

II. Количественный анализ сейсмичности

Оценка уровня сейсмичности регионов России

¹В.А. Салтыков, ¹А.А. Коновалова, ¹Н.М. Кравченко, ²С.Г. Пойгина

¹Камчатский филиал 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 качестве параметра, характеризующего уровень 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, 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.

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 1999–2002 гг. – ежегодные сборники «Землетрясения Северной Евразии» (компакт-диски, прилагаемые к сборникам научных трудов);
- сводные каталоги землетрясений за 2003–2020 гг. – база данных «Землетрясения России» [2];
- сводный каталог землетрясений 2021 г. – настоящий ежегодник [3].

В различных регионах используются разные энергетические классификации землетрясений [4–7].

Если энергетический класс не был представлен в региональном каталоге, то он вычислялся из расчетной магнитуды M [8] по корреляционным зависимостям С.Л. Соловьёва $K_C=2 \cdot M+1.2$ [6] (для Сахалина и Курильских островов) или Т.Г. Раутиан $K_P=1.8 \cdot M+4$ [4, 5] – для остальных регионов (кроме Камчатки).

Разделение на регионы

Территория России, в соответствии с принятой в ФИЦ ЕГС РАН регионализацией (см. [9] и Приложение), разделена для исследований на 11 регионов (рис. П.1).

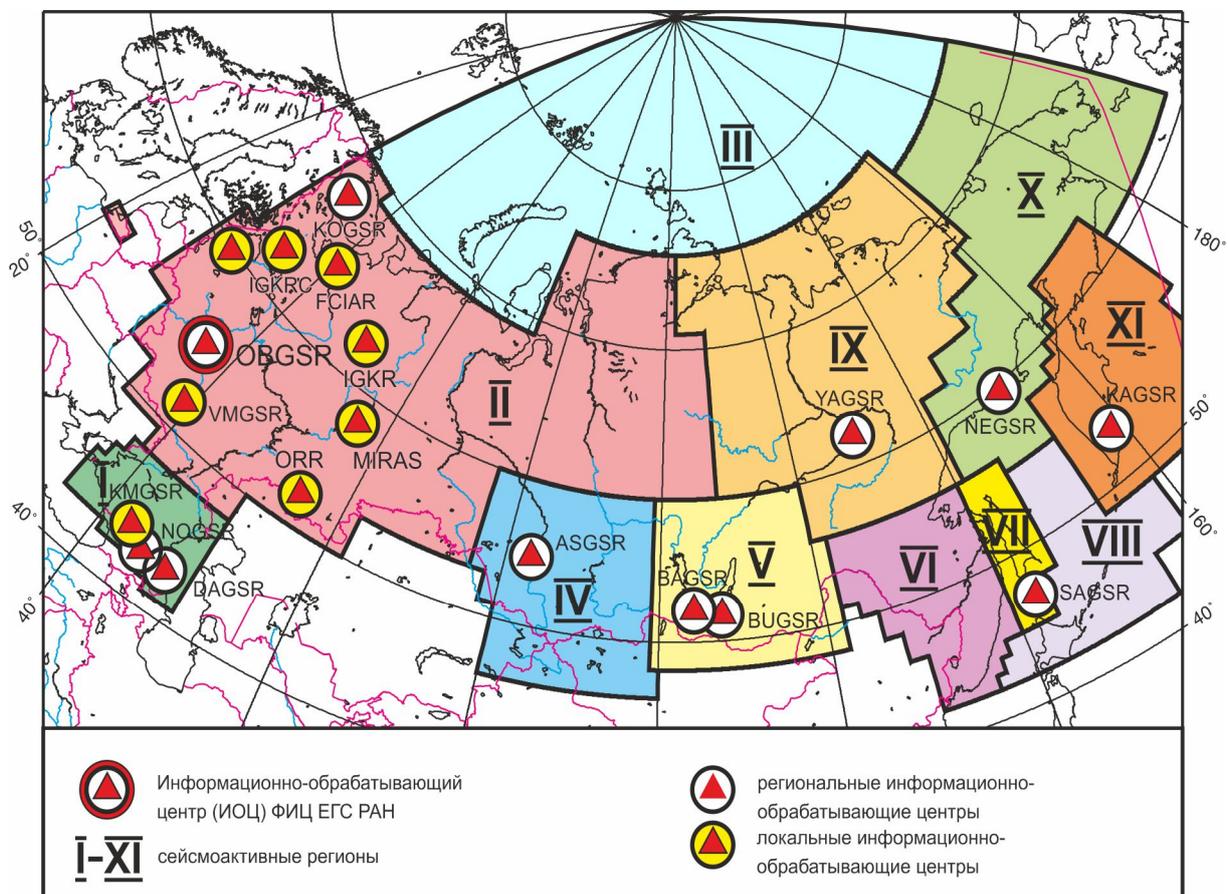


Рис. П.1. Границы регионов на территории России

Функции распределения годовой сейсмической энергии для отдельных регионов

Функция распределения сейсмической энергии, выделившейся за один год для вышеуказанных регионов, и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии показаны на рис. П.2–П.11. На этих рисунках кружками отмечено значение функции распределения в 2021 году.

