

Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко, П.В. Воропаев, А.А. Коновалова

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2018 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]. Отдельно рассмотрены параметры афтершоковых последовательностей сильных землетрясений. При расчетах использованы камчатские региональные каталоги [2, 3]. Оценка сейсмической энергии и уровня сейсмичности получена для всей зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, а остальных параметров – для Камчатской сейсмоактивной области (КСО) – района, ограниченного широтой $\varphi=50.5$ и $56.5^\circ N$, долготой $\lambda=156.0$ и $167.0^\circ E$, 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 2018 г. сейсмическая энергия составила $1.83 \cdot 10^{16}$ Дж при среднегодовом (за 57 лет) значении $3.42 \cdot 10^{15}$ Дж и медианном годовом значении $3.31 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2018 гг. (рис. II.12). Для 2018 г. значение функции распределения сейсмической энергии составляет 0.98 ± 0.02 , что позволяет рассматривать 2018 г. как год с высокой сейсмичностью.

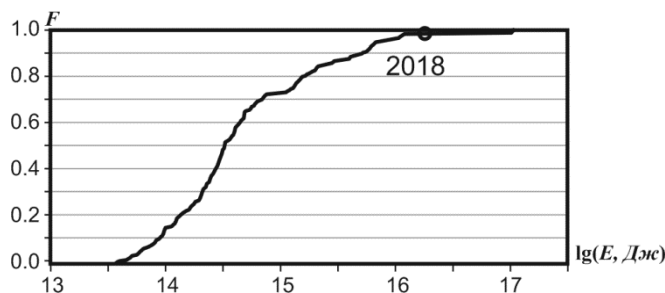


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при землетрясениях в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в 1962–2018 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2018 г.

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 2018 г. в различных временных окнах. В 2018 г. в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН произошло восемь землетрясений, вызвавших повышение сейсмичности до высокого и экстремально высокого уровня. Землетрясение Углового Поднятия 20.12.2018 г. с $M=7.7$ ($ML=7.3$) вызвало повышение сейсмичности до экстремально высокого уровня во временных окнах 5–111 суток, до высокого уровня – в окнах 112–365 суток. Землетрясение 06.07.2018 г. с $M=6.9$ ($ML=6.7$) предварялось снижением

уровня сейсмичности до низкого и даже экстремально низкого уровня во временных окнах 5–16 суток.

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

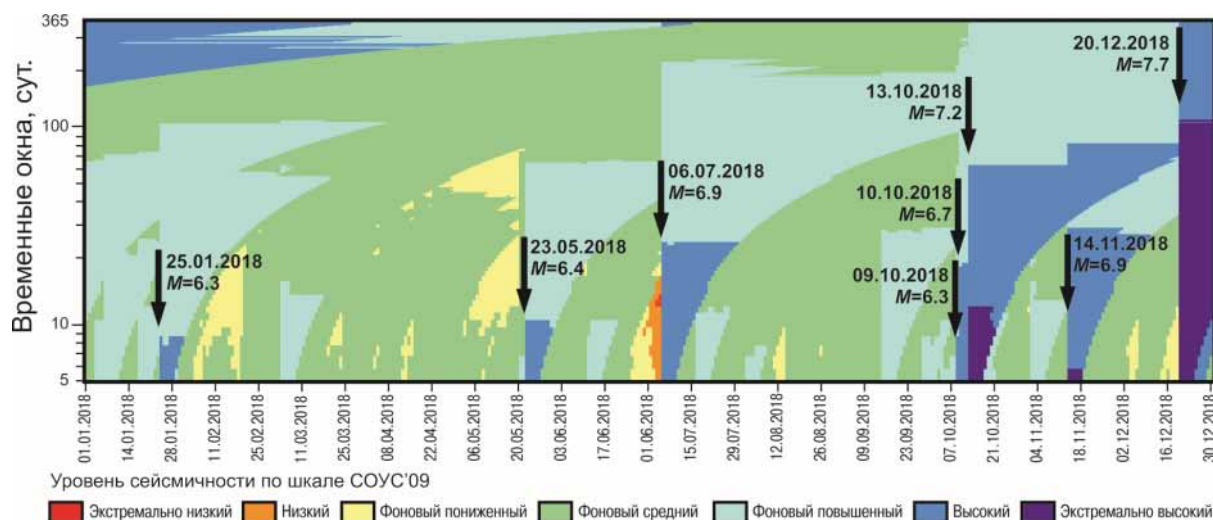


Рис. II.13. Временной ход уровня сейсмичности в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в различных временных окнах в 2018 г.

