

## II. Количественный анализ сейсмичности

### Оценка уровня сейсмичности регионов России

<sup>1</sup>В.А. Салтыков, <sup>1</sup>А.А. Коновалова, <sup>1</sup>Н.М. Кравченко, <sup>2</sup>С.Г. Пойгина

<sup>1</sup>Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

<sup>2</sup>ФИЦ 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  $\gamma$  – 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  $\gamma$ ; 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. II.1).

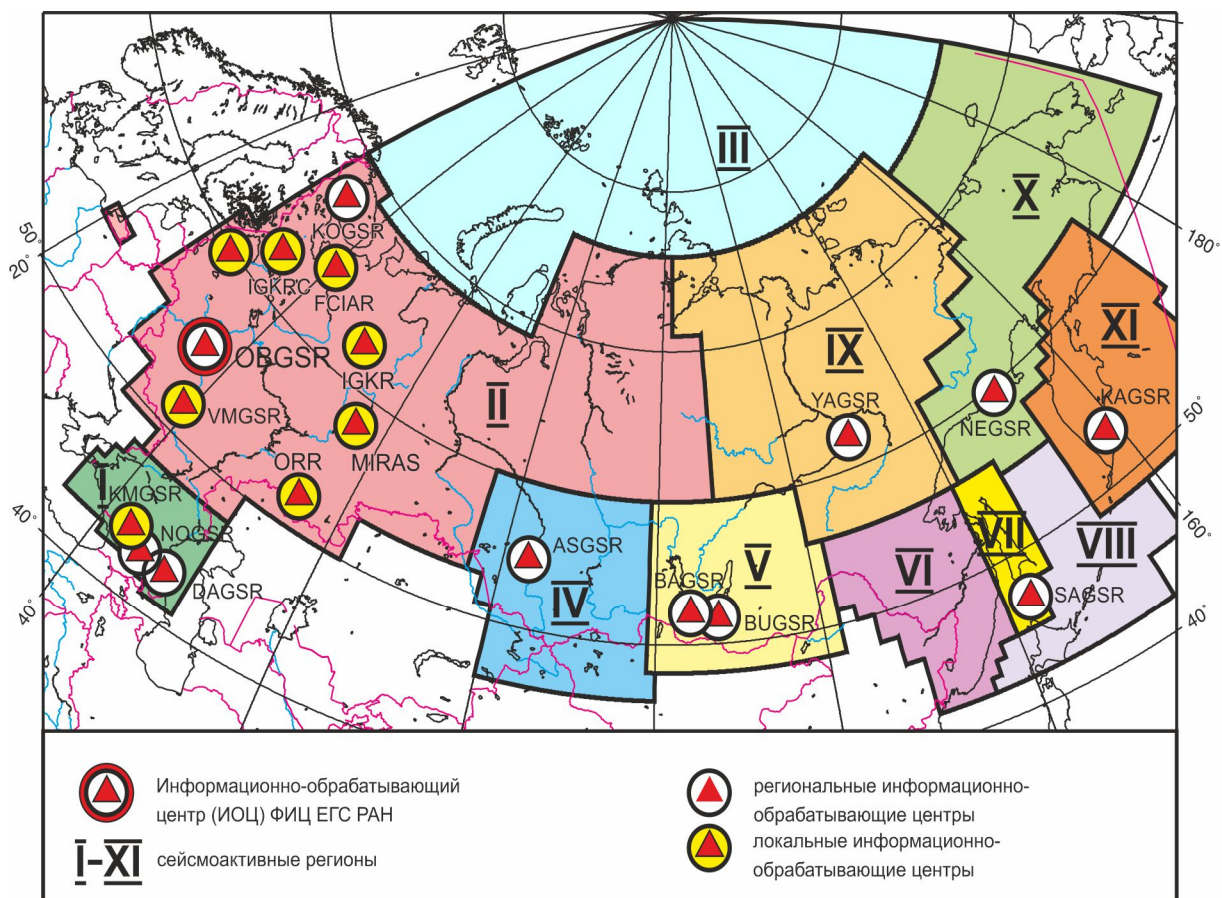


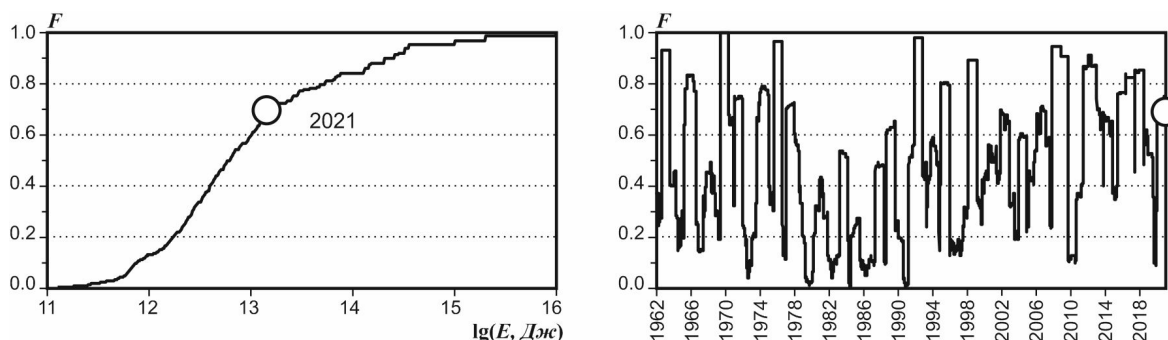
Рис. II.1. Границы регионов на территории России

### 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.  $F=0.69 \pm 0.06$ .



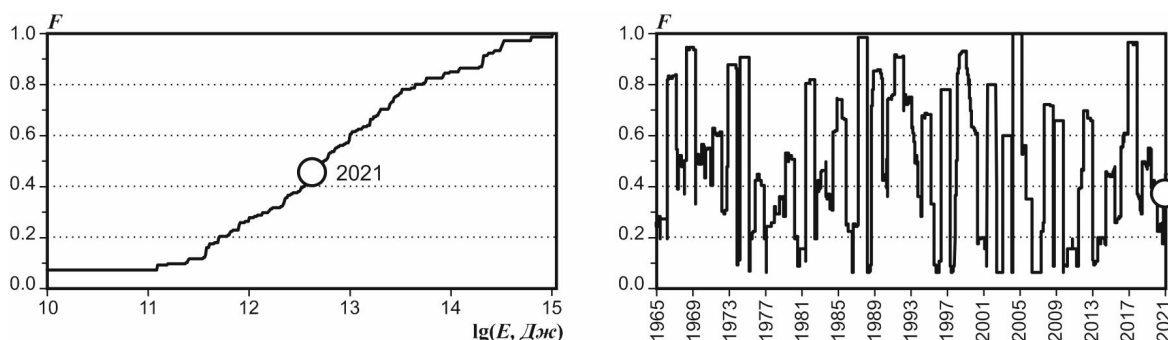
**Рис. П.2.** Функция распределения сейсмической энергии (слева) и временной ход значений функции распределения годовой сейсмической энергии (справа) для региона Северного Кавказа

