

Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко, П.В. Воронин

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящем подразделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2017 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 -, dS - и « Z -функция». Методики расчета этих параметров описаны в ежегоднике [1]. Отдельно рассмотрены параметры афтершоковых последовательностей сильных землетрясений. При расчетах использованы камчатские региональные каталоги [2, 3]. Оценка сейсмической энергии и уровня сейсмичности получены для всей зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, а остальных параметров – для района, ограниченного широтой $\varphi=50.5$ и 56.5°N , долготой $\lambda=156.0$ 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 2017 г. сейсмическая энергия составила $1.2 \cdot 10^{16}$ Дж при среднегодовом (за 56 лет) значении $3.2 \cdot 10^{15}$ Дж и медианном годовом значении $3.2 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2017 гг. (рис. П.12). Для 2017 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет 0.98 ± 0.02 .

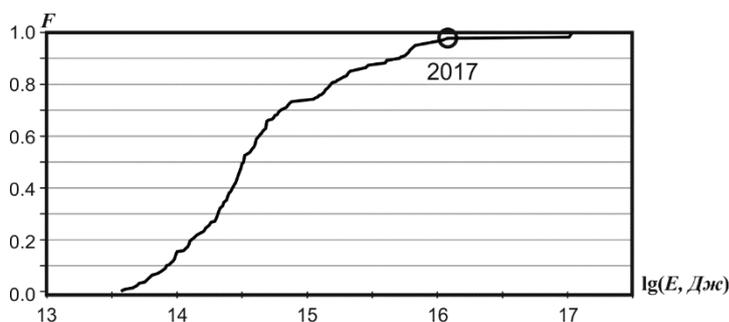


Рис. П.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в 1962–2017 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2017 г.

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: $F(K)=P(\lg E \leq K)$, где E – суммарная сейсмическая энергия в Дж [6]. Рис. П.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2017 г. в различных временных окнах. В течение 2017 г. произошло шесть землетрясений, вызвавших повышение сейсмичности до высокого и экстремально высокого уровня, из которых три (27.03.2017 г. с $M=6.3$, $K_S=14.0$; 02.06.2017 г. с $M=6.7$, $K_S=14.7$; 17.07.2017 г. в $11^{\text{h}05^{\text{m}}}$ с $M=6.1$, $K_S=13.8$) могут рассматриваться как форшоки сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. в $23^{\text{h}34^{\text{m}}}$ с $M=7.7$ [7], которое вывело сейсмичность региона на экстремально высокий уровень во временных

окнах 5–116 суток. Вторым землетрясением, обеспечившим экстремально высокий уровень сейсмичности, но на более коротком временном интервале, стало Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M=6.9$, $K_s=15.0$ [8].

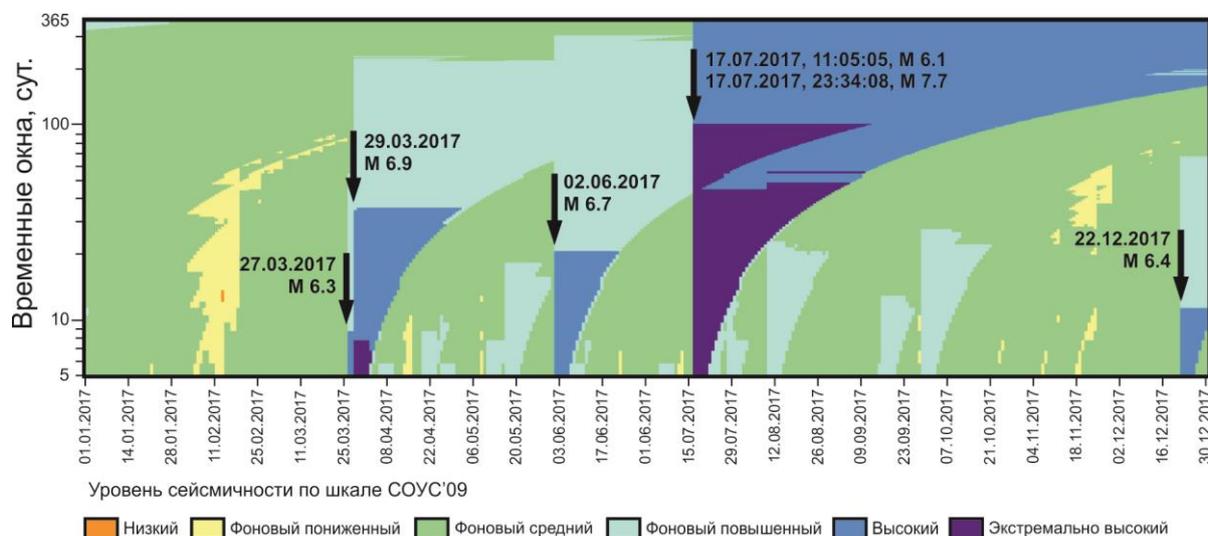


Рис. П.13. Временной ход уровня сейсмичности в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в различных временных окнах в 2017 г.