Таблица II.2. Оценка уровня сейсмичности в 2018 г. для различных пространственных областей сейсмоактивной зоны Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$1.26 \cdot 10^{16}$	1	экстремально высокий
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$1.2 \cdot 10^{15}$	0.92 ± 0.04	фоновый повышенный
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$3.9 \cdot 10^{15}$	0.98 ± 0.02	высокий
Корякский сейсмический пояс	$1.1 \cdot 10^{12}$	0.68 ± 0.07	фоновый средний
Командорский сегмент Алеутской дуги	$5.6 \cdot 10^{14}$	0.96 ± 0.03	фоновый повышенный
Континентальные области Камчатки	$4.3 \cdot 10^{11}$	0.71 ± 0.06	фоновый средний
Камчатский залив	$1.1 \cdot 10^{15}$	0.97 ± 0.03	фоновый повышенный
Кроноцкий залив	$2.1 \cdot 10^{13}$	0.68 ± 0.07	фоновый средний
Авачинский залив	$3.0 \cdot 10^{13}$	0.75 ± 0.06	фоновый средний
Юг Камчатки (от мыса Лопатка до Авачинского залива)	$8.1 \cdot 10^{14}$	0.96 ± 0.03	фоновый повышенный

Наиболее сильными сейсмическими событиями КСО в 2018 г. являются два землетрясения, произошедшие в Камчатском заливе 23 мая ($M=6.4$, $ML=6.4$) и 14 ноября ($M=6.9$, $ML=6.8$), землетрясение 20 декабря ($M=7.7$, $ML=7.3$) в районе о. Беринга и землетрясение 6 июля ($M=6.9$, $ML=6.7$) на юге сейсмоактивной зоны (рис. II.14 а). Параметры этих землетрясений представлены в табл. II.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 [8]. Карта эпицентров независимых землетрясений 2018 г. представлена на рис. II.14 б.

Таблица II.3. Землетрясения с $M \geq 6$, произошедшие в Камчатской сейсмоактивной области в 2018 г.

Дата дд.мм.гггг	Время	K_S	M	ML	φ , °N	λ , °E	h , км	Район
23.05.2018	01:37:44	14.2	6.4	6.4	55.08	162.44	56	Камчатский залив
06.07.2018	01:40:03	14.9	6.9	6.7	51.32	158.13	75	Восточная акватория юга Камчатки
14.11.2018	21:21:49	15.0	6.9	6.8	55.53	162.41	75	Камчатский залив
20.12.2018	17:01:53	16.1	7.7	7.3	54.94	164.75	54	Западнее острова Беринга

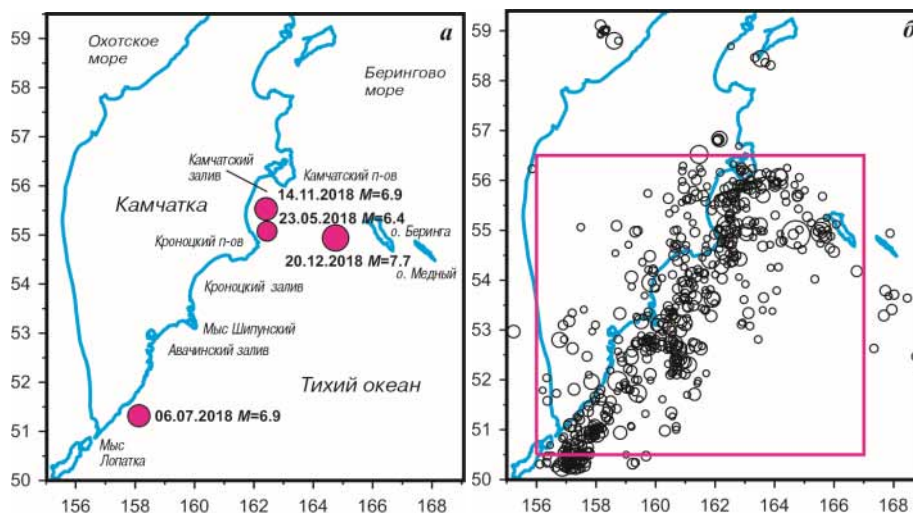


Рис. II.14. Сейсмичность Камчатки в 2018 г.: а – эпицентры сильных землетрясений с $M \geq 6$; б – эпицентры независимых землетрясений с $K_S = 9-14$. Красным квадратом отмечена наиболее сейсмоактивная зона

