

Количественный анализ сейсмичности Камчатки

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

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2016 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]. Оценки сейсмичности сделаны 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 2016 г. сейсмическая энергия составила $6 \cdot 10^{15}$ Дж при среднегодовом (за 55 лет) значении $6.7 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.8 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2016 гг. (рис. II.12). Для 2016 г. функция распределения сейсмической энергии составляет 0.98 ± 0.02 .

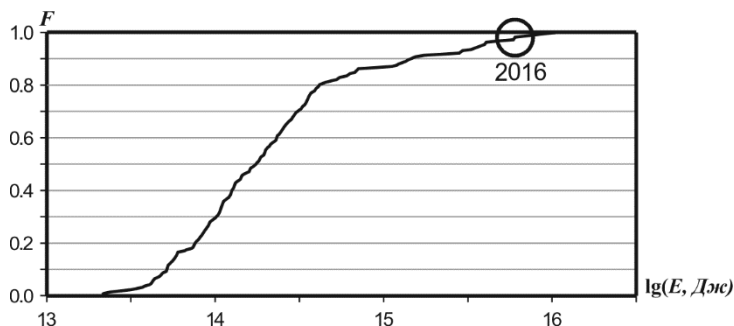


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962–2016 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2016 г.

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. II.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2016 г. в различных временных окнах. Отмечается снижение регионального уровня сейсмичности до экстремально низкого во временных окнах от 5 до 20 суток за месяц до землетрясения 30 января с магнитудой $M=7.4$. Также наблюдалось снижение региональной сейсмичности до низкого и экстремально низкого уровня в окнах от 5 до 80 суток перед серией землетрясений с $M=5.2$ – 5.9 в ноябре 2016 года.

Помимо этого, оценка уровня сейсмичности рассчитывалась в пространственных областях, определенных в соответствии с регионализацией сейсмоактивного объема Камчатки и прилегающих территорий [7], учитывающей тектоно-географическое

положение землетрясений. В табл. II.2 приведены оценки для шести (для которых возможны статистические оценки) из десяти выделенных зон и для четырех подрегионов Камчатки, определяемых географическим положением.

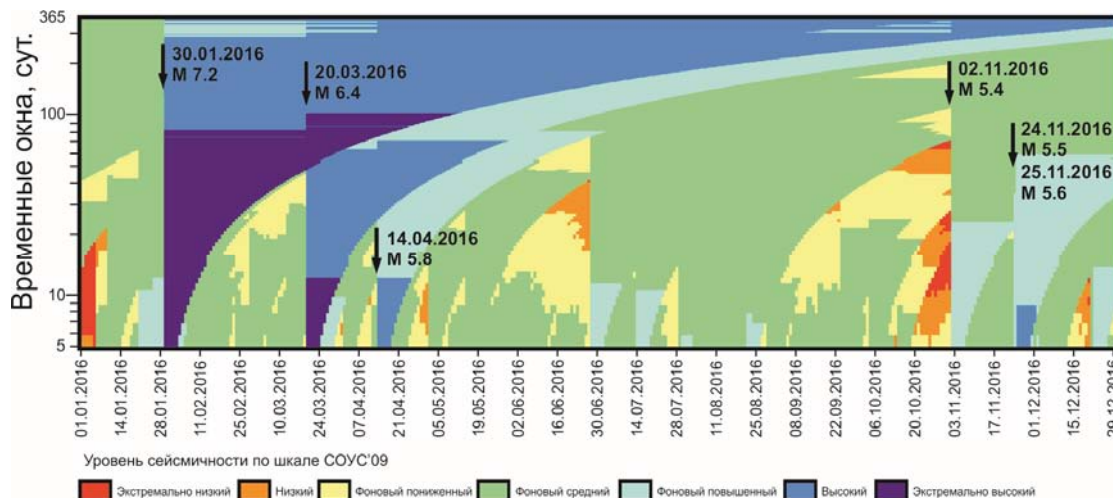


Рис. II.13. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах в 2016 г.