Помимо этого, оценка уровня сейсмичности рассчитана в пространственных областях, определенных в соответствии с регионализацией сейсмоактивного объема Камчатки и прилегающих территорий [9], учитывающей тектоно-географическое положение землетрясений. В табл. П.2 приведены оценки для шести (где возможны статистические оценки) из десяти выделенных зон и для четырех подрегионов Камчатки, определяемых географическим положением.

Таблица П.2. Оценка уровня сейсмичности в 2017 г. для различных пространственных областей сейсмоактивной зоны Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$1.1 \cdot 10^{12}$	0.40 ± 0.07	фоновый средний
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$2.2 \cdot 10^{14}$	0.76 ± 0.06	фоновый средний
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$5.2 \cdot 10^{13}$	0.48 ± 0.07	фоновый средний
Корякский сейсмический пояс	$1.0 \cdot 10^{15}$	0.96 ± 0.05	фоновый повышенный
Командорский сегмент Алеутской дуги	$1.3 \cdot 10^{16}$	1	экстремально высокий
Континентальные области Камчатки	$9.5 \cdot 10^9$	0.09 ± 0.04	фоновый пониженный
Камчатский залив	$2.7 \cdot 10^{12}$	0.18 ± 0.05	фоновый средний
Кроноцкий залив	$2.0 \cdot 10^{14}$	0.98 ± 0.02	высокий
Авачинский залив	$3.5 \cdot 10^{13}$	0.78 ± 0.06	фоновый средний
Юг Камчатки (от мыса Лопатка до Авачинского залива)	$2.2 \cdot 10^{12}$	0.27 ± 0.06	фоновый средний

Наиболее сильные землетрясения 2017 г. произошли за пределами традиционно исследуемой сейсмоактивной зоны Камчатского региона (рис. П.14 а). Параметры этих землетрясений представлены в табл. П.3.

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 [10]. Карта эпицентров независимых землетрясений 2017 г. представлена на рис. П.14 б.

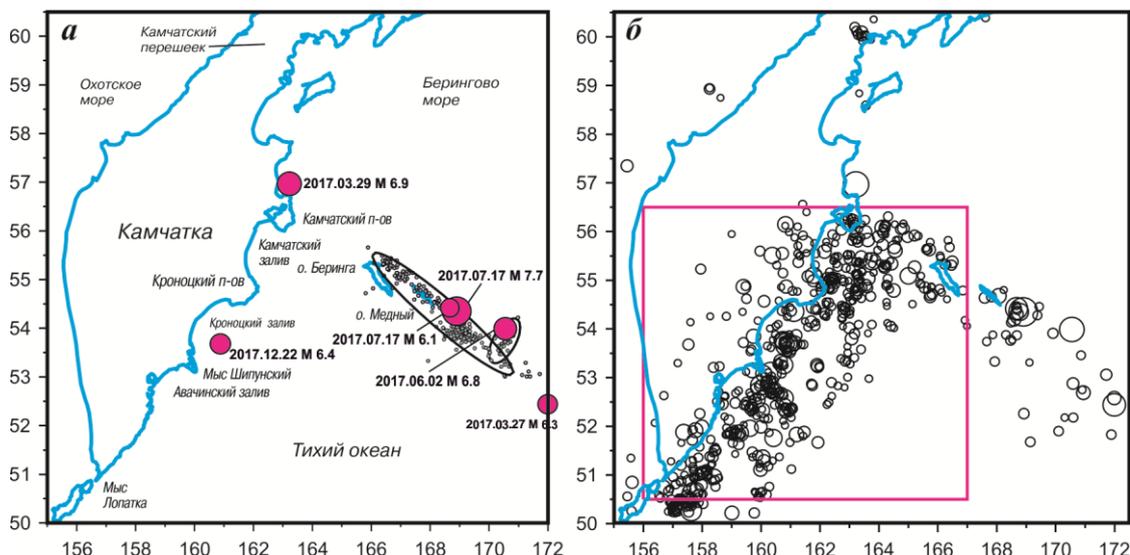


Рис. П.14. Сейсмичность Камчатки в 2017 г.: а – эпицентры сильных землетрясений с $M \geq 6$; б – эпицентры независимых землетрясений с $K_s = 9-14$. Красным квадратом отмечена наиболее сейсмоактивная зона

Таблица П.3. Землетрясения с $M \geq 6$, произошедшие в Камчатском регионе в 2017 г.