**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).

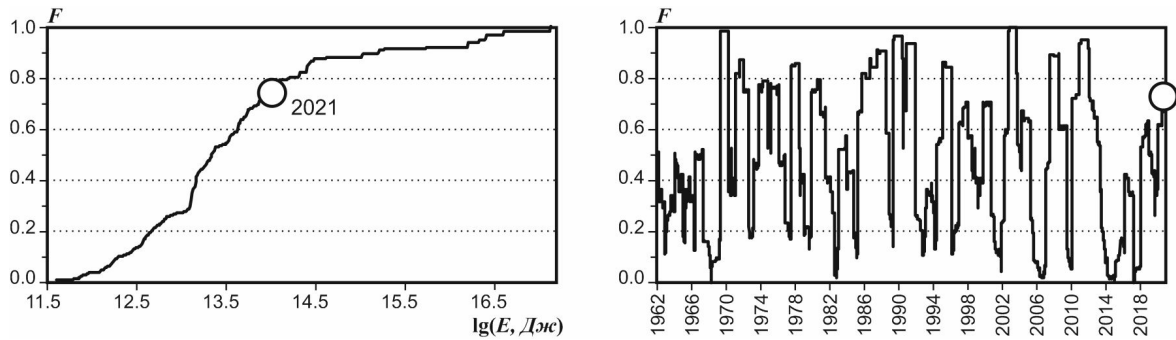
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Арктике составила  $4.26 \cdot 10^{12}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1965–2021 гг. (рис. П.3). Для 2021 г.  $F=0.45 \pm 0.07$ .



**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).

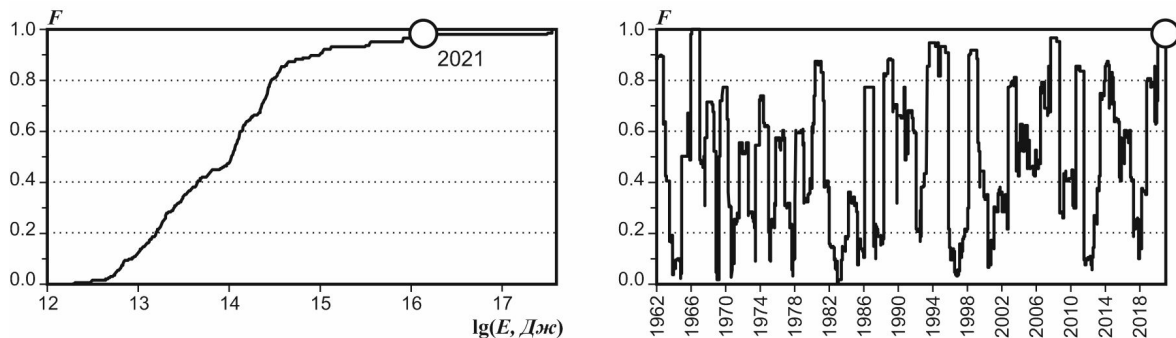
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Алтай и Саяны составила  $1.03 \cdot 10^{14}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. П.4). Для 2021 г.  $F=0.73 \pm 0.06$ .



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

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

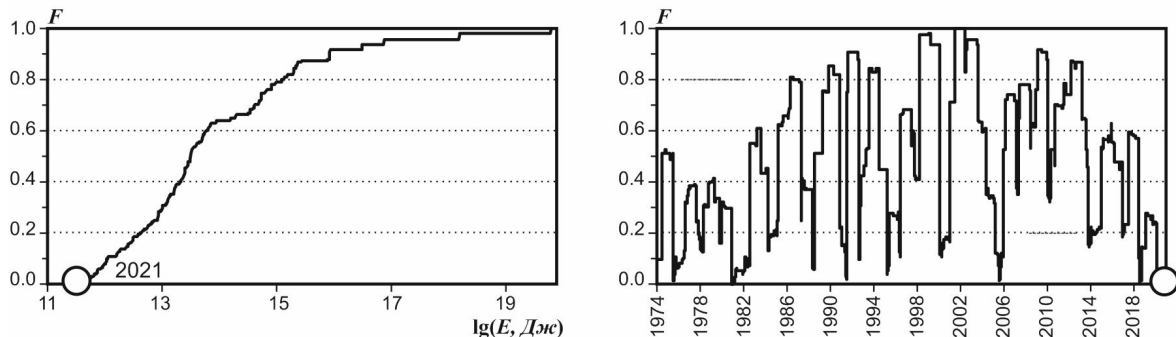
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Прибайкалье и Забайкалье составила  $1.38 \cdot 10^{16}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.5). Для 2021 г.  $F=0.98 \pm 0.02$ .



