

II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2013 году. Рассматриваются такие параметры, как общая выделившаяся сейсмическая энергия, оценка уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ . Методики расчета этих параметров описаны в ежегоднике [Землетрясения России в 2009 году, 2011].

В 2013 г. в Камчатском регионе произошли сейсмические события, позволяющие определить этот год не только как наиболее сейсмоактивный за время детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г.), но и уникальный по значительности сильнейших землетрясений: 1) землетрясение на юге Камчатки 28 февраля с $M_w=6.8$, сопровождавшееся афтершоками с $M_w=6.4$ и 6.5 , является самым сильным сейсмическим событием этого района за последние 20 лет; 2) 13 марта на Камчатском перешейке произошло сильнейшее с 1962 г. землетрясение с $M_w=5.8$; 3) в восточной части акватории Авачинского залива в мае был зафиксирован сильнейший за историю детальных наблюдений рой землетрясений. Рой включал пять землетрясений с магнитудой $M \geq 6$, произошедших в течение полутора суток; 4) землетрясение с $M_w=8.3$, произошедшее 24 мая в Охотском море на глубине 630 км, было самым мощным среди всех известных в мире глубоких землетрясений. Кроме того, оно сопровождалось последовательностью афтершоков, что нетипично для столь глубоких землетрясений. Параметры афтершоковых последовательностей сильных землетрясений 2013 г. рассмотрены отдельно. При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН [Каталог землетрясений]. Моментные магнитуды M_w определены в [Global CMT Web Page].

Результаты исследования

Энергия землетрясений Камчатки

Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного широтой $\varphi=50.5\text{--}56.5^\circ\text{N}$, долготой $\lambda=156.0\text{--}167.0^\circ\text{E}$, глубиной – от 0 до 300 км (рис. II.12 б). 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 [Федотов, 1972], что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [Гордеев и др., 2006]. Общая выделившаяся в 2013 г. сейсмическая энергия составила $4.9 \cdot 10^{15}$ Дж, что существенно превышает среднегодовое (за 52 года) значение $6.5 \cdot 10^{14}$ Дж и медианное годовое значение $1.7 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2013 гг. (рис. II.13). Для 2013 г. функция распределения сейсмической энергии составляет 0.98 ± 0.02 , что позволяет рассматривать 2013 г. как один из наиболее сейсмоактивных с 1962 года.

Самыми значительными сейсмическими событиями 2013 г., приходящимися на сейсмоактивную зону Камчатки, являются землетрясения с магнитудами $M_w=6.8$ и 5.9 , произошедшие на юге Камчатки 28 февраля ($\varphi=50.67^\circ\text{N}$, $\lambda=157.77^\circ\text{E}$, $h=61$ км) и 24 марта ($\varphi=50.68^\circ\text{N}$, $\lambda=160.35^\circ\text{E}$, $h=14$ км) соответственно, рой с наиболее сильным землетрясением 21 мая ($M_w=6.1$, $\varphi=52.05^\circ\text{N}$, $\lambda=160.49^\circ\text{E}$, $h=48$ км) в восточной части

акватории Авачинского залива, и землетрясение с $M_w=6.4$, произошедшее 12 ноября вблизи Кроноцкого полуострова ($\varphi=54.63^\circ N$, $\lambda=162.45^\circ E$, $h=72$ км) (рис. П.12 а). Энергия этих сейсмических событий и сопутствующих им группированных землетрясений составила $4.7 \cdot 10^{15}$ Дж, что составляет почти 96% сейсмической энергии 2013 года.