Таблица II.2. Оценка уровня сейсмичности в 2016 г. для различных пространственных областей сейсмоактивной зоны Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	F ($\lg E$)	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$1.01 \cdot 10^{13}$	0.74 ± 0.06	фоновый средний
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$5.94 \cdot 10^{15}$	0.98 ± 0.02	высокий
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$2.39 \cdot 10^{13}$	0.22 ± 0.06	фоновый средний
Корякский сейсмический пояс	$3.23 \cdot 10^{12}$	0.84 ± 0.05	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$1.35 \cdot 10^{14}$	0.89 ± 0.04	фоновый повышенный
Континентальные области Камчатки	$3.98 \cdot 10^{12}$	0.91 ± 0.04	фоновый повышенный
Камчатский залив	$3.10 \cdot 10^{12}$	0.19 ± 0.06	фоновый средний
Кроноцкий залив	$1.15 \cdot 10^{14}$	0.98 ± 0.02	высокий
Авачинский залив	$5.26 \cdot 10^{12}$	0.23 ± 0.06	фоновый средний
Юг Камчатки (от мыса Лопатка до Авачинского залива)	$1.07 \cdot 10^{13}$	0.60 ± 0.07	фоновый средний

Наиболее сильные землетрясения 2016 г. произошли в узкой полосе широт $53.5\text{--}54.5^\circ\text{N}$ (рис. II.14 а). 30 января на глубине 178 км с эпицентром на материковой части произошло землетрясение с $M=7.4$ ($ML=7.1$). Эпицентры трех землетрясений с $ML \geq 6$ (20 марта с $ML=6.7$, 14 апреля с $ML=6.2$ и 25 ноября с $ML=6.0$) приходятся на акваторию Кроноцкого залива. Землетрясение с $ML=6.3$ произошло 5 сентября восточнее о. Медный за пределами традиционно исследуемой наиболее сейсмоактивной зоны Камчатки. Параметры этих землетрясений представлены в табл. II.3. Приведены дата, энергетический класс K_s , магнитуды M и ML , координаты гипоцентра из [2, 8].

Таблица II.3. Землетрясения с $ML \geq 6.0$, произошедшие в камчатском регионе в 2016 г.

Дата	M	K_s	ML	φ , °N	λ , °E	h , км
30.01.2016	7.4	15.7	7.1	53.85	159.04	178
20.03.2016	6.9	14.9	6.7	54.14	163.14	43
14.04.2016	6.2	13.9	6.2	53.66	161.11	48
05.09.2016	6.3	14.0	6.3	54.42	168.53	34
25.11.2016	5.9	13.5	6.0	54.30	160.94	92

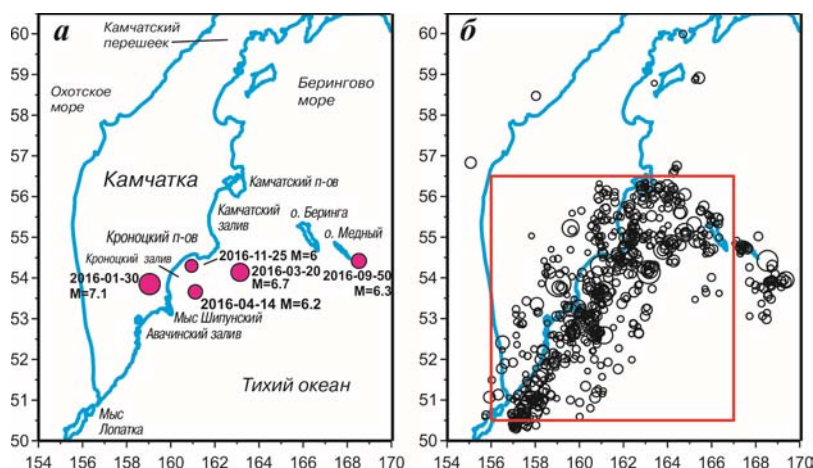


Рис. П.14. Сейсмичность Камчатки в 2016 г.:

а – эпицентры сильных землетрясений $ML \geq 6$; *б* – эпицентры независимых землетрясений с $K_s=9-14$. Отмечена наиболее сейсмоактивная зона

Роевая активность в 2016 г. была незначительной. Число группируемых землетрясений составило 9% от общего количества сейсмических событий. Рои с числом группируемых событий ≥ 10 с энергетическими классами выше 8.5 не выделены.

