // Землетрясения России в 2022 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 91–101. – EDN: FWNBFF