**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).

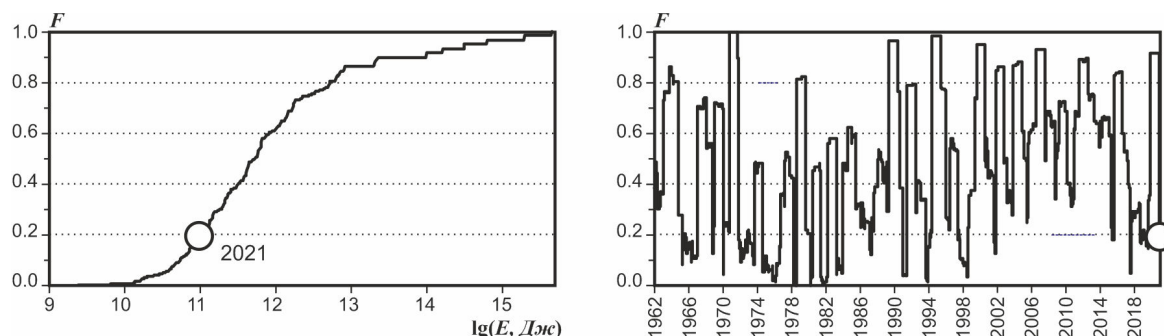
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Приамурье и Приморье составила  $3.37 \cdot 10^{11}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1974–2021 гг. (рис. II.6). Для 2021 г.  $F=0.008 \pm 0.012$ .



**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).

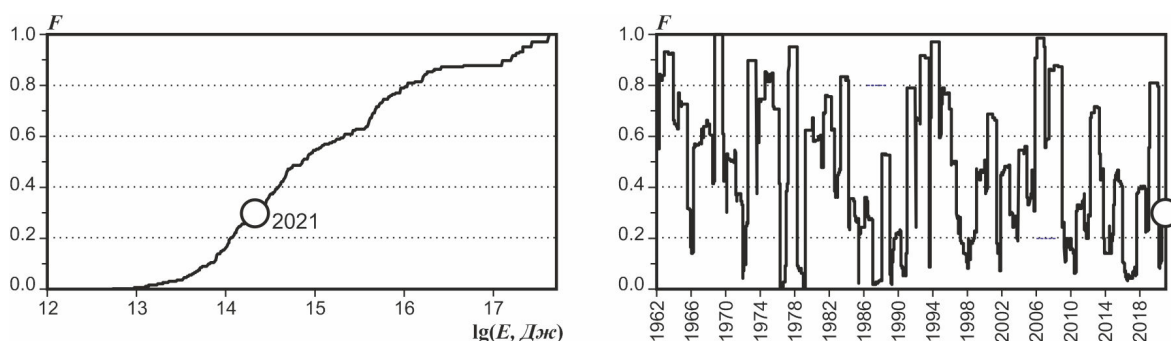
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Сахалин составила  $9.93 \cdot 10^{10}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.7). Для 2021 г.  $F=0.19 \pm 0.05$ .



**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).

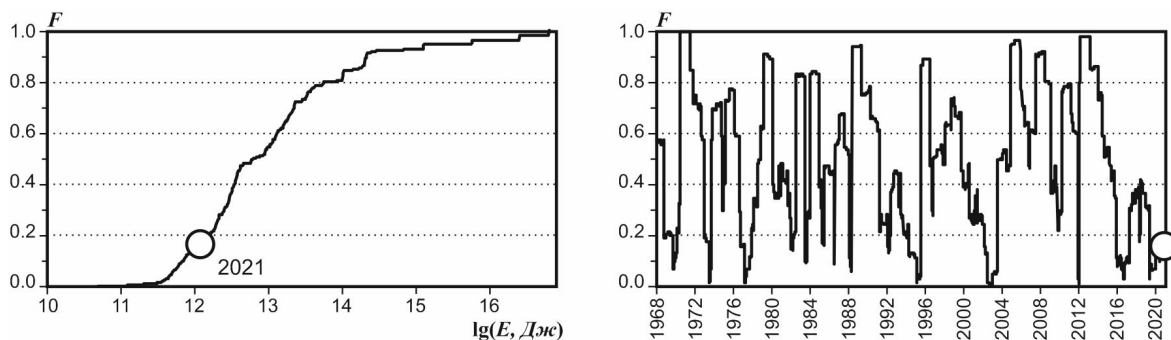
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Курило-Охотском регионе составила  $2.15 \cdot 10^{14}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1962–2021 гг. (рис. II.8). Для 2021 г.  $F=0.30 \pm 0.06$ .



