Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, А.А. Коновалова КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2023 году. Рассматриваются такие параметры, как общая выделившаяся сейсмическая энергия, оценка уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL* и «*Z*-функция». Методики расчета этих параметров описаны в ежегоднике [1]. При расчетах использованы камчатские региональные каталоги [2, 3]. Оценки параметров получены для Камчатской сейсмоактивной области (КСО) – района, ограниченного широтой φ =50.5 и 56.5°N, долготой λ =156.0 и 167.0°E, глубиной от 0 до 300 *км*. Выбор зоны определяется однородностью каталога землетрясений за время детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г.). Нижний энергетический уровень землетрясений был определен как *K*_S=8.5 по классификации С.А. Федотова [4], что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для Камчатской сейсмоактивной зоны в целом [5].

Результаты исследования Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделившаяся в 2023 г. сейсмическая энергия составила 8.61·10¹⁴ Дж при среднегодовом (за 62 года) значении 9.74·10¹⁴ Дж и медианном годовом значении 1.93·10¹⁴ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2023 гг. (рис. II.13). Для 2023 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет 0.82±0.05, что позволяет рассматривать 2023 г. как год с фоновой средней сейсмичностью.



Рис. II.13. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в КСО в 1962–2023 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2023 г.

Для качественной оценки текущего уровня сейсмичности используется шкала и методика «СОУС'09», согласно которой состояние сейсмичности региона оценивается по эмпирической функции распределения выделившейся за определенный временной интервал сейсмической энергии: $F(K)=P(\lg E \le K)$, где E – суммарная сейсмическая энергия в $\mathcal{Д}\mathcal{K}$ [6]. Рис. II.14 отражает изменение оценок уровня сейсмичности КСО в целом в течение 2023 г. в различных временных окнах. Землетрясения 2023 г. с $ML \ge 6.5$ вызвали повышение регионального уровня сейсмичности до высокого (в окнах до 30 *сут.*).

Локальные аномалии уровня сейсмичности в 2023 г. показаны на карте уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», полученной при сканировании пространства вертикальными цилиндрами с радиусами 100 и 200 км (рис. II.15).



Рис. П.14. Временной ход уровня сейсмичности КСО в различных временных окнах в 2023 г.



Рис. II.15. Горизонтальные вариации уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09» масштаба 100 км (слева) и 200 км (справа) в 2023 г. Цветовой код соответствует рис. II.14. Отмечена зона ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН

Карты различного масштаба предназначены для визуализации локальных или региональных особенностей сейсмичности. На локальном пространственном масштабе выделяются две области экстремально высокого уровня сейсмичности: 1 – на севере Камчатки в районе Северной группы вулканов; 2 – на юге Камчатки, начиная с середины Авачинского залива и заканчивая северной частью острова Парамушир, обусловленные наиболее сильными землетрясениями 2023 г. [2, 3]: 3 апреля в $03^{h}06^{m}$ с ML=6.6(Mw=6.6), 1 сентября в $20^{h}49^{m}$ с ML=6.5 (Mw=6.2). Экстремально низкий уровень сейсмичности (низкий на региональном уровне) отмечен в районе Командорских островов (южнее острова Беринга).

Помимо этого, оценка уровня сейсмичности рассчитана в пространственных областях, определенных в соответствии с регионализацией сейсмоактивного объема Камчатки и прилегающих территорий [7], учитывающей тектоно-географическое положение землетрясений (табл. II.2).

Наиболее сильным сейсмическим событием 2023 г. является землетрясение с магнитудой *ML*=6.6, произошедшее 3 апреля в южной части Авачинского залива (52.58°N, 158.78°E) на глубине 105 *км* (рис. II.16 а). Энергия, выделившаяся при этом землетрясении, составляет 58% всей сейсмической энергии 2023 г. в пределах КСО.

Пространственная область	Энергия Е, Дж	F(lgE)	Уровень сейсмичности
Тихий океан	3.4.1011	0.16±0.05	фоновый средний
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	5.6·10 ¹³	0.42±0.06	фоновый средний
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	9.8·10 ¹⁴	0.90±0.04	фоновый повышенный
Корякский сейсмический пояс	8.3·10 ¹¹	0.67±0.06	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$4.2 \cdot 10^{13}$	0.64±0.06	фоновый средний
Континентальные области Камчатки (мелкофокусные землетрясения)	2.9.1011	0.65±0.06	фоновый средний
Северные Курилы (мелкофокусные землетрясения)	3.3.108	0.54±0.06	фоновый средний
Залив Шелихова	$1.4 \cdot 10^{10}$	0.68 ± 0.06	фоновый средний
Охотское море (исключая глубокие землетрясения)	$<3.2 \cdot 10^{7}$	0.40±0.06	фоновый средний