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 [9]. Карта эпицентров независимых землетрясений 2016 г. представлена на рис. П.14 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2016 г. равен 0.50 ± 0.02 при среднемноголетнем значении 0.498 ± 0.003 . Карты площадного распределения наклона графика повторяемости землетрясений γ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 100 км, представлены на рис. П.15. Для выделения наиболее значимых аномалий приведены результаты за 2014–2016 гг. На фоне среднего в целом для региона значения γ в 2014–2016 гг. выделяются увеличение γ на юге Камчатки у мыса Лопатка и уменьшение в районе Камчатского полуострова. Статистическая достоверность упомянутых аномалий – на уровне значимости $\alpha=0.05$ (рис. П.15 в).

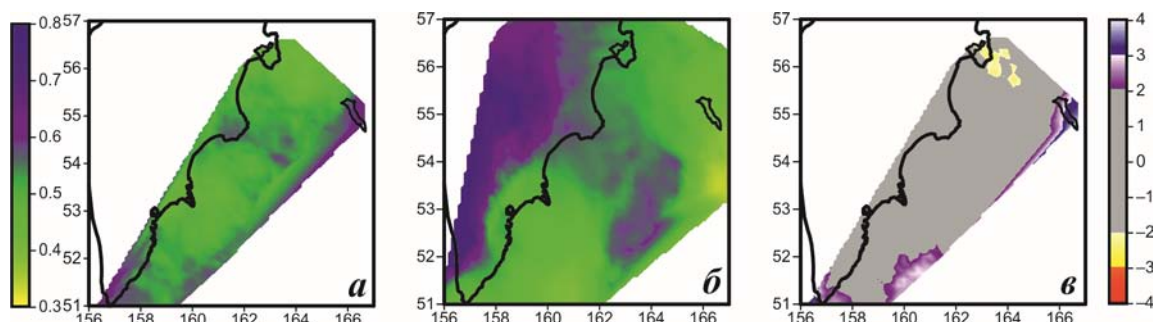


Рис. П.15. Средние значения наклона графика повторяемости γ в 2014–2016 гг. (*а*) и 1962–2016 гг. (*б*). Изменение γ в 2014–2016 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на средноквадратичное отклонение (*в*)

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по указанному району активность A_{10} в 2016 г. составила 0.261 ± 0.007 при среднемноголетнем значении 0.276 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего на $\sim 5\%$. 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 2016 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Кроноцкого полуострова, мыса Шипунского, Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов, при этом восточнее этих заливов и на юге Камчатки активность превысила средние значения.