I. Северный Кавказ (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.5).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений на Северном Кавказе составила $1.42 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. П.2). Для 2021 г. $F=0.69 \pm 0.06$.

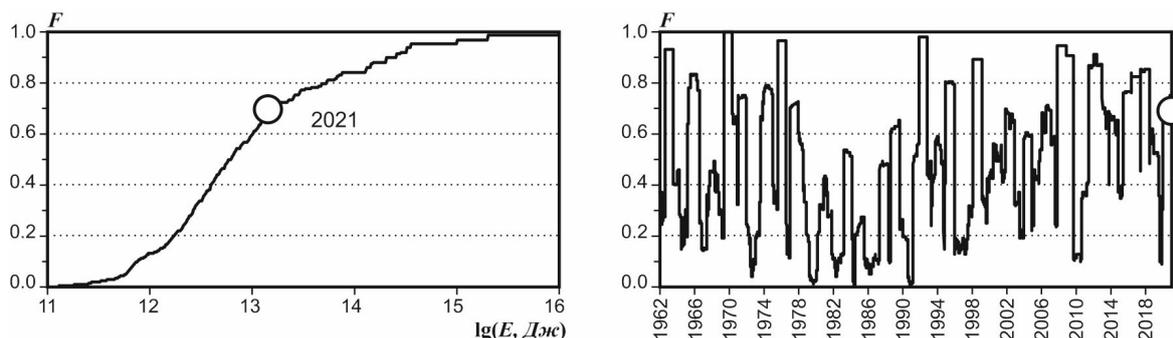


Рис. П.2. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Северного Кавказа

II. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.8).

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

III. Арктика (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.11).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Арктике составила $4.26 \cdot 10^{12}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1965–2021 гг. (рис. П.3). Для 2021 г. $F=0.45 \pm 0.07$.

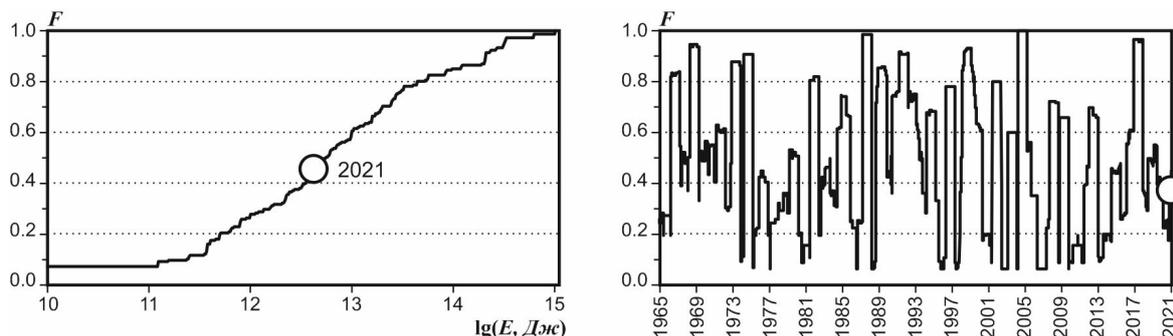


Рис. П.3. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Арктики

IV. Алтай и Саяны (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.14).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Алтай и Саяны составила $1.03 \cdot 10^{14}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. П.4). Для 2021 г. $F=0.73 \pm 0.06$.