Дата дд.мм.гггг	Время	K_s	M	φ , °N	λ , °E	h , км	Район
27.03.2017	10:50:18	14.0	6.3	52.44	171.99	60	Восточнее Командорских островов
29.03.2017	04:09:22	15.0	6.9	56.97	163.22	43	Северная акватория Камчатского п-ова
02.06.2017	22:24:46	14.7	6.7	53.99	170.55	32	Восточнее Командорских островов
17.07.2017	11:05:05	13.8	6.1	54.42	168.67	28	Восточнее Командорских островов
17.07.2017	23:34:08	16.1	7.7	54.35	168.90	7	Восточнее Командорских островов
22.12.2017	14:44:16	14.2	6.4	53.68	160.88	69	Кроноцкий залив

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2017 г. равен 0.50 ± 0.02 , что соответствует среднегодовому значению 0.498 ± 0.003 . Карты площадного распределения наклона графика повторяемости землетрясений γ представлены на рис. П.15. Областью расчета значений является круг радиусом 150 км. Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест. Статистическая значимость уменьшения γ в районе Кроноцкого залива и увеличения на юге Камчатки – на уровне $\alpha = 0.05$.

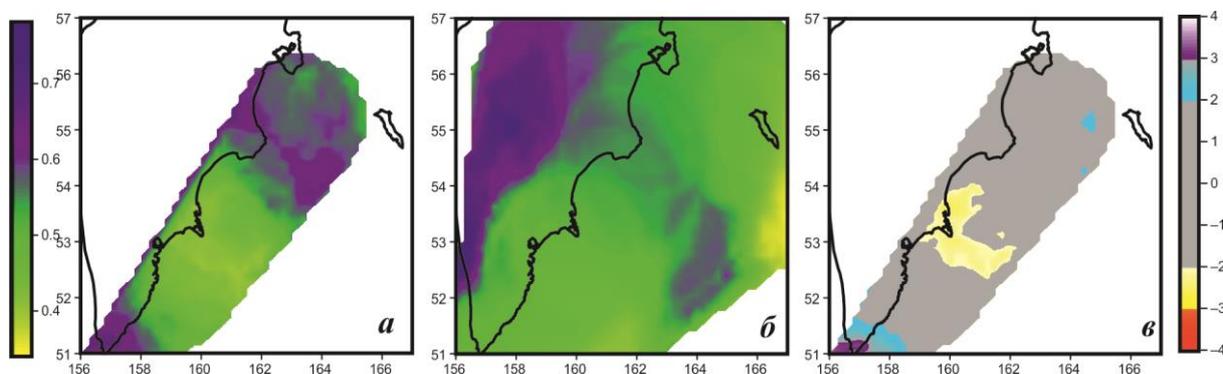


Рис. П.15. Средние значения наклона графика повторяемости γ в 2017 г. (а) и 1962–2017 гг. (б), изменение γ в 2017 г. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение (в)

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по указанному району активность A_{10} в 2017 г. составила 0.239 ± 0.007 при среднемноголетнем значении 0.276 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего на $\sim 13\%$. 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.16. Распределение активности A_{10} в 2017 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Кроноцкого, Шипунского полуостровов, Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов, при этом восточнее Кроноцкого и Камчатского заливов активность превысила средние значения.