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2018 г. равен 0.50 ± 0.02 , что соответствует среднемуголетнему значению 0.500 ± 0.003 . Карты наклона графика повторяемости землетрясений γ представлены на рис. II.15. Областью расчета значений является круг радиусом 100 км. Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест. Статистическая достоверность уменьшения γ в районе Кроноцкого залива и увеличения на юге Камчатки на уровне $\alpha = 0.05$.

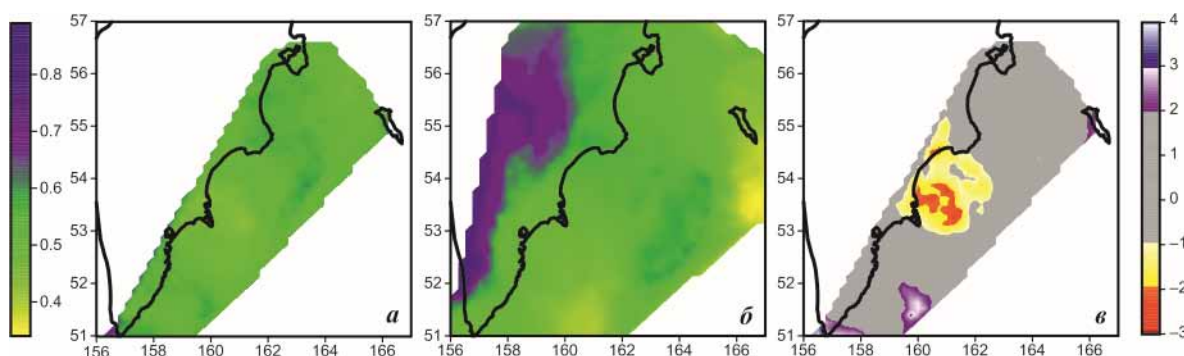


Рис. II.15. Средние значения наклона графика повторяемости γ в 2018 г. (а) и 1962–2018 гг. (б), изменение γ в 2018 г. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение (в)

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по указанному району активность A_{10} в 2018 г. составила 0.222 ± 0.006 при среднемуголетнем значении 0.274 ± 0.001 . В целом активность региона была ниже среднего на $\approx 19\%$. 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. П.16. Распределение активности A_{10} в 2018 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Кроноцкого, Шипунского полуостровов, Авачинского, Кроноцкого и южной части Камчатского заливов. Активность превысила средние значения на юге Камчатки, в западной акватории острова Беринга и в северной части Камчатского залива.

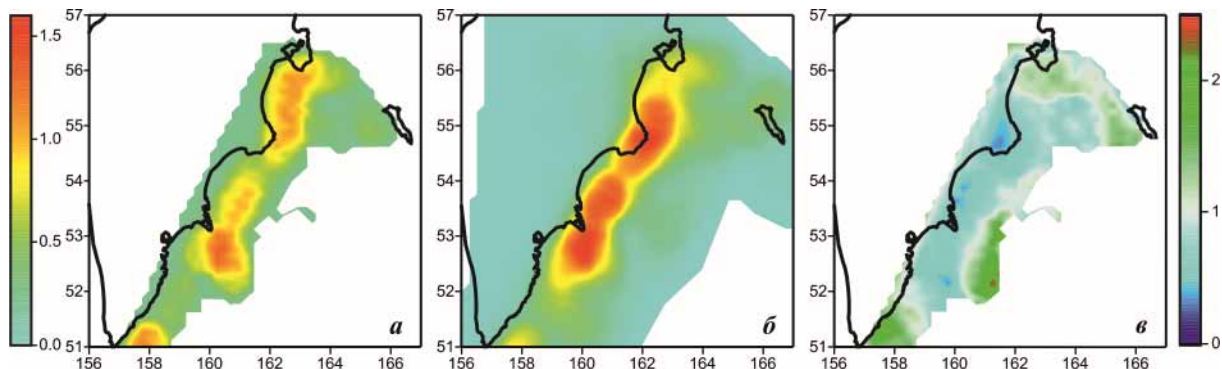


Рис. П.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2018 г. (а) и 1962–2018 гг. (б). Активность A_{10} в 2018 г., нормированная на многолетнюю активность (в)

Мониторинг параметра RTL

На рис. П.17 показаны карты минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2017 и 2018 г. в сейсмоактивной области Камчатки при расчете в диапазоне глубин гипоцентров 0–100 км. Штриховой линией отмечена область надежного определения параметра RTL . Для характерных точек аномалий рассчитан временной ход параметра RTL (рис. П.18). Характерная точка определяется по минимальному значению RTL за время существования аномалии.