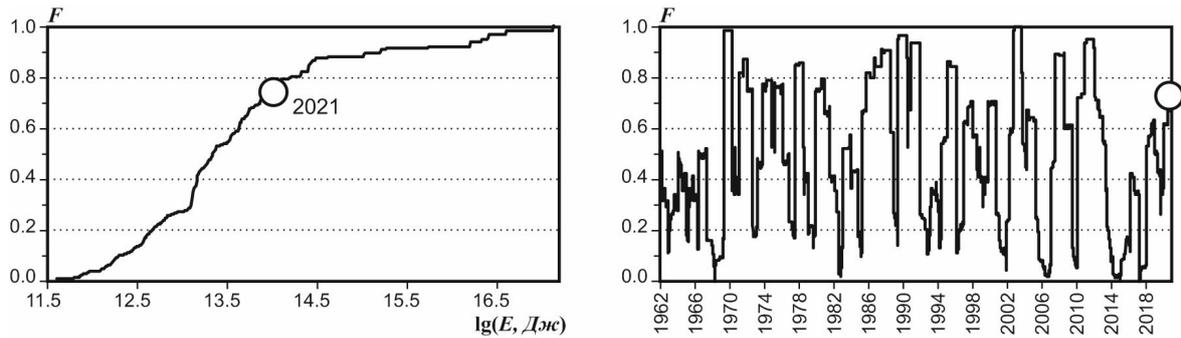


Рис. 11.4. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Алтая и Саян

V. Прибайкалье и Забайкалье (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.17).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Прибайкалье и Забайкалье составила $1.38 \cdot 10^{16}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.5). Для 2021 г. $F=0.98 \pm 0.02$.

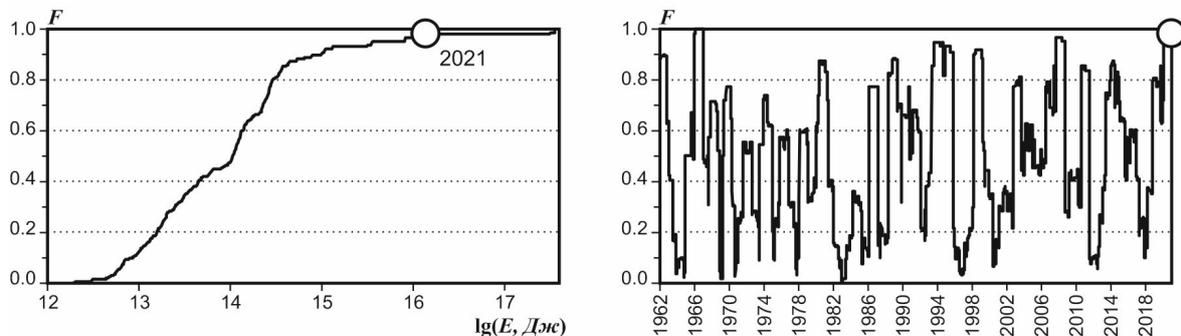


Рис. 11.5. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Прибайкалья и Забайкалья

VI. Приамурье и Приморье (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.20).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Приамурье и Приморье составила $3.37 \cdot 10^{11}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1974–2021 гг. (рис. II.6). Для 2021 г. $F=0.008 \pm 0.012$.

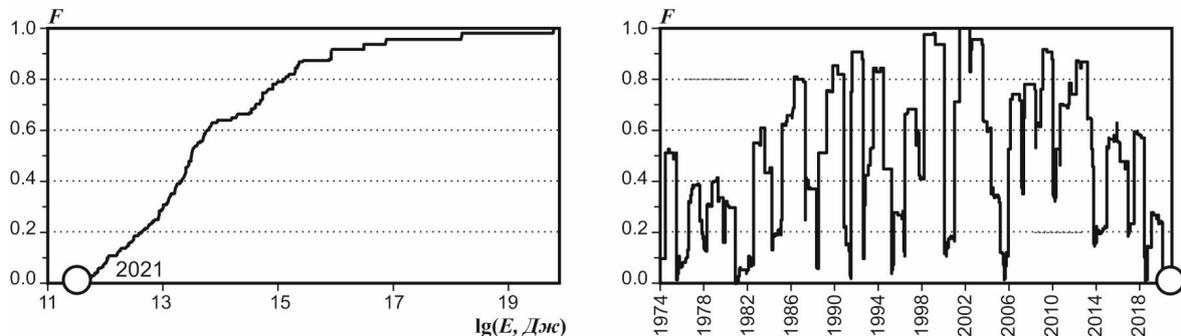


Рис. 11.6. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Приамурья и Приморья

VII. Сахалин (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.20).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Сахалин составила $9.93 \cdot 10^{10}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.7). Для 2021 г. $F=0.19 \pm 0.05$.