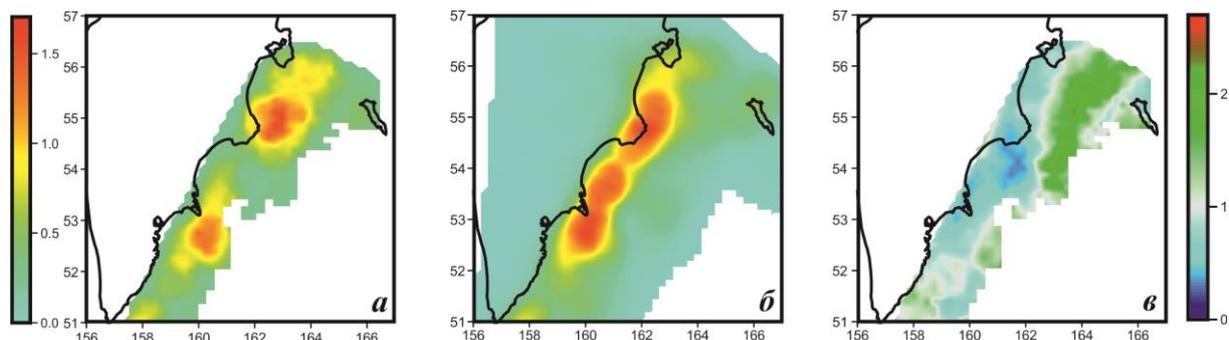


Рис. II.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2017 г. (а) и 1962–2017 гг. (б). Активность A_{10} в 2017 г., нормированная на многолетнюю активность (в)

Мониторинг параметров RTL и dS

На рис. II.17 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2017 г. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–100 км. Штриховой линией отмечена область надежного определения параметра RTL . Для характерной точки аномалии рассчитан временной ход параметра RTL (рис. II.19). Аномалия на побережье Камчатского залива проявилась в начале 2015 г., в январе 2016 г. параметр RTL находился в минимуме, а в июле 2017 г. вышел на фоновый уровень.

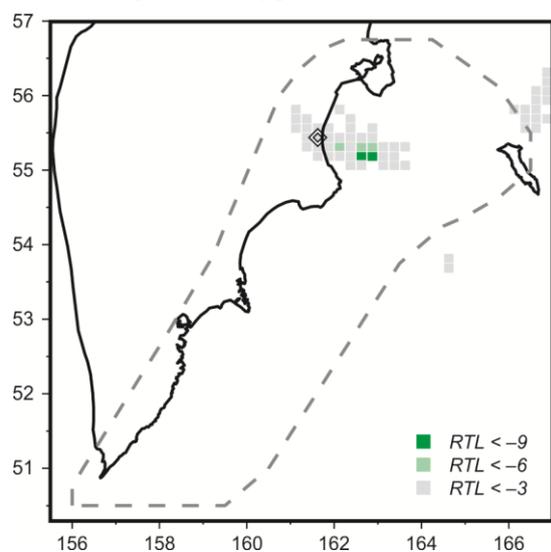


Рис. II.17. Минимальные значения RTL -параметра в 2017 г.

Ромбом отмечена характерная точка аномалии сейсмического затишья, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

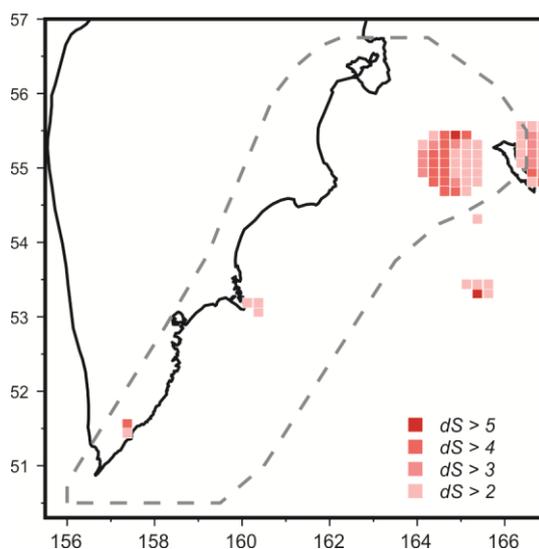


Рис. II.18. Значения dS -параметра, рассчитанные на декабрь 2017 г.

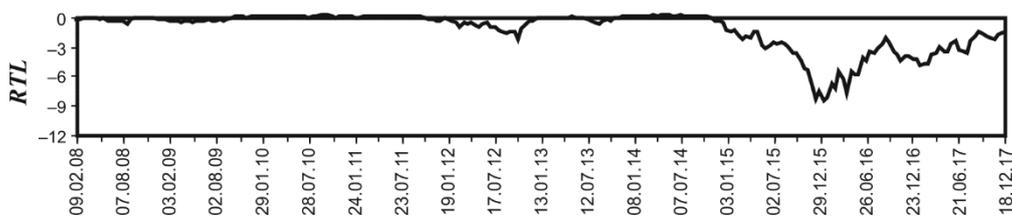


Рис. П.19. Временной ход RTL -параметра в характерной точке аномалии (рис. П.17)

На следующем за RTL -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии, согласно методике Г.А. Соболева [11], должна проявиться форшоковая активизация.