Таблица II.2. Оценка уровня сейсмичности в 2023 г. для различных пространственных областей Камчатки

Наблюдавшаяся афтершоковая последовательность включает две стадии: первая – в течение 10 сут. в соответствии с законом Омори (гиперболический спад потока афтершоков), вторая – до конца сентября в соответствии с законом Омори-Утсу (степенной спад) с показателем p=0.97. С октября поток землетрясений в афтершоковой области можно считать стабильным. Следует отметить, что время смены афтершокового режима совпадает со временем сильнейшего афтершока 11 апреля с ML=5.5. Размеры очага землетрясения, оцененного как двусигмовый эллипс рассеяния афтершоков первого месяца, составляют $34 \times 22 \ \kappa m$.



Рис. II.16. Сейсмичность Камчатки в 2023 г.: а – эпицентры землетрясений с ML≥6.0; б – эпицентры независимых землетрясений с K_S=9–14. Красным квадратом отмечена Камчатская сейсмоактивная область (КСО)

Землетрясение 1 сентября *ML*=6.5 (50.57°N, 156.45°E, глубина *h*=148 км) – второе по энергии в 2023 г. (29% всей сейсмической энергии 2023 г. в пределах КСО), произошло вблизи острова Парамушир. Афтершоки не наблюдались.

Следующими по энергии являются землетрясения с ML=6.3, произошедшие 8 марта в акватории Тихого океана южнее Камчатки (за пределами КСО, без афтершоков) и 18 апреля ML=6.0 в Кроноцком заливе (без афтершоков). При расчете приведенных ниже параметров сейсмичности использованы каталоги с удаленными афтершоковыми последовательностями и роями. Примененная для этого программа В.Б. Смирнова (МГУ им. М.В. Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в [8]. Карта эпицентров независимых землетрясений 2023 г. представлена на рис. II.16 б.

Вариации наклона графика повторяемости ү

Наклон графика повторяемости γ в 2023 г. равен 0.440±0.016, что на ~11% ниже среднемноголетнего значения 0.492±0.005. Карты наклона графика повторяемости землетрясений γ представлены на рис. II.17. Областью расчета значений является круг радиусом 100 км. Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест. По данным 2021–2023 гг. в районе Кроноцкого полуострова и южной части Камчатского залива выделяется общирная аномалия уменьшения γ . Статистическая достоверность аномалии – на уровне 0.995. Аналогичной статистической значимости, но существенно меньшей площади зоны пониженных значений наклона выделяются в Кроноцком заливе, Камчатском проливе и в акватории Тихого океана в районе Шипунского полуострова.



Рис. II.17. Карты наклона графика повторяемости ү, рассчитанные для 2021–2023 гг. (а) и для сравнения – для 1962–2023 гг. (б). Изменение ү в 2021–2023 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение (в)

Сейсмическая активность А10

Средняя активность A_{10} в 2023 г. составила 0.528 ± 0.006 при среднемноголетнем значении 0.473 ± 0.001 . В целом активность региона была выше среднего на ~12%. Карты значений активности A_{10} , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 50 км, приведены на рис. II.18.



Рис. II.18. Карты сейсмической активности A₁₀ в 2023 г. (а) и за период 1962–2023 гг. (б). Активность A₁₀ в 2023 г., нормированная на многолетнюю активность (в)

Распределение активности A_{10} в 2023 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается значительное снижение активности в полосе между глубоководным желобом и побережьем Камчатки в полосе от 52.5 до 55.5°N, а также юго-западнее острова Беринга в Камчатском проливе и южнее Авачинского залива наблюдается область возрастания активности A_{10} вдвое по сравнению с многолетними значениями.

Мониторинг параметра RTL

На рис. II.19 показаны карты минимальных значений параметра RTL, наблюдавшихся в течение 2022 и 2023 гг. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–100 км. Штриховой линией отмечена область надежного определения параметра. Для характерных точек аномалий рассчитан временной ход параметра RTL (рис. II.20). Характерная точка определяется по минимальному значению RTL за время существования аномалии.