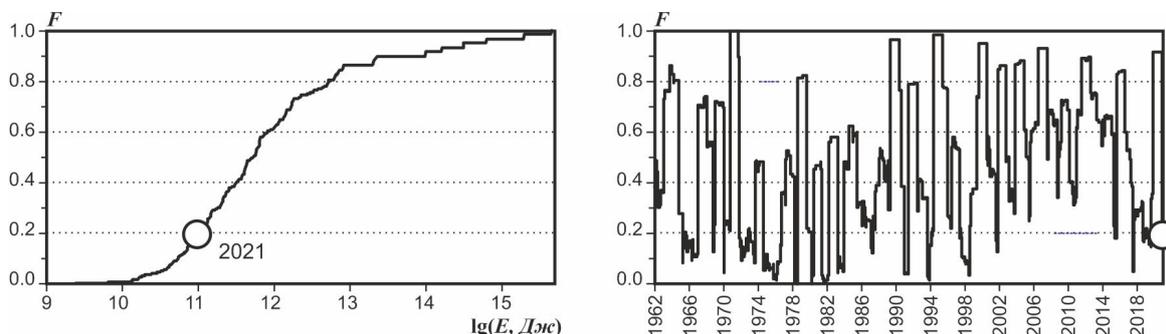


Рис. II.7. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Сахалина

VIII. Курило-Охотский регион (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.20).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Курило-Охотском регионе составила $2.15 \cdot 10^{14}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.8). Для 2021 г. $F=0.30 \pm 0.06$.

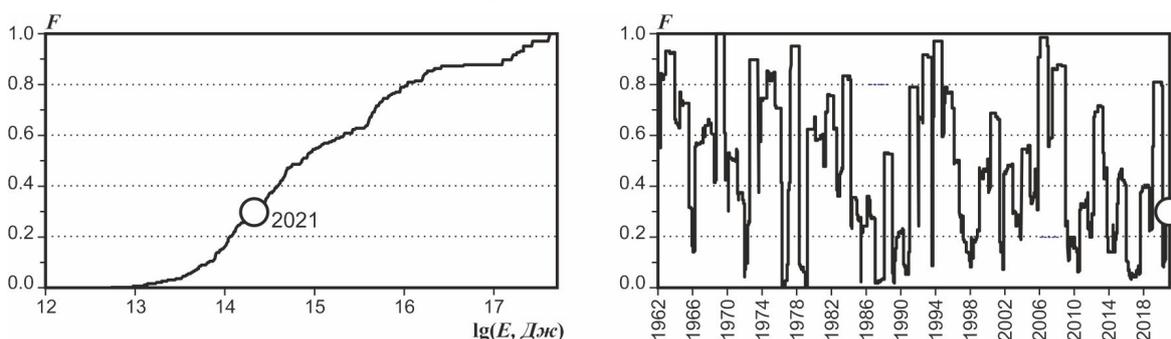


Рис. II.8. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для Курило-Охотского региона

IX. Якутия (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.25).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Якутском регионе составила $1.2 \cdot 10^{12}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1968–2021 гг. (рис. II.9). Для 2021 г. $F=0.16 \pm 0.05$.

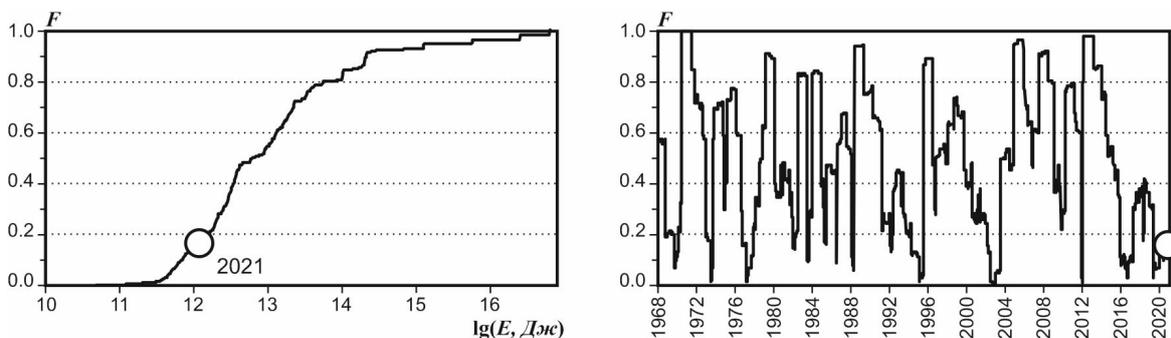


Рис. II.9. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для Якутского региона

X. Северо-Восток России и Чукотка (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.28).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Северо-Восток России и Чукотка составила $3.69 \cdot 10^{13}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1968–2021 гг. (рис. II.10). Для 2021 г. $F=0.85 \pm 0.05$.