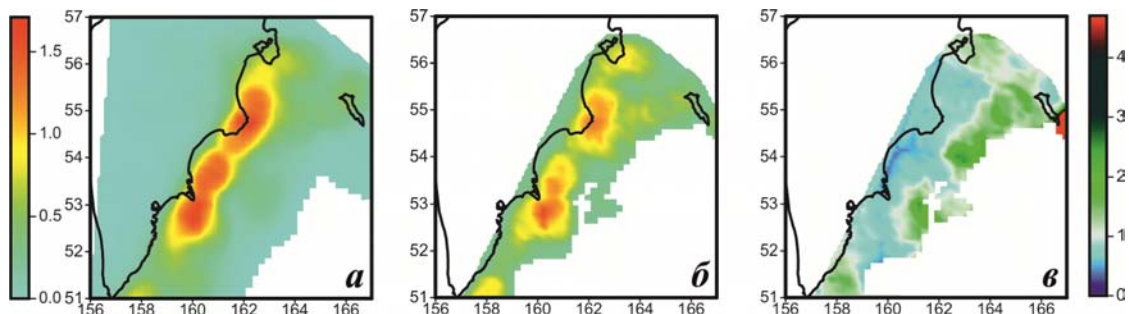


Рис. II.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 1962–2016 гг. (а) и 2016 г. (б), относительная сейсмическая активность A_{10} в 2016 г. по сравнению со средней многолетней активностью (в)

Мониторинг параметров RTL и dS

На рис. II.17 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2016 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 еще в начале 2015 г., к концу года параметр RTL находился в минимуме, в настоящее время затишье продолжает развиваться.

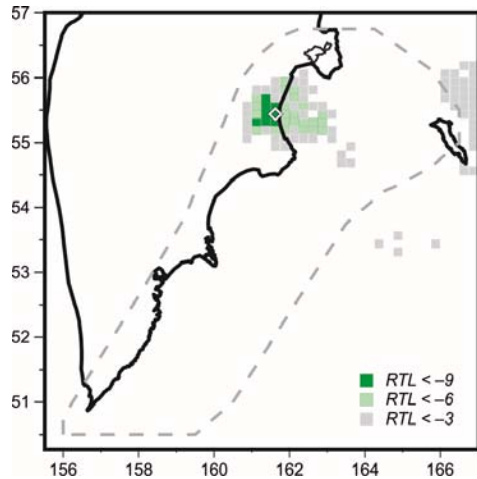


Рис. II.17. Минимальные значения RTL -параметра в 2016 г.

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

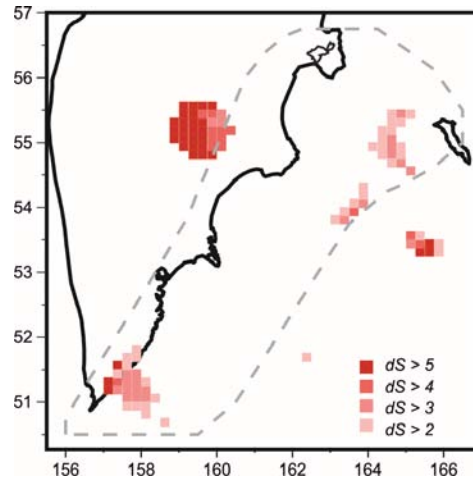


Рис. II.18. Значения dS -параметра, рассчитанные на декабрь 2016 г.

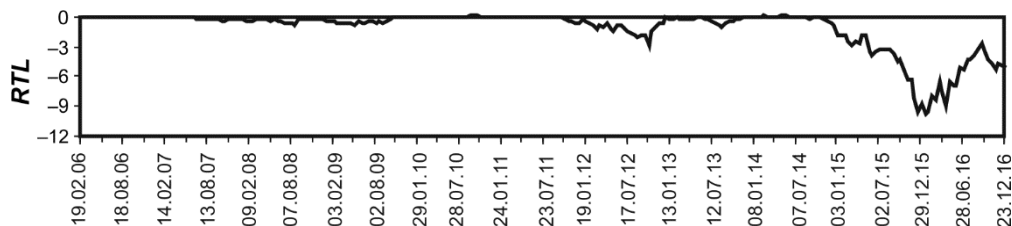


Рис. II.19. Временной ход RTL -параметра в характерной точке аномалии (рис. II.17)

На следующем за *RTL*-аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности *RTL*-аномалии, согласно методике Г.А. Соболева [10], должна проявиться форшоковая активизация.