Рис. II.19. Минимальные значения RTL-параметра в 2022 г. (а) и в 2023 г. (б). Ромбами обозначены характерные точки аномалий, пунктиром – область надежного определения параметра RTL. Кружками отмечены эпицентры землетрясений с ML≥6.0

RTL-аномалии в районе Командорских островов (характерные точки I, II и V) по расположению и развитию во времени аномалий затишья и активизаций [9] могут трассировать «Командорскую брешь». В 2022 г. *RTL*-аномалия (с характерной точкой I – *RTL*_I) завершилась, у аномалии *RTL*_{II} наблюдался второй эпизод развития с расширением зоны затишья в юго-восточном направлении вдоль Алеутского глубоководного желоба. К 2023 г. область затишья разделилась на два локальных объема (характерные точки II и V), а в апреле 2023 г. отмечен минимум параметра аномалии *RTL*_V.

Аномалия RTL_{IV} впервые проявилась в 2021 г. близ полуострова Шипунский наряду с аномалией RTL_{III} в акватории Тихого океана, в течение 2022 г. наблюдался второй эпизод развития в окрестности Авачинского залива, который в октябре 2022 г. завершился. Интервал времени ожидания между завершением сейсмического затишья, приуроченного к эпизоду с характерной точкой IV^{2022 г.}, и моментом землетрясения 03.04.2023 г. с ML=6.6 с эпицентром на его периферии составил шесть месяцев. В 2023 г. в районе глубоководного желоба выделяется третий эпизод развития аномалии RTL_{IV} .

Землетрясение 08.03.2023 г. с ML=6.3 аномалии не сопоставлено, эпицентр расположен на удалении ~65 км от края аномалии (48.70–49.85°N, 158.40–160.84°E), находящейся в районе глубоководного желоба за рамками зоны мониторинга (КСО), а также за областью надежного определения параметра.

На побережье Кроноцкого залива перед землетрясением 18.04.2023 г. с *ML*=6.0 предваряющей аномалии не выделено. На юге Камчатки (в районе острова Парамушир) перед землетрясением 01.09.2023 г. с *ML*=6.5 *RTL*-аномалия, как предвестниковая, не выделялась по причине ее недостаточной значимости по условию методики.



Рис. II.20. Временной ход RTL-параметра в характерных точках аномалий (рис. II.19). Отмечен момент землетрясения, сопоставленного аномалии

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

На рис. II.21 показана карта максимальных значений статистически значимого (Z>3) уменьшения скорости сейсмического потока *SRD*, наблюдавшихся в течение 2022 и 2023 гг. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–70 км. Области сейсмических затиший оконтурены. Аномалии пронумерованы в хронологическом порядке по мере проявления затишья, рассматриваемого в качестве возможного предвестника сильного землетрясения. Для каждой из аномалий в скользящем временном окне 12 месяцев рассчитан временной ход функции Z(t) (рис. II.22).

В апреле 2023 г. в пределах зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. II.15) произошло три сильных землетрясения с $ML \ge 6.0$: 3 апреля с ML = 6.6, 7 апреля с ML = 6.2 и 18 апреля с ML = 6.0.

Эпицентр землетрясения 3 апреля с *ML*=6.6 (юг Авачинского залива) расположен на северной периферии зоны 7, где в течение года уменьшение скорости сейсмического потока по состоянию на август 2022 г. отмечалось в 10 раз (*SRD*=0.9), на сентябрь 2022 г. – в 5 раз (*SRD*=0.81). Интервал времени ожидания до момента землетрясения составил около семи месяцев.



Рис. II.21. Карты максимальных значений SRD в течение 2022 г. (а) и 2023 г. (б). Области сейсмического затишья оконтурены. Отмечены эпицентры землетрясений 2023 г. с ML≥6.0



Рис. II.22. Зависимости Z(t), рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. II.21). Отмечены моменты землетрясений, сопоставленных аномалиям, в пределах КСО (рис. II.16)

Землетрясение 7 апреля 2023 г. с ML=6.2 (49.64°N, 155.59°E, h=121 км) в районе Северных Курильских островов (остров Онекотан) произошло за пределами зоны мониторинга КСО (рис. II.16). Его эпицентр расположен на участке, где наблюдалось сейсмическое затишье, прослеживающееся на юг и север от зоны 6 (рис. II.21 а), образующей с ней единую протяженную зону (с сентября 2021 г. по ноябрь 2022 г.) субмеридионального направления от мыса Лопатка до острова Онекотан (рис. II.21 б). Время ожидания от завершения абсолютного сейсмического затишья до землетрясения составило 10 месяцев для зоны 6^{2022 г.} и пять месяцев – для объединенной протяженной зоны 6^{2023 г.}.