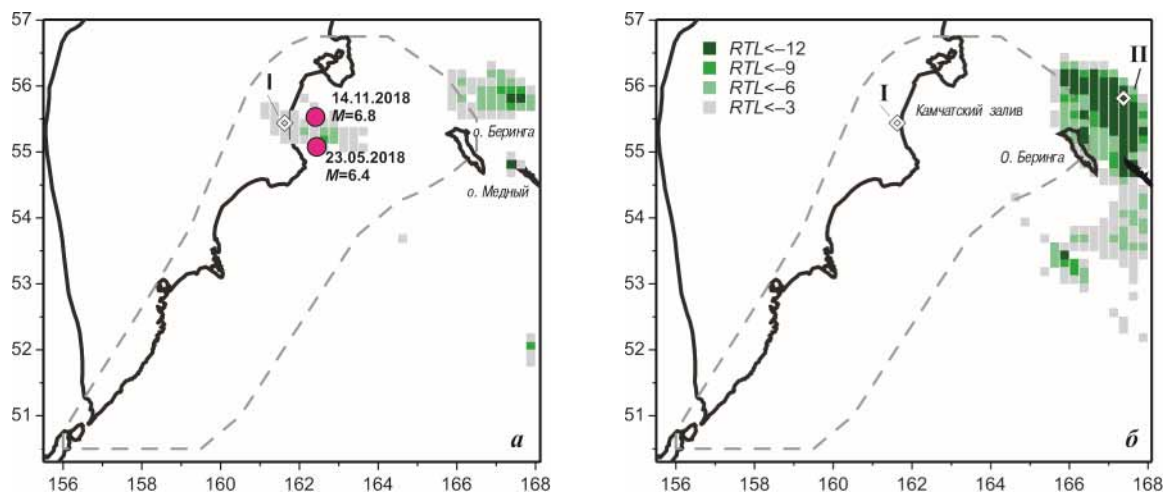


Рис. П.17. Минимальные значения RTL -параметра в 2017 г. (а) и в 2018 г. (б).

Ромбами обозначены характерные точки аномалий, пунктиром – область надежного определения параметра RTL . Отмечены эпицентры землетрясений 23.05.2018 г. ($M=6.4$) и 14.11.2018 г. ($M=6.9$)

Аномалия на побережье Камчатского залива проявилась в 2015 г., минимальных значений параметр RTL достигал в декабре 2016 г., в августе 2017 г. значения RTL вышли на фоновый уровень. Землетрясения 23.05.2018 г. с $M=6.4$ ($ML=6.4$) и 14.11.2018 г. с $M=6.9$ ($ML=6.8$) произошли в пределах аномальной области спустя девять и 15 месяцев соответственно после выхода параметра RTL на фоновый уровень.

Аномалия в районе о. Беринга, проявившаяся в 2017 г., вероятно, является артефактом и обусловлена удалением из каталога афтершоков землетрясения с магнитудой $M_w=7.8$, произошедшего 17.07.2017 г. восточнее о. Медный (54.35°N , 168.9°E).