Карта вариаций площади сейсмогенных разрывов dS в 2016 г. показана на рис. II.18. Область повышенных значений dS на материковой части Камчатки при- мыкает к аномалии сейсмического затишья по параметру *RTL* (рис. II.17). Сейсмиче- ская активизация западнее о. Беринга обусловлена землетрясением 25.11.2016 г. с $ML=6.0$. Следует отметить, что это землетрясение произошло на границе аномалии сейсмического затишья, выделенного в 2015 г. севернее о. Беринга [11]. Аномалия про- должалась чуть более года (с августа 2014 г. по сентябрь 2015 г.), землетрясение 25.11.2016 г. произошло спустя 15 месяцев после выхода *RTL* на фоновые значения. Эпицентр этого землетрясения приходится также на границу аномалии сейсмической активизации по параметру dS [11].

Выявление сейсмических затиший по методу «*Z*-функция»

Сейсмические затишья, выделенные с помощью «*Z*-функции» в течение 2014–2015 гг. [11], можно рассматривать как предвестниковые аномалии для землетрясений 2016 г. с $ML \geq 6$. Эпицентры землетрясений 30.01.2016 г. ($ML=7.1$), 14.04.2016 г. ($ML=6.2$) и 25.11.2016 г. ($ML=6.0$) лежат в пределах и на границе зоны I, в которой наблюдалось уменьшение скорости сейсмического потока в восемь раз в течение всего 2015 года. Землетрясение 20.03.2016 г. с $ML=6.7$ произошло на краю области абсолютного сейсмического затишья (зона IV) спустя десять месяцев после его окончания.

В 2016 г. в сейсмоактивной области Камчатки с помощью «*Z*-функции» были вы- делены три пространственные области сейсмического затишья, которые показаны на карте максимальных значений статистически значимого ($Z > 3$) уменьшения скорости сейсмического потока *SRD* в течение 2016 г. (рис. II.20 а). Области абсолютного сей- смического затишья в течение не менее года оконтурены сплошной линией, уменьше- ния скорости сейсмического потока не менее чем в восемь раз – пунктиром. Для каж- дой из выделенных зон в скользящем временном окне 12 месяцев рассчитан временной ход функции $Z(t)$ (рис. II.20 б). В зоне I уменьшение скорости сейсмического потока в 11 раз ($SRD=0.91$) наблюдалось в течение 15 месяцев – с начала 2015 г. до марта 2016 года. В зоне II не было зафиксировано ни одного землетрясения с $K_s \geq 8.5$ в тече- ние 2015 г. до февраля 2016 года. В зоне III абсолютное сейсмическое затишье отмече- но с августа 2015 г. по сентябрь 2016 года.