Эпицентр землетрясения 18 апреля с ML=6.0 (Кроноцкий залив) расположен в пределах аномалии (зона 4), проявляющейся эпизодически [10] в районе полуострова Шипунский. Время ожидания землетрясения после завершения абсолютного сейсмического затишья (SRD=1 – отсутствие землетрясений выбранного энергетического диапазона) составило 26 месяцев. В этом районе отмечается очередной эпизод уменьшения скорости сейсмического потока в течение 21 месяца (с января 2022 г. по сентябрь 2023 г.) (рис. II.21 б).

Эпицентр землетрясения 1 сентября 2023 г. с ML=6.5 ($h=150 \ \kappa m$) расположен на юге Камчатки в пределах зоны 6 (район мыса Лопатка и острова Парамушир) вблизи ранее произошедшего землетрясения 16 мая 2022 г. с ML=6.2 ($h=88.6 \ \kappa m$) [11] на фоне развития аномалии сейсмического затишья (зона $6^{2022 \ r.}$). Время ожидания составило 15 и 9 месяцев после завершения эпизодов затишья (SRD=1) в 2022 г. и 2023 г. соответственно. Землетрясение 8 марта 2023 г. с ML=6.3 аномалии не сопоставлено по причине удаленности его эпицентра на 71 κm .

Афтершоковых последовательностей после землетрясений в районе Курильских островов 16.05.2022 г., 07.04.2023 г. и 01.09.2023 г. не последовало, вероятно, они представляют форшоковую активизацию.

У границ зоны 3 (на востоке и западе) зарегистрированы землетрясения с ML=5.9: 29 июля 2022 г. (51.21°N, 161.03°E, h=69 км) и 23 декабря 2023 г. (51.88°N, 159.27°E, h=48 км). Абсолютное затишье здесь наблюдалось в течение 14 месяцев (с мая 2021 г. по июнь 2022 г.) и являлось продолжением развивающейся аномалии с апреля 2020 года.

На побережье Камчатского залива (зона 5) сейсмическое затишье (*SRD*=1) наблюдается вновь с июля 2023 г. и занимает преимущественно южную часть зоны 5^{2022 г.} у Кроноцкого полуострова.

В акватории Тихого океана у глубоководного желоба (напротив зоны 4) в пределах зоны 8 в течение 13 месяцев (с июня 2022 г. по июнь 2023 г.) не было зарегистрировано ни одного землетрясения с $K_S \ge 8.5$, по июль 2023 г. отмечалось уменьшение сейсмического потока в 14 раз (*SRD*=0.93), по август 2023 г. – в ~4 раза (*SRD*=0.77).

Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2023 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят уровень сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL* и «Z-функция». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2023 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2023 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2023 г.:

– уровень сейсмичности Камчатского региона в 2023 г. по шкале «СОУС'09» – фоновый средний;

– вдоль Алеутского глубоководного желоба (район Командорских островов) продолжает наблюдаться *RTL*-аномалия;

– в районе Камчатского залива развивается Z-аномалия, она локально сосредоточена в южной части у Кроноцкого полуострова; - в районе Шипунского полуострова завершилась Z-аномалия;

– в районе Курило-Камчатского желоба напротив Шипунского полуострова завершилась *Z*-аномалия, выделяется *RTL*-аномалия;

– экстремально низкий уровень сейсмичности наблюдался в районе юго-западнее острова Беринга, где также отмечается уменьшение активности *A*₁₀.

Литература

1. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Количественный анализ сейсмичности. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2009 году. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 63–69. – EDN: UAGCRT

2. 2023-ER_App17_Kamchatka-and-Komandor-Islands.xlsx [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2023 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app 23.html, свободный.

3. База данных «Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН» [сайт]. – URL: http://www.emsd.ru/sdis/. Дата обновления 10.01.2024.

4. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.

5. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сенюков С.Л., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27. – EDN: HTUGUH

6. *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

7. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 41–64. – DOI: 10.7868/S0203030613010057. – EDN: PUASZL

8. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. – Вып. 24. – М.: Наука, 1991. – С. 19–50.

9. Коновалова А.А., Салтыков В.А. Сейсмические предвестники сильных (*M*≥6.0) землетрясений в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Вулканология и сейсмология. – 2023. – № 6. – С. 60–77. – DOI: 10.31857/S0203030623700323. – EDN: AZDSHI

10. Коновалова А.А. Проявление сейсмических аномалий перед сильными землетрясениями Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 227–281. – URL: https://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/ predv/konovalova.pdf. – EDN: PRRDKC

11. Салтыков В.А., Коновалова А.А. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2022 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 102–107. – EDN: GMEAPM