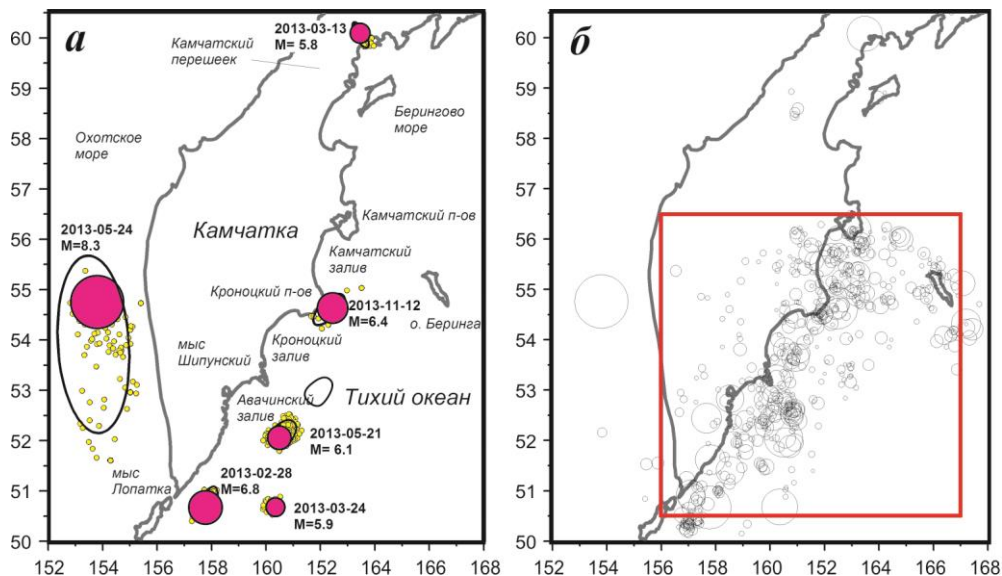


Рис. П.12. Сейсмичность Камчатки в 2013 г.:

а – эпицентры сильных землетрясений и соответствующие им группы (показаны эллипсы рассеяния, содержащие 90% событий группы, даты наиболее сильных землетрясений); б – эпицентры независимых землетрясений 2013 г. с $K_S=9-17$, отмечена наиболее сейсмоактивная зона

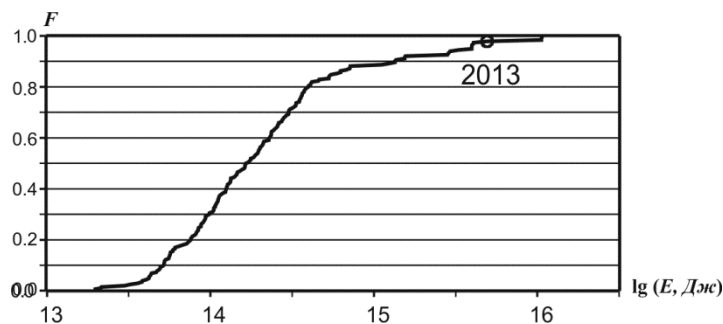


Рис. П.13. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962–2013 гг.

Кружком отмечено значение, соответствующее 2013 г.

Число группируемых землетрясений (афтершоковых последовательностей и роев) в 2013 г. составило 56% от общего количества сейсмических событий, в то время как в среднем за 52 года наблюдений группированные события составляют около четверти всех землетрясений с энергетическим классом K_S не менее 8.5. Карта эпицентров независимых землетрясений 2013 г. представлена на рис. П.12 б.

Оценка уровня сейсмичности

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 [Салтыков, 2011]. Рис. П.14 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2013 года. Интересным фактом представляется снижение регионального уровня сейсмичности до экстремально низкого в коротких временных окнах перед роем землетрясений с $M \approx 6$ в мае 2013 года.