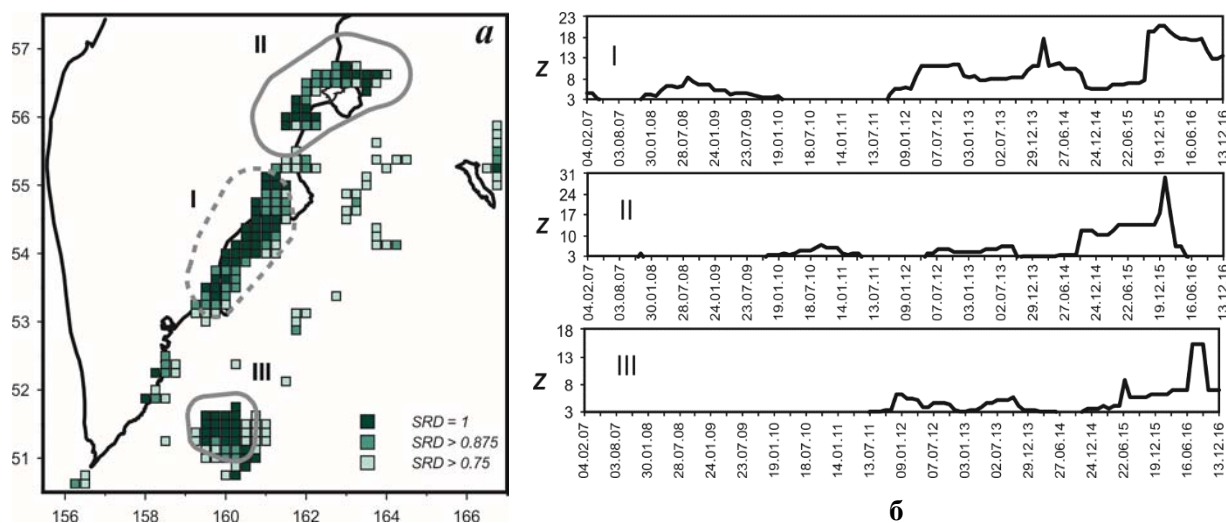


Рис. II.20. Карта значений $SRD > 0.75$ в течение 2016 г. (а) и зависимости $Z(t)$ для зон сейсмического затишья в скользящем окне шириной 12 месяцев

Параметры афтершоковых последовательностей

На рис. П.21 показаны афтершоковые последовательности 2016 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. 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. Рассматриваются гиперболический закон убывания афтершоков $dN/dt=A/t^p$, затухающий афтершоковый процесс по закону Омори $dN/dt=A/t^p$, а также убывание афтершоков по экспоненциальному закону $dN/dt=A \exp(-bt)$.

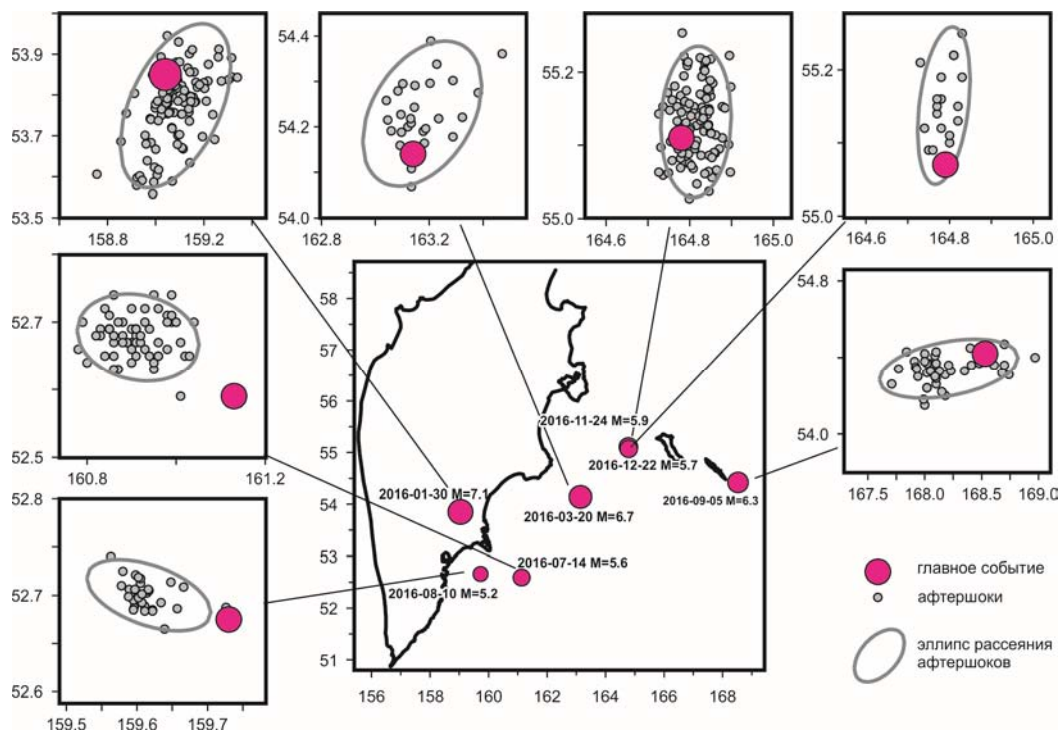


Рис. П.21. Эпицентры землетрясений и соответствующие афтершоковые последовательности.
Показаны эллипсы рассеяния, содержащие 90% событий группы

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 $K_s \geq 8.5$:

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

Характерные фазы развития афтершоковых процессов представлены на рис. П.22. 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 интервала времени $T=3/b$. Параметры афтершоковых последовательностей представлены в табл. П.4.