Карта вариаций площади сейсмогенных разрывов dS в 2017 г. показана на рис. П.18. Область повышенных значений dS соседствует с аномалией сейсмического затишья по параметру RTL (рис. П.17).

Выявление сейсмических затиший по методу « Z -функция»

В 2017 г. в сейсмоактивной области Камчатки представляли интерес три пространственные области сейсмического затишья, выделенные с помощью « Z -функции» (рис. П.20 а). Землетрясение 29 марта с $M=6.9$ произошло в пределах сейсмической аномалии (зона II), в которой в течение 2015 г. отмечалось абсолютное сейсмическое затишье (на глубинах до 70 км не было зафиксировано ни одного землетрясения с энергетическим классом $K_S \geq 8.5$). Эпицентр землетрясения 22 декабря ($M=6.4$) лежит на границе долгоживущей аномалии (зона I), в которой в течение 15 месяцев с января 2015 г. до марта 2016 г. наблюдалось уменьшение уровня сейсмичности в 11 раз ($SRD=0.91$). В зоне III отмечается уменьшение уровня сейсмичности в 8 раз ($SRD=0.875$) в течение 19 месяцев с августа 2015 г. по февраль 2017 года.

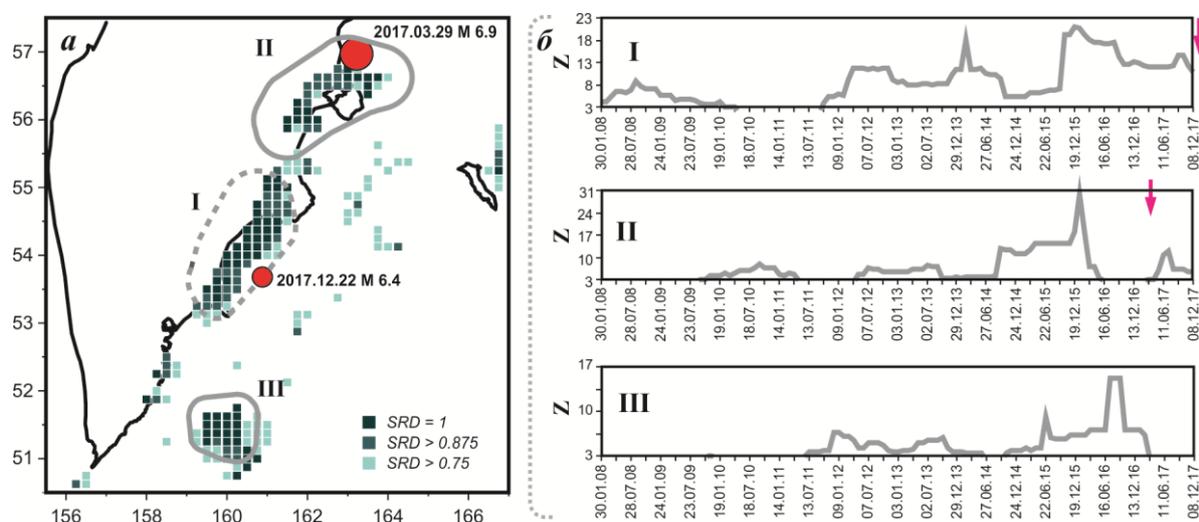


Рис. П.20. Карта значений $SRD > 0.75$ в течение 2017 г. (а) и зависимости $Z(t)$ для зон сейсмического затишья в скользящем окне шириной 12 месяцев (б).

Отмечены эпицентры и моменты землетрясений 2017 г. с $M \geq 6$

Аномалии сейсмических затиший перед землетрясениями 2 июня 2017 г. с $M=6.7$ и 17 июля 2017 г. с $M=7.7$

На рис. П.21 а показаны аномалии сейсмических затиший перед землетрясениями 2 июня ($M=6.7$) и 17 июля ($M=7.7$), выделенные ретроспективно по RTL - и Z -методикам. Сейсмическое затишье по параметру RTL показано в виде карты минимальных значений RTL за время развития аномалии, область абсолютного сейсмического затишья по Z -функции оконтурена сплошной линией. На рис. П.21 б представлены графики временного хода параметра RTL в характерной точке аномалии (отмечена ромбом)

и функции $Z(t)$, рассчитанной для временного окна 1 год. Затишье по параметру RTL продолжалось с февраля 2014 г. по февраль 2015 года. Землетрясения произошли на краю аномалии спустя 2.5 года после выхода значений RTL на фоновый уровень. Одновременно с RTL -аномалией проявилось затишье, определяемое Z -функцией. В области, околнуренной сплошной линией, в течение 2014 г. уровень сейсмического потока был более чем в 8 раз ниже фонового. Помимо этого, сейсмическое молчание проявилось непосредственно перед землетрясением 17.07.2017 г. – в течение 13 месяцев, с июля 2016 г. и вплоть до землетрясения, в пределах Z -аномалии не произошло ни одного землетрясения с $K_s \geq 8.5$.