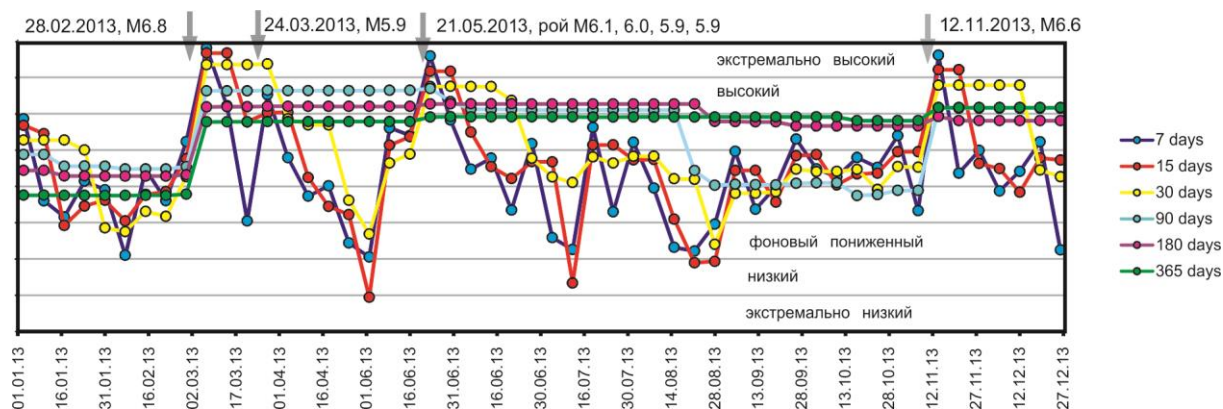


Рис. II.14. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах в 2013 г.

Следует отметить, что в рассмотренную зону не вошли два значимых сейсмических события 2013 г. – глубокое Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$, $\varphi=54.76^\circ N$, $\lambda=153.79^\circ E$, $h=630$ км) и Ильпырское землетрясение 13 марта 2013 г. ($M_w=5.8$, $\varphi=60.08^\circ N$, $\lambda=157.77^\circ E$, $h=61$ км). Они были учтены при оценке уровня сейсмичности в пространственных областях, определенных в соответствии с регионализацией сейсмоактивного объема Камчатки и прилегающих территорий [Левина и др., 2013], учитывающей тектоно-географическое положение землетрясений. В табл. II.2 приведены оценки для шести из десяти выделенных зон (для которых возможны статистические оценки) и для четырех подрегионов Камчатки, определяемых географическим положением.

Таблица II.2. Оценка уровня сейсмичности в 2013 г. для различных пространственных областей сейсмоактивной зоны Камчатки

Пространственная область	Энергия E , Дж	$F(\lg E)$	Уровень сейсмичности
Тихий океан	$1.0 \cdot 10^{14}$	1	экстремально высокий
Северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны	$1.7 \cdot 10^{15}$	0.95 ± 0.05	фондовый повышенный
Сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки	$1.0 \cdot 10^{17}$	1	экстремально высокий
Корякский сейсмический пояс	$8.9 \cdot 10^{13}$	0.93 ± 0.06	фондовый повышенный
Командорский сегмент Алеутской дуги	$3.3 \cdot 10^{13}$	0.6 ± 0.1	фондовый средний
Континентальные области Камчатки	$9.8 \cdot 10^9$	0.17 ± 0.09	фондовый средний
Камчатский залив	$1.0 \cdot 10^{15}$	0.96 ± 0.03	фондовый повышенный
Кроноцкий залив	$1.1 \cdot 10^{13}$	0.50 ± 0.07	фондовый средний
Авачинский залив	$1.3 \cdot 10^{13}$	0.57 ± 0.07	фондовый средний
Юг Камчатки (от мыса Лопатка до Авачинского залива)	$1.7 \cdot 10^{15}$	1	экстремально высокий

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по указанному району активность A_{10} в 2013 г. составила 0.577 ± 0.005 (0.246 ± 0.005) (при среднемноголетнем значении 0.383 ± 0.001 (0.276 ± 0.001)). Эти данные получены как для всего, так и для очищенного от афтершоков каталога, которые приведены в скобках курсивом. Таким образом, в целом активность региона была выше среднего уровня в полтора раза, но при рассмотрении очищенного каталога – ниже на $\approx 10\%$. Такое различие объясняется произошедшими на Камчатке в 2013 г. сильными землетрясениями и роями, имеющими продолжительные афтершоковые последовательности.

Распределение активности A_{10} в 2013 г. значительно отличается от среднемноголетнего (рис. II.15). Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Кроноцкого полуострова, Шипунского мыса, Авачинского и Кроноцкого заливов. При этом восточнее Авачинского залива сейсмическая активность существенно превысила средние значения.