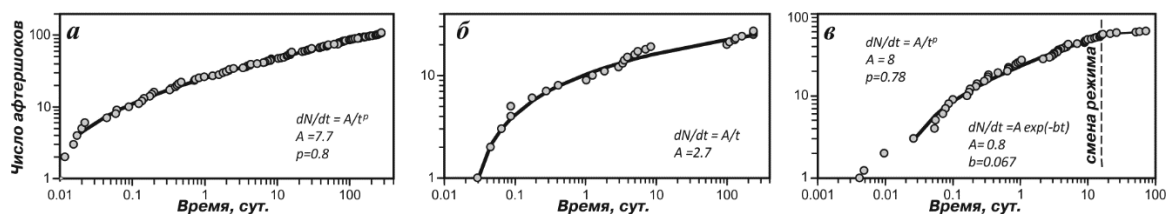




Рис. П.22. Характерные фазы развития афтершоковых процессов:

а – 30.01.2016, $ML=7.1$, $K_S \geq 7.0$; б – 20.03.2016, $ML=6.7$, $K_S \geq 7$; в – 14.07.2016, $ML=5.6$, $K_S \geq 6.7$; д – 05.09.2016, $ML=6.3$, $K_S \geq 8.3$; е – 24.11.2016, $ML=5.9$, $K_S \geq 7$; ж – 22.12.2016, $ML=5.7$, $K_S \geq 6.4$

Таблица П.4. Параметры афтершоковых последовательностей, произошедших в камчатском регионе в 2016 г.