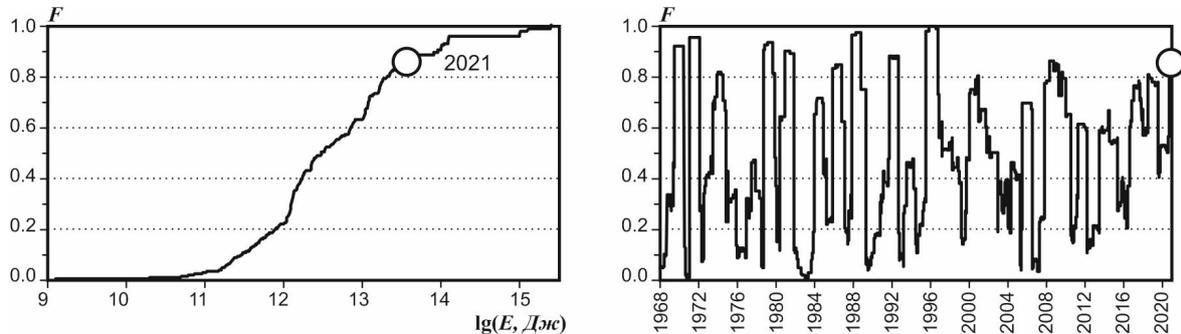


Рис. II.10. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Северо-Востока России и Чукотки

XI. Камчатка и Командорские острова (границы региона и карту расположения эпицентров землетрясений в 2021 г. см. на рис. I.31).

В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Камчатском регионе составила $5.15 \cdot 10^{14}$ Дж. Функция распределения F построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.11). Для 2021 г. $F=0.52 \pm 0.06$.

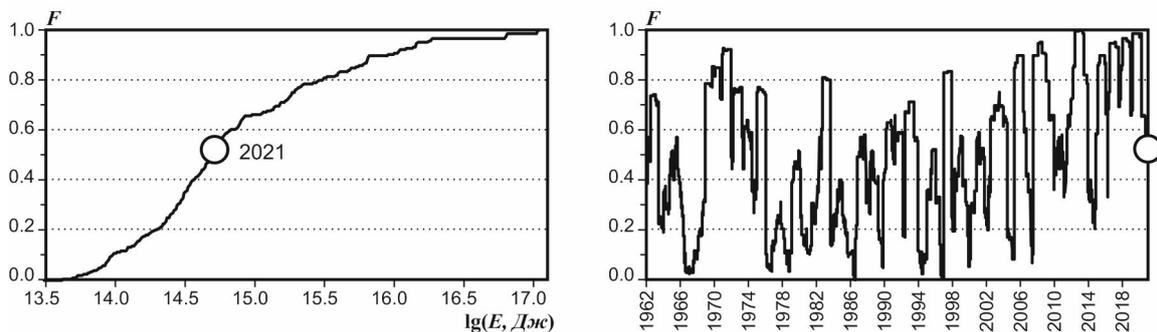


Рис. II.11. Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Камчатки и Командорских островов

Заключение

В.А. Салтыковым в [10] 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 – $0.85 \leq F < 0.975$.

Оценки уровня сейсмичности в соответствии с этой шкалой в 2021 г. в регионах России показаны в табл. II.1.

Таблица II.1. Значения функции распределения сейсмической энергии и категории уровня сейсмичности согласно шкале «СОУС'09» для 2021 г.

| Регион | F | Уровень сейсмичности |
|---------------------------------|------|----------------------|
| Северный Кавказ | 0.69 | фоновый средний |
| Арктика | 0.45 | фоновый средний |
| Алтай и Саяны | 0.73 | фоновый средний |
| Прибайкалье и Забайкалье | 0.98 | высокий |
| Приамурье и Приморье | 0.01 | низкий |
| Сахалин | 0.19 | фоновый средний |
| Курило-Охотский регион | 0.30 | фоновый средний |
| Якутия | 0.16 | фоновый средний |
| Северо-Восток России и Чукотка | 0.85 | фоновый повышенный |
| Камчатка и Командорские острова | 0.52 | фоновый средний |

Таким образом, в основном сейсмичность регионов в 2021 г., как и в предыдущем году [11], соответствовала фоновому среднему уровню. Уровень сейсмичности оценивается как высокий – для региона Прибайкалья и Забайкалья, фоновый повышенный – для Северо-Востока России и Чукотки, низкий – для Приамурья и Приморья.

Литература

1. Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // *Annals of Geophysics*. – 1956. – V. 9, N 1. – P. 1–15.
2. База данных «Землетрясения России» [сайт]. – URL: <http://eqru.gsras.ru/> (дата обновления 24.01.2023).
3. 2021-ER_App26_Total-catalog.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2021 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_21.html, свободный.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
8. Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 138–141.
9. Маловичко А.А., Пойгина С.Г. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Общие сведения о сейсмичности России // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 10–16.
10. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59. – EDN: NSYPRH
11. Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Пойгина С.Г. Количественный анализ сейсмичности. Оценка уровня сейсмической активности регионов России // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 85–91.