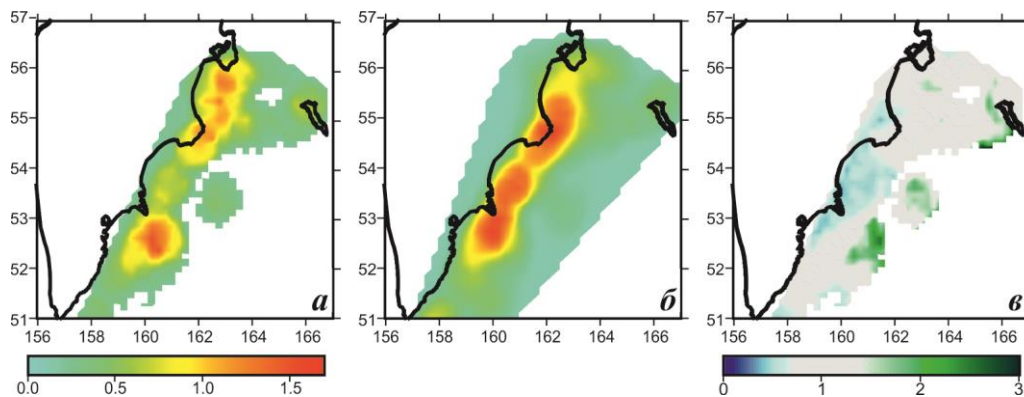


Рис. II.15. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2013 г. (а) и 1962–2013 гг. (б), относительная сейсмическая активность A_{10} в 2013 г. по сравнению со средней многолетней активностью (в). Областью расчета значений является круг радиусом 50 км

Наклон графика повторяемости землетрясений γ

Наклон графика повторяемости γ в 2013 г. равен 0.39 ± 0.01 (0.44 ± 0.02), что существенно ниже среднемноголетнего значения 0.472 ± 0.002 (0.498 ± 0.003). На рис. II.16 представлены карты наклона графика повторяемости γ , демонстрирующие пространственные особенности его поведения. Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест. Статистическая достоверность уменьшения γ в районе Камчатского залива, Кроноцкого полуострова, Авачинского залива высока – на уровне $\alpha=0.01$. Аномалия в Камчатском заливе обнаружена ранее [Салтыков, Кравченко, 2014]. Следует отметить, что аномалия увеличенных значений γ на юге Камчатки у мыса Лопатка [Салтыков, Кравченко, 2011] продолжает вырождаться в соответствии с отмеченной ранее тенденцией [Салтыков, Кравченко, 2014].

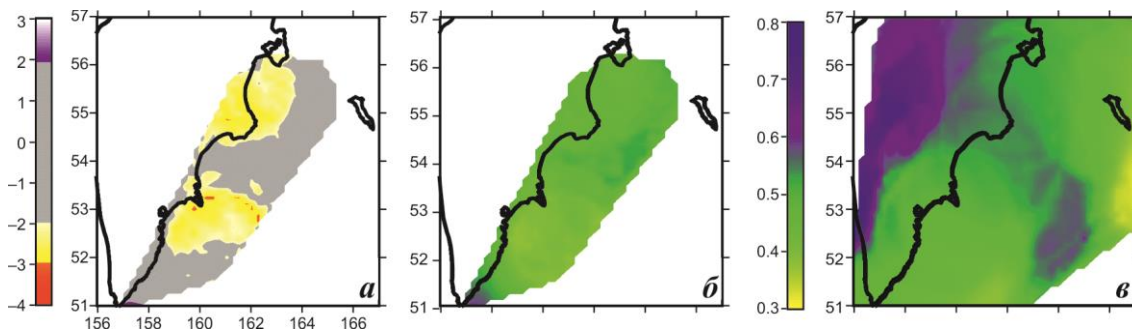


Рис. II.16. Изменение наклона графика повторяемости γ в 2013 г. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение (а), средние значения γ в 2013 г. (б) и 1962–2013 гг. (в). Областью расчета значений является круг радиусом 50 км

Параметры афтершоковых последовательностей

Афтершоковая последовательность землетрясений выделяется из оперативного каталога по методике Молчана–Дмитриевой [Молчан, Дмитриева, 1991], программно реализованной В.Б. Смирновым (МГУ им. М.В. Ломоносова). Построенный для полученной выборки кумулятивный график повторяемости определяет уровень представительности каталога. Используемая для дальнейшего анализа последовательность выбирается

с учетом этого порогового значения. 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 $\frac{dN}{dt} \sim \frac{1}{t}$, затухающий афтершоковый процесс по закону Омори $\frac{dN}{dt} \sim \frac{1}{t^p}$, убывание афтершоков по экспоненциальному закону $\frac{dN}{dt} \sim \exp(-bt)$.