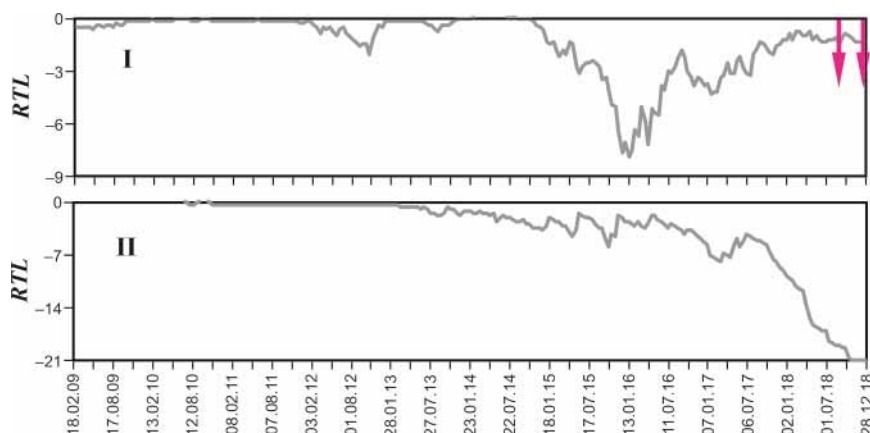


Рис. 11.18. Временной ход RTL-параметра в характерных точках аномалий (рис. 11.17). Отмечены моменты землетрясений 23.05.2018 г. ($M=6.4$) и 14.11.2018 г. ($M=6.9$)

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

На рис. 11.19 показаны карты максимальных значений статистически значимого ($Z > 3$) уменьшения скорости сейсмического потока SRD , наблюдавшихся в течение 2017 и 2018 гг. Пространственные области абсолютного сейсмического затишья (на глубинах до 70 км не было зафиксировано ни одного землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 8.5$) в течение не менее года оконтурены. На картах также отмечены эпицентры землетрясений, сопоставленных с предваряющими их аномалиями. Аномалии пронумерованы в хронологическом порядке по мере проявления затишья, рассматриваемого в качестве возможного предвестника сильного землетрясения. Для каждой из выделенных зон в скользящем временном окне 12 месяцев рассчитан временной ход функции $Z(t)$ (рис. 11.20). Стрелками отмечены моменты соответствующих землетрясений.

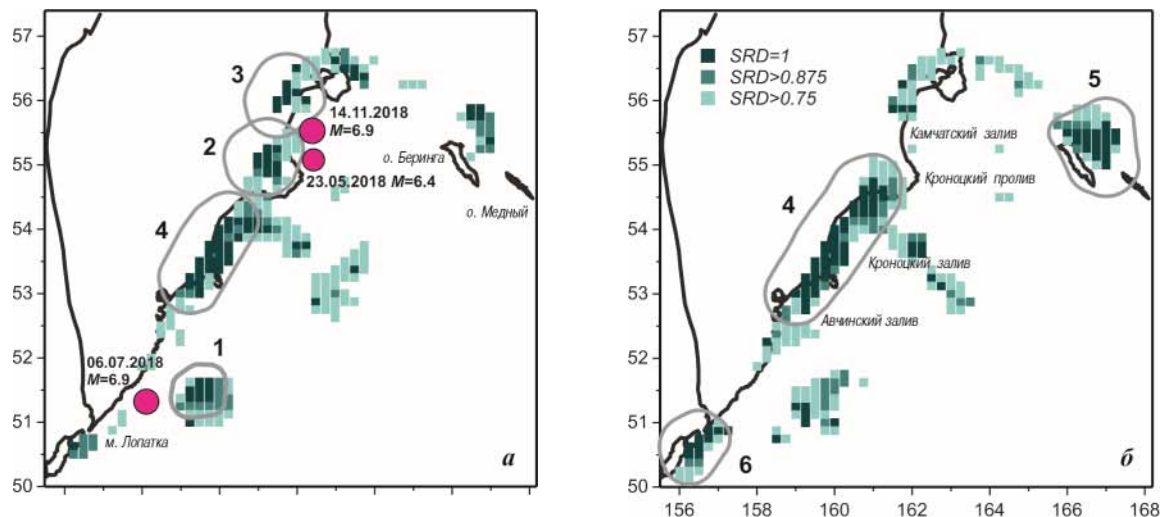


Рис. 11.19. Карты максимальных значений SRD в течение 2017 г. (а) и 2018 г. (б). Области сейсмического затишья оконтурены. Отмечены эпицентры землетрясений 2018 г. с $M \geq 6$

Сейсмическое затишье в зоне 1 отмечено с января 2016 г. по январь 2017 года. 6 июля 2018 г., спустя 18 месяцев после окончания затишья, на расстоянии 40 км от аномальной области произошло землетрясение с $M=6.9$ ($ML=6.7$).