**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).

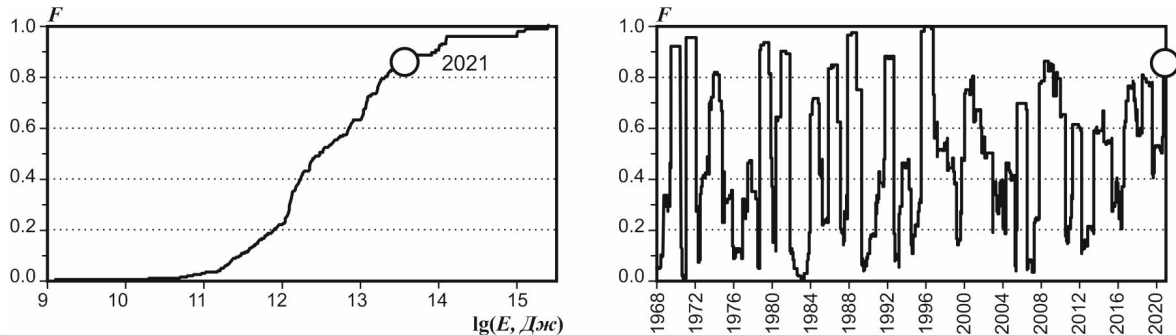
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в Якутском регионе составила  $1.2 \cdot 10^{12}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1968–2021 гг. (рис. II.9). Для 2021 г.  $F=0.16 \pm 0.05$ .



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

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

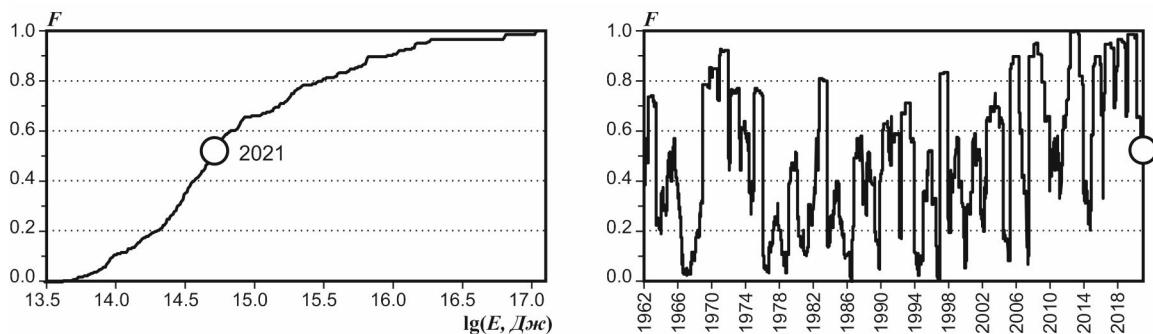
В 2021 г. суммарная энергия зарегистрированных землетрясений в регионе Северо-Восток России и Чукотка составила  $3.69 \cdot 10^{13}$  Дж. Функция распределения  $F$  построена по данным каталогов за 1968–2021 гг. (рис. II.10). Для 2021 г.  $F=0.85 \pm 0.05$ .



**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. П.1.

**Таблица П.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](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.