№	Дата, φ , °N, λ , °E, h , км, K_S , ML главного события	Эллипс рассеяния φ , °N, λ , °E, a , км; b , км; α , °	Стадии афтершокового процесса	Длит. T , сут.	Комментарии, особенности
1	30.01.2016 53.85°N, 159.04°E, 178 км $K_S=15.7$, $ML=7.1$	53.77°N, 159.08°E, 24 км; 12 км; 25°	1. неустановившийся режим $\Delta t \sim 20$ мин., $n=3$ 2. закон Омори, $A=7.7$, $A_{np}=2.1$, $p=0.8$, $\Delta t \sim 270$ сут., $n=104$	~ 270	$K_S \geq 7.0$. Рис. П.22 а
2	20.03.2016 54.14°N, 163.14°E, 43 км $K_S=14.9$, $ML=6.7$	54.23°N, 163.17°E, 19 км; 12 км; 30°	гипербола, $A=2.7$, $A_{np}=1$, $\Delta t \sim 240$ сут., $n=27$	~ 240	$K_S \geq 6.7$. Рис. П.22 б
3	14.07.2016 52.59°N, 161.13°E, 45 км $K_S=12.6$, $ML=5.6$	52.68°N, 160.91°E, 9 км; 7 км; -73°	1. неустановившийся режим $\Delta t \sim 30$ мин., $n=2$ 2. закон Омори, $A=8.1$, $A_{np}=0.8$, $p=0.78$, $\Delta t \sim 16$ сут., $n=54$ 3. экспонента, $A=0.79$, $A_{np}=0.08$, $b=0.067$, $\Delta t \sim 56$ сут., $n=5$	$T = \frac{3}{b}$ ~ 45	$K_S \geq 6.7$. Рис. П.22 в
4	10.08.2016 52.66°N, 159.73°E, 50 км $K_S=11.8$, $ML=5.2$	52.68°N, 159.62°E, 6 км; 3 км; -71°	1. неустановившийся режим $\Delta t \sim 15$ мин., $n=1$ 2. закон Омори, $A=13.7$, $A_{np}=2.4$, $p=0.56$, $\Delta t \sim 16$ час., $n=24$ 2. экспонента, $A=2.8$, $A_{np}=0.5$, $b=0.26$, $\Delta t \sim 36$ сут., $n=11$	$T = \frac{3}{b}$ ~ 12	$K_S \geq 6.0$. Рис. П.22 г
5	05.09.2016 54.42°N, 168.53°E, 34 км $K_S=14$, $ML=6.3$	54.34°N, 168.21°E, 41 км; 17 км; 78°	1. гипербола, $A=1.4$, $A_{np}=1.2$, $\Delta t \sim 2$ сут., $n=9$ 2. гипербола, $A=5.1$, $A_{np}=4.3$, $\Delta t \sim 2$ сут., $n=23$ 3. неустановившийся режим $\Delta t \sim 4$ сут., $n=2$ 4. экспонента, $A=0.11$, $A_{np}=0.10$, $b=0.01$, $\Delta t \sim 300$ сут., $n=11$	$T = \frac{3}{b}$ ~ 300	$K_S \geq 8.3$. Окончание ста- дии 1 совпада- ет во времени с сильным аф- тершоком с $ML=5.3$. Рис. П.22 д
6	24.11.2016 55.11°N, 164.78°E, 50 км $K_S=13.2$, $ML=5.9$	52.13°N, 164.82°E, 11 км; 5 км; 3°	1. неустановившийся режим $\Delta t \sim 30$ мин., $n=1$ 2. закон Омори, $A=31$, $A_{np}=7.5$, $p=0.6$, $\Delta t \sim 1.5$ сут., $n=75$ 3. неустановившийся режим $\Delta t \sim 2.5$ час., $n=7$ 4. экспонента, $A=26.7$, $A_{np}=6.5$, $b=0.64$, $\Delta t \sim 10$ сут., $n=19$	$T = \frac{3}{b}$ ~ 5	$K_S \geq 7.0$. Окончание ста- дии 2 совпада- ет во времени с сильным аф- тершоком с $ML=5.3$. Рис. П.22 е
7	22.12.2016 55.07°N, 164.79°E, 53 км $K_S=12.8$, $ML=5.7$	55.14°N, 164.79°E, 12 км; 4 км; 7°	1. закон Омори, $A=4.9$, $A_{np}=0.7$, $p=0.68$, $\Delta t \sim 2.5$ сут., $n=17$ 2. экспонента, $A=4$, $A_{np}=0.6$, $b=0.33$, $\Delta t \sim 40$ сут., $n=7$	$T = \frac{3}{b}$ ~ 9	$K_S \geq 6.4$. Рис. П.22 ж

Заключение

На основании региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2016 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL*-, *dS*- и «*Z*-функции». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2016 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2016 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2016 г.:

– на севере Камчатки в районе Камчатского полуострова и его восточной акватории отмечено увеличение γ , завершилась *Z*-аномалия, охватывающая Камчатский полуостров и Камчатский залив, в районе Камчатского залива развивается *RTL*-аномалия и наблюдается снижение активности A_{10} ;

– в районе Кроноцкого залива и мыса Шипунского продолжается многолетняя *Z*-аномалия, отмечаются пониженные значения активности A_{10} ;

– на юге Камчатки наблюдалась *Z*-аномалия, повышенные значения активности A_{10} , повышенные значения γ в районе мыса Лопатка.

Детально рассмотрены рои и афтершоковые последовательности, сопровождавшие сильные землетрясения. Показано, что афтершоковые процессы состоят из нескольких характерных стадий, параметры которых определены.

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-2016. 11_Kamchatka-and-Komandor-Islands_2016.xls // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – 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 01.11.2017.
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., 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. 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.
8. Дроздина С.Я. (отв. сост.), Карпенко Е.А., Леднева Н.А., Должикова А.Н., Назарова З.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 162–169.
9. 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.
10. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4/5. – С. 63–72.
11. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 81–87.