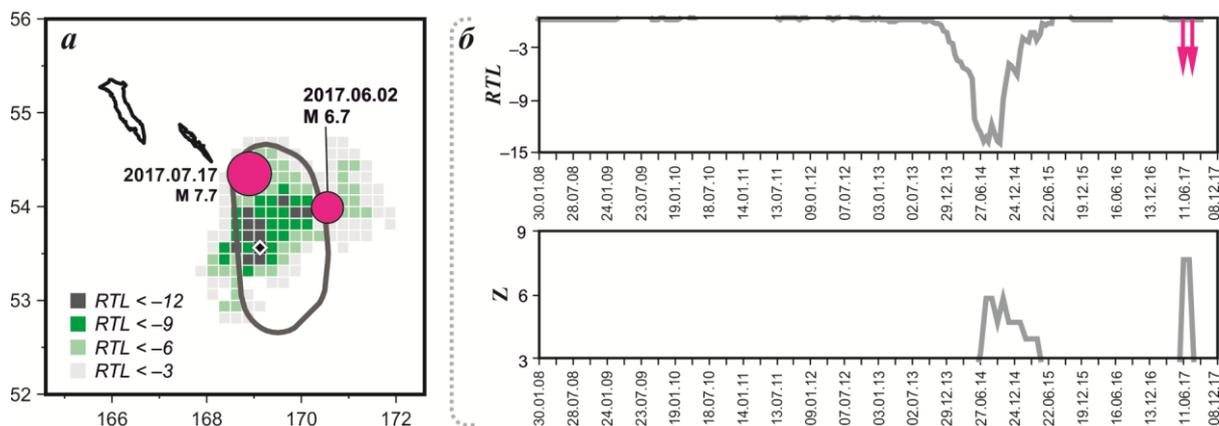


Рис. П.21. Схема расположения RTL - и Z -аномалий перед землетрясениями 02.06.2017 г. и 17.07.2017 г. (а) и графики временного хода RTL -параметра и Z -функции, рассчитанные для этих аномалий (б).

Отмечены эпицентры землетрясений на схеме и моменты их возникновения на графике

Параметры афтершоковых последовательностей

На рис. П.22 показаны афтершоковые последовательности 2017 г. с числом событий в группе не менее десяти, выделенные в очаговых областях землетрясений с учетом порогового значения K_s , определяющего уровень представительности каталога в каждом отдельном случае.

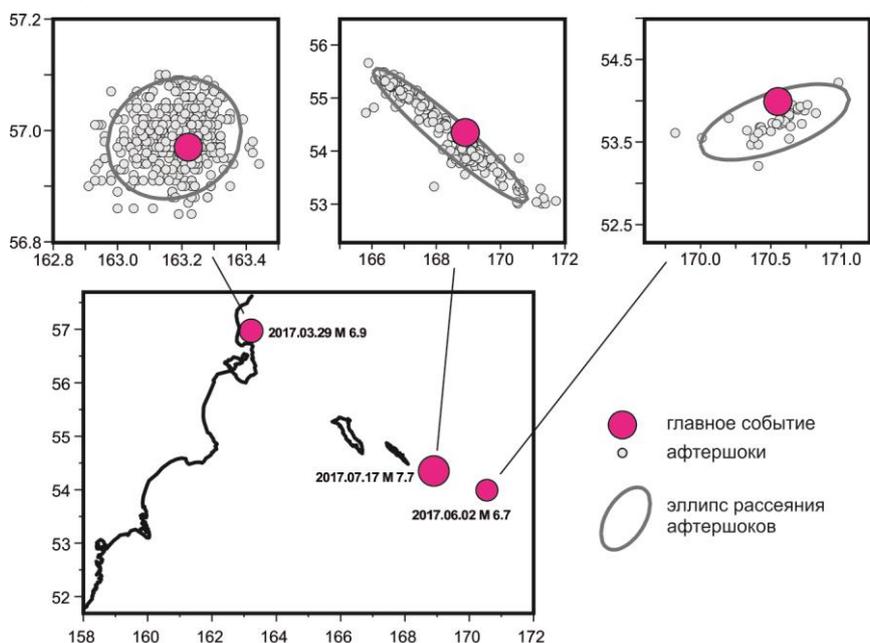


Рис. П.22. Эпицентры землетрясений и соответствующие афтершоковые последовательности. Показаны эллипсы рассеяния, содержащие 90% событий группы