В зоне 2 аномально низкая сейсмичность проявлялась с марта 2016 г. по март 2017 года. На краю области затишья 23 мая 2018 г. произошло землетрясение с магнитудой $M=6.4$ ($ML=6.4$), 14 ноября 2018 г. – землетрясение с $M=6.9$ ($ML=6.8$). Интервалы времени между окончанием затишья и моментами землетрясений – 14 месяцев и 21 месяц соответственно.

Абсолютное сейсмическое затишье в зоне 3 отмечается с июля 2016 г. по июль 2017 года. Положение землетрясения 14 ноября 2018 г. с $M=6.9$ ($ML=6.8$) и время между окончанием затишья и землетрясением (16 месяцев) также позволяют рассматривать это затишье как предвестниковое.

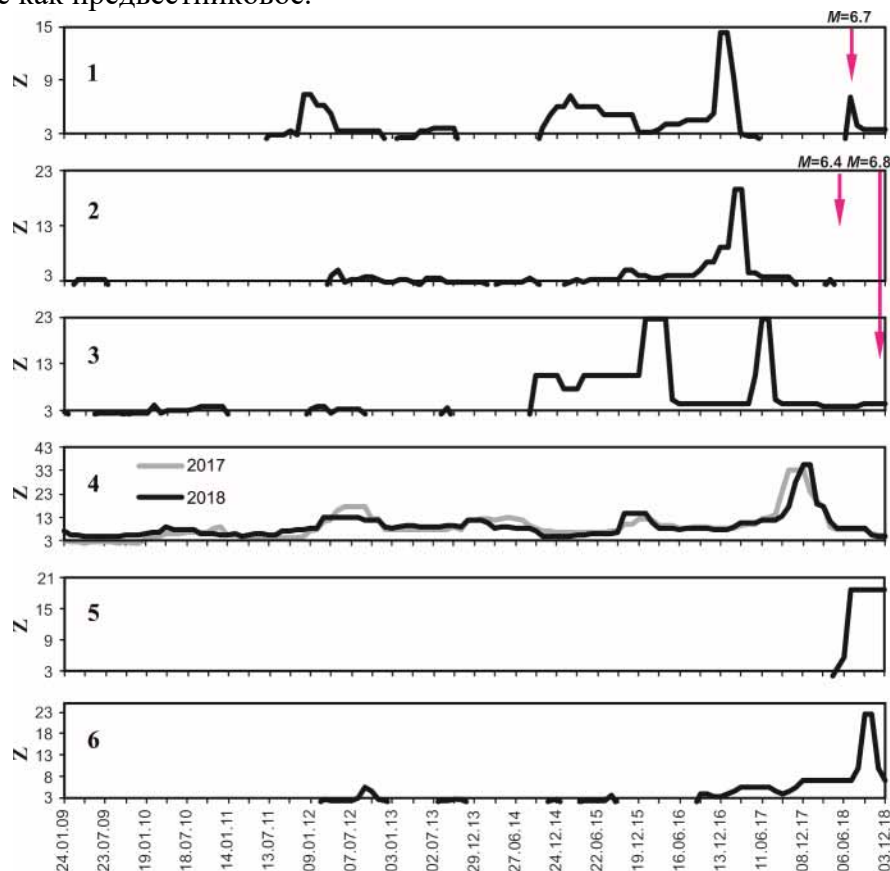


Рис. 11.20. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. 11.19). Стрелками отмечены моменты землетрясений, сопоставленных соответствующим аномалиям

В зоне 4 отмечалось отсутствие землетрясений с $K_s \geq 8.5$ в течение всего 2017 года. В январе 2018 г. аномалия увеличилась в размере, сейсмическое затишье охватило практически полностью Авачинский и Кроноцкий заливы. Временной ход $Z(t)$ рассчитан для аномалии, проявившейся в 2016 г. (серая линия) и в 2017 г. (черная линия).

Аномалия в районе о. Беринга (зона 5), так же, как и аномалия RTL в этом районе, возможно, обусловлена удалением афтершоков землетрясения 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$. Аномально низкая сейсмичность проявляется с августа 2017 года.

В районе мыса Лопатка (зона 6) сейсмическое затишье наблюдалось с октября 2017 г. по октябрь 2018 года.

Параметры афтершоковых последовательностей

На рис. 11.21 показаны афтершоковые последовательности 2018 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 $dN/dt=A/t$, затухающий афтершоковый процесс по закону Омори $dN/dt=A/t^p$, убывание афтершоков с постоянной скоростью $dN/dt=A$. 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 . $A_{пр} = A \cdot 10^{-\gamma(K_s - 8.5)}$, где γ – наклон графика повторяемости афтершоков.