Размер очага землетрясения определяется эллипсом рассеяния афтершоков, содержащим 90% от их общего количества. Детальное рассмотрение временного хода афтершоковых процессов позволяет выделить в них несколько характерных стадий. Рассматривается гиперболический закон убывания афтершоков $dN/dt=A/t$, затухающий афтершоковый процесс по закону Омори $dN/dt=A/t^p$, убывание афтершоков по экспоненциальному закону $dN/dt=A \exp(-bt)$. Вычисляются параметры функций, аппроксимирующих режим афтершоковой последовательности наилучшим образом. Помимо параметра A , характеризующего интенсивность потока землетрясений с энергией, большей порогового значения K_s , вычисляется значение параметра $A_{пр}$, соответствующее потоку землетрясений с энергетическим классом ≥ 8.5 .

$$A_{пр} = A \cdot 10^{-\gamma(K_s - 8.5)}, \text{ где } \gamma - \text{наклон графика повторяемости афтершоков.}$$

Характерные фазы развития афтершоковых процессов представлены на рис. П.23. За начало отсчета взято время основного события. Приведены кумулятивные кривые числа землетрясений. Обозначены временные границы фаз, указан характер убывания интенсивности афтершоков с величинами параметров. Отмечены наиболее сильные афтершоки. В случае экспоненциального затухания оценена длительность афтершокового процесса как интервал времени $T=3/b$.

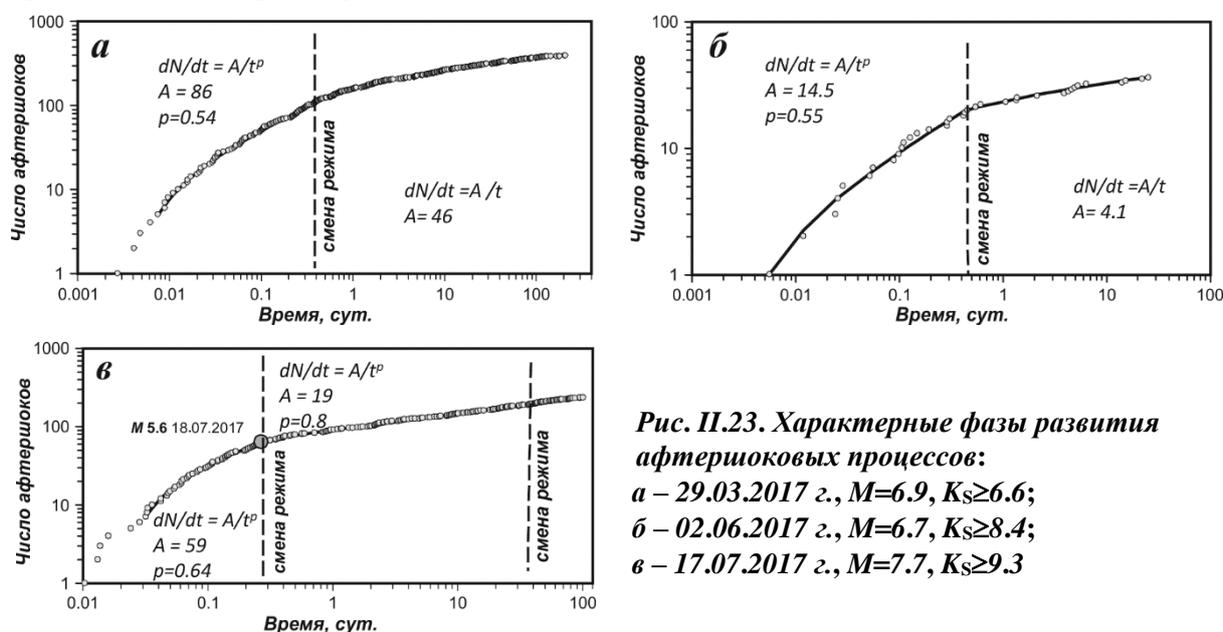


Рис. П.23. Характерные фазы развития афтершоковых процессов:
а – 29.03.2017 г., $M=6.9$, $K_s \geq 6.6$;
б – 02.06.2017 г., $M=6.7$, $K_s \geq 8.4$;
в – 17.07.2017 г., $M=7.7$, $K_s \geq 9.3$

Параметры афтершоковых последовательностей представлены в табл. П.4. Приведены дата, энергетические характеристики (энергетический класс K_s и магнитуда M) и координаты гипоцентра главного события; параметры эллипса рассеяния афтершоков (географические координаты центра, большая a и малая b полуоси в км, азимут α большой оси эллипса); параметры характерных стадий (закон убывания афтершоков, параметры A и $A_{пр}$, коэффициент b для экспоненциального закона, показатель p при затухании по закону Омори, длительность стадии Δt , число землетрясений n , энергетический порог K_s и длительность всего афтершокового процесса T).