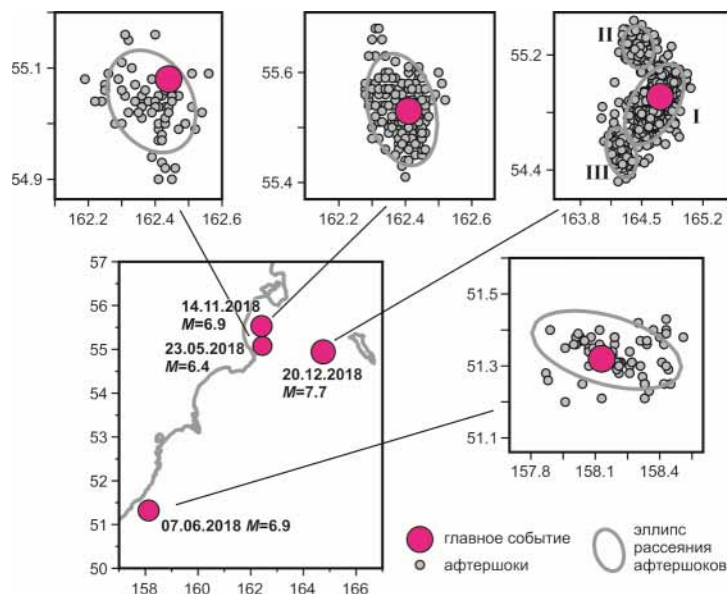


Рис. П.21. Эпицентры землетрясений, и соответствующие афтершоковые последовательности

Характерные фазы развития афтершоковых процессов показаны 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.

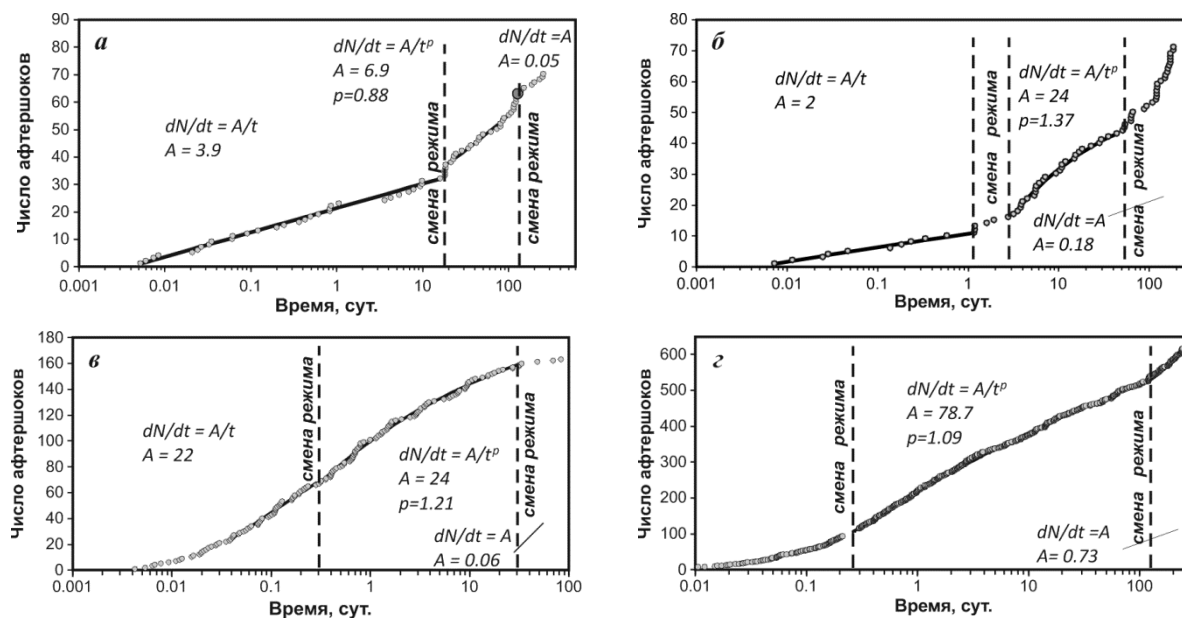


Рис. П.22. Характерные фазы развития афтершоковых процессов:
 а – 23.05.2018 г., $M=6.4$ ($ML=6.4$), $K_s \geq 6.4$; б – 06.07.2018 г., $M=6.9$ ($ML=6.7$), $K_s \geq 6.5$;
 в – 14.11.2018 г., $M=6.9$ ($ML=6.8$), $K_s \geq 6.2$; г – 20.12.2018 г., $M=7.7$ ($ML=7.3$), $K_s \geq 8.4$