Заключение

На основе региональных каталогов землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2017 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL -, dS - и « Z -функция». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2017 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2017 гг.).

Таблица П.4. Параметры афтершоковых последовательностей, произошедших в Камчатском регионе в 2017 г.

№	Дата, φ, °N, λ, °E, h, км, K _S , M главного события	Эллипс рассеяния φ, °N, λ, °E, a, км; b, км; α, °	Стадии афтершокового процесса	Длит. T, сут.	Комментарии, особенности
1	29.03.2017 56.97°N, 163.22°E, 43 км K _S =15.0, M=6.9	56.99°N, 163.18°E, 13 км; 12 км; 35°	1. Неустановившийся режим Δt ~ 10 мин, n=4	~210	K _S ≥6.6 Рис. П.23 а
			2. Закон Омори, A=86, A _{пр} =19, p=0.54, Δt ~ 9 час, n=102		
			3. Гипербола, A=46, A _{пр} =10, Δt ~ 210 сут, n=280		
2	02.06.2017 53.99°N, 170.55°E, 32 км K _S =14.7, M=6.7	53.74°N, 170.53°E, 55 км; 24 км; 28°	1. Закон Омори, A=14.5, A _{пр} =13.3, p=0.55, Δt ~ 10 час, n=19	~25	K _S ≥8.4 Рис. П.23 б
			2. Гипербола, A=4.1, A _{пр} =3.7, Δt ~ 25 сут, n=17		
3	17.07.2017 54.35°N, 168.9°E, 7 км K _S =16.1, M=7.7	54.3°N, 168.43°E, 204 км; 32 км; -42°	1. Неустановившийся режим Δt ~ 40 мин, n=6	T = $\frac{3}{b}$ ~92	K _S ≥9.3 Окончание 2 стадии совпа- дает по времени с сильным аф- тершоком с M=5.6. Рис. П.23 в
			2. Закон Омори, A=59, A _{пр} =162, p=0.64, Δt ~ 6 час, n=56		
			3. Неустановившийся режим Δt ~ 3 час, n=11		
			4. Закон Омори, A=19, A _{пр} =53, p=0.81, Δt ~ 33 сут, n=115		
			5. Экспонента, A=163, A _{пр} =447, b=0.03, Δt ~ 60 сут, n=46		

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2017 г.:

- на севере сейсмоактивной зоны в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова завершились Z- и RTL-аномалии, наблюдается снижение активности A₁₀;
- в районе Кроноцкого залива и мыса Шипунского продолжается многолетняя Z-аномалия, отмечаются пониженные значения активности A₁₀ и наклона графика повторяемости γ;
- на юге Камчатки наблюдалась Z-аномалия, повышенные значения активности A₁₀, повышенные значения γ в районе мыса Лопатка.

Рассмотрены Z- и RTL-аномалии сейсмического затишья, предшествующие сильным землетрясениям 2017 года. Землетрясения произошли в интервале времени до 2.5 лет после затиший, их эпицентры приурочены к границам аномалий.

Проанализированы афтершоковые последовательности, сопровождавшие сильные землетрясения. Показано, что афтершоковые процессы состоят из нескольких характерных стадий, параметры которых приведены.

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. 58–62.
2. Part_IV-2017. 11_Kamchatka-and-Komandor-Islands_2017.xls // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD-ROM.
3. База данных «Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН» [сайт]. – URL: <http://www.emsd.ru/sdis/>. – Дата обновления 10.11.2018.

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., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27.
6. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
7. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$ на границе Командорской сейсмической брешы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2017. – № 3, вып. 35. – С. 22–25.
8. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Воропаев П.В., Гусев А.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Иванова Е.И., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Скоркина А.А., Серафимова Ю.К. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M_w=6.6$, $K_s=15.0$, $I=6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2017. – № 3, вып. 35. – С. 7–21.
9. 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.
10. 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.
11. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4/5. – С. 63–72.