Параметры афтершоковых последовательностей представлены в табл. П.4. Приведены дата, энергетический класс K_s , магнитуда M (ML) 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 $A_{пр}$, показатель p при затухании по закону Омори, длительность стадии Δt , число землетрясений n , энергетический порог K_S и длительность всего афтершокового процесса T .

Таблица II.4. Параметры афтершоковых последовательностей, произошедших в Камчатском регионе в 2018 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	23.05.2018 55.08°N, 162.44°E, 56 км K _S =14.2, ML=6.4, M=6.4	55.04°N, 162.39°E, 10.7 км; 7.8 км; -27°	1. Гипербола, A=3.9, A _{пр} =0.34, Δt ~ 16 сут., n=32 2. Неустановившийся режим Δt ~ 2.5 сут., n=4 3. Закон Омори, A=6.9, A _{пр} =0.61, p=0.882, Δt ~ 90 сут., n=20 4. Константа, A=0.048, A _{пр} =0.0043, Δt ~ 140 сут., n=14	~ 260	K _S ≥6.4 Окончание 3 стадии совпадает по времени с сильным афтершоком с ML=4.6. Рис. II.22 а
2	06.07.2018 51.32°N, 158.13°E, 75 км K _S =14.9, ML=6.7, M=6.9	51.34°N, 158.15°E, 24.8 км; 10.6 км; -75°	1. Гипербола, A=2, A _{пр} =0.2, Δt ~ 1 сут., n=11 2. Неустановившийся режим Δt ~ 1.5 сут., n=5 3. Закон Омори, A=24, A _{пр} =2.4, p=1.373, Δt ~ 41 сут., n=27 4. Константа, A=0.18, A _{пр} =0.018, Δt ~ 145 сут., n=28	~ 190	K _S ≥6.5 Рис. II.22 б
3	14.11.2018 55.53°N, 162.41°E, 75 км K _S =15, ML=6.8, M=6.9	55.53°N, 162.39°E, 11.5 км; 6.4 км; -12.9°	1. Неустановившийся режим Δt ~ 1 час, n=22 2. Гипербола, A=22.1, A _{пр} =1.56, Δt ~ 6 час, n=44 3. Закон Омори, A=24.2, A _{пр} =1.72, p=1.207, Δt ~ 33 сут., n=94 4. Константа, A=0.058, A _{пр} =0.0041, Δt ~ 50 сут., n=3	~ 84	K _S ≥6.2 Рис. II.22 в
4	20.12.2018 54.94°N, 164.75°E, 54 км K _S =16.1, ML=7.3, M=7.7	I – 54.86°N, 164.64°E, 33.8 км; 17 км; 27° II – 55.25°N, 164.46°E, 16.5 км; 11 км; -8° III – 54.52°N, 164.27°E, 19.5 км; 10.5 км; -14°	1. Неустановившийся режим Δt ~ 8 час, n=102 2. Закон Омори, A=78.7, A _{пр} =70.5, p=1.087, Δt ~ 120 сут., n=423 3. Константа, A=0.727, A _{пр} =0.651, Δt ~ 123 сут., n=80	~ 2454	K _S ≥8.4 Рис. II.22 г

Афтершоки землетрясения Углового Поднятия 20.12.2018 г. визуально разделяются на три кластера. Эллипсы, аппроксимирующие рассеяние эпицентров афтершоков каждого из этих кластеров, показаны на рис. II.21, их параметры приведены в табл. II.4. Временной ход развития афтершокового процесса проанализирован для крупнейшего кластера I.

Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки в 2018 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL* и «*Z*-функция». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2018 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2018 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2018 г.:

– на севере сейсмоактивной зоны в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова наблюдается снижение активности A_{10} , в районе острова Беринга развиваются *Z*- и *RTL*-аномалии;

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

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

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-2018. 11_Kamchatka-and-Komandor-Islands_2018.xls // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – 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 10.11.2019.
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. 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. 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.