Характерные фазы развития афтершоковых процессов сильных землетрясений представлены на рис. П.17–П.18. Приведены кумулятивные кривые числа землетрясений. Обозначены временные границы фаз, указан характер убывания интенсивности афтершоков с величинами параметров. Отмечены наиболее сильные землетрясения, составляющие афтершоковую последовательность.

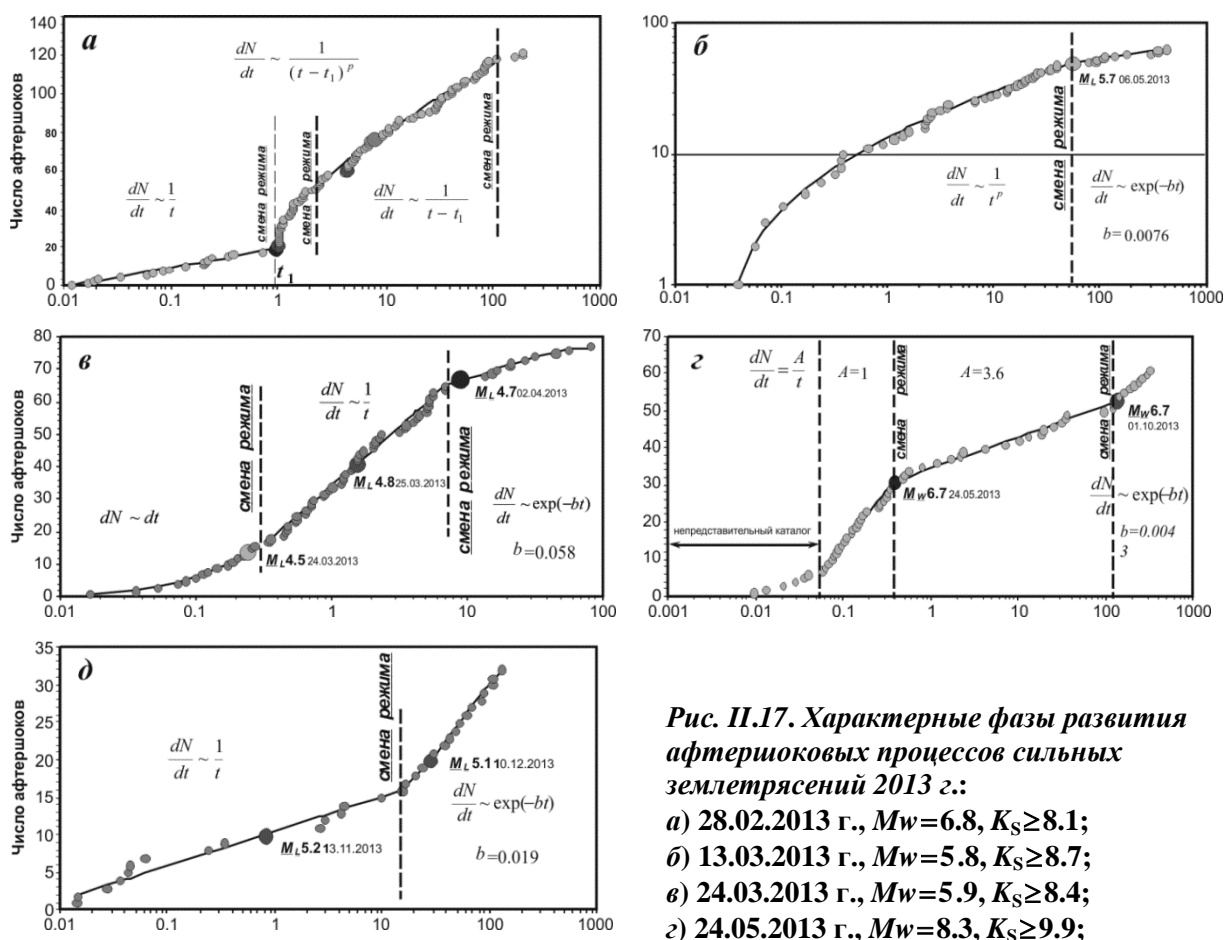


Рис. П.17. Характерные фазы развития афтершоковых процессов сильных землетрясений 2013 г.:

- а) 28.02.2013 г., $M_w=6.8, K_S \geq 8.1$;
- б) 13.03.2013 г., $M_w=5.8, K_S \geq 8.7$;
- в) 24.03.2013 г., $M_w=5.9, K_S \geq 8.4$;
- г) 24.05.2013 г., $M_w=8.3, K_S \geq 9.9$;
- д) 12.11.2013 г., $M_w=6.4, K_S \geq 7.4$.

Приведены кумулятивные кривые числа землетрясений. За начало отсчета взято время основного события. Обозначены временные границы фаз, указан характер убывания интенсивности афтершоков с величинами параметров. Отмечены наиболее сильные землетрясения, составляющие афтершоковую последовательность

Как следует из рис. П.17 и П.18, смена режима в большинстве случаев совпадает с наиболее сильными афтершоками. Завершающей стадией афтершокового процесса является, как правило, экспоненциальное убывание. Коэффициент b экспоненциального закона затухания позволяет формализованно оценить длительность афтершокового процесса как интервал времени, в течение которого происходит 95% группированных землетрясений – $T=3/b$.

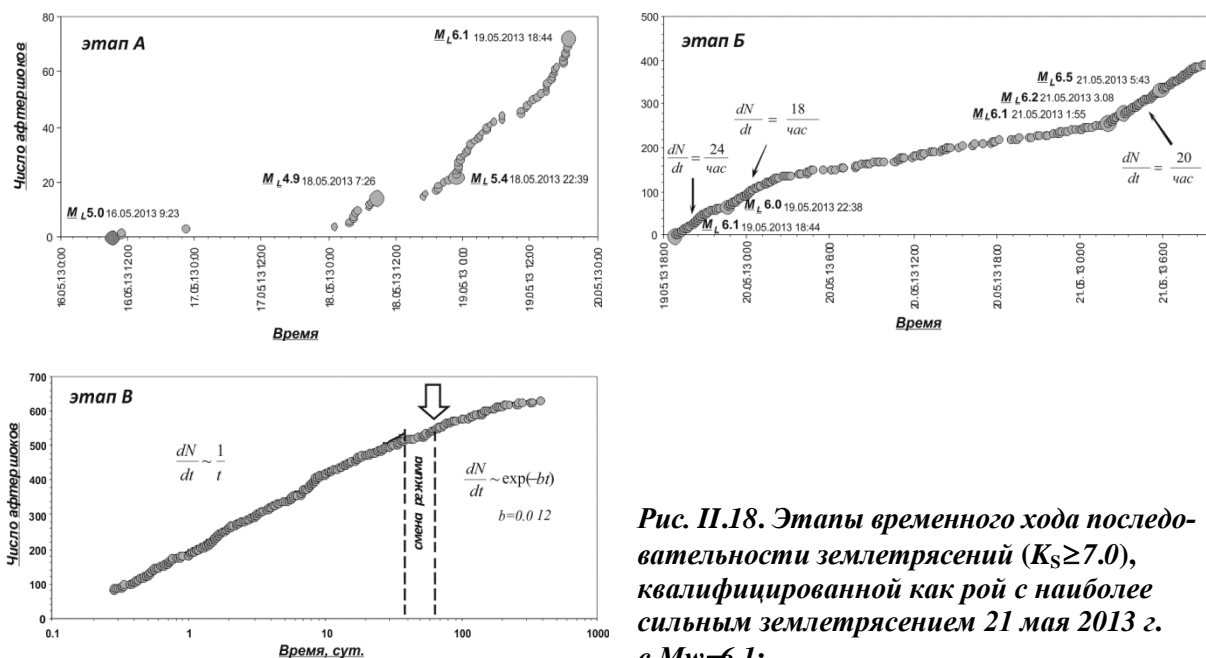


Рис. П.18. Этапы временного хода последовательности землетрясений ($K_S \geq 7.0$), квалифицированной как рой с наиболее сильным землетрясением 21 мая 2013 г. с $M_w=6.1$:

этап А (нарастание интенсивности роя): отмечены землетрясения с магнитудой $M \geq 4.9$; этап Б (максимальная активность роя): отмечены землетрясения с магнитудой $M \geq 6$, участки максимальных значений сейсмического потока с указанием его величины; этап В (спад активности роя): начало отсчета – время землетрясения 21.05.2013 г. 05:43, $M_w=6.1$, отмечена граница смены режима, стрелкой указано время возникновения в ближайшей окрестности очага группы землетрясений 25–30.07.2013 г.

Параметры афтершоковых последовательностей представлены в табл. П.3. Приведены дата и энергетические характеристики (энергетический класс K_S , магнитуды M_L и M_w) основного события; размер очага, параметры характерных стадий (закон убывания афтершоков, 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 .

Таблица П.3. Параметры афтершоковых последовательностей и роя, произошедших в Камчатском регионе в 2013 г.

№	Дата, K_S , M_w , M_L главного события	Размер очага, км	Стадии афтершокового процесса	Длит. T , сут.	Комментарии, особенности
1	28.02.2013 $K_S=15.2$ $M_w=6.8$ $M_L=6.9$	70×30	1. Гипербола, $\Delta t \sim 23$ час, $n=19$ 2. Закон Омори, $p=0.7$, $\Delta t \sim 33$ час, $n=29$ 3. Гипербола, $\Delta t \sim 98$ сут., $n=67$	~ 100	$K_S \geq 8.1$. Переход во 2-ю стадию вызван сильнейшими афтершоками 01.03.2013 г. с $M_w=6.4$ и 6.5 (рис. П.17 а).
2	13.03.2013 $K_S=13.9$ $M_w=5.8$ $M_L=6.2$	60×15	1. Закон Омори, $p=0.76$, $\Delta t \sim 55$ сут., $n=50$ 2. Экспонента, $b=0.0076$, $\Delta t \sim 370$ сут., $n=14$	$T = \frac{3}{b} \sim 400$	$K_S \geq 8.7$. Смена режима вызвана сильным афтершоком ($M_L=5.7$) 06.05.2013 г. (рис. П.17 б).
3	24.03.2013 $K_S=14.0$ $M_w=5.9$ $M_L=6.3$	30×25	1. $dN \sim dt$, $\Delta t \sim 7$ час, $n=16$ 2. Гипербола, $\Delta t \sim 8$ сут., $n=50$ 3. Экспонента, $b=0.058$, $\Delta t \sim 70$ сут., $n=11$	$T = \frac{3}{b} \sim 50$	$K_S \geq 8.4$. Смены режимов близки во времени к двум наиболее сильным афтершокам (рис. П.17 в).

№	Дата, K_S , M_w , ML главного события	Размер очага, км	Стадии афтершокового процесса	Длит. T , сут.	Комментарии, особенности
4	21.05.2013 $K_S=14.4$ $M_w=6.1$ $ML=6.5$	50×40	Этап А: $\Delta t \sim 3.4$ сут., $n=73$	$T = \frac{3}{b} \sim$ 250	$K_S \geq 7.0$. Рост магнитуд, увеличение скорости потока землетрясений (рис. П.18 а). Произошли все землетрясения роя с $ML \geq 6.0$ (рис. П.18 б) Смена режима совпадает с появлением вблизи очага роя землетрясений 25–30.07.2013 г. (рис. П.18 в).
			Этап Б: $dN \sim dt$, $\Delta t \sim 38$ час, $n=390$		
			Этап В: 1. Гипербола, $\Delta t \sim 40$ сут., $n=420$. 2. Экспонента, $b=0.012$, $\Delta t \sim 330$ сут., $n=110$.		
5	24.05.2013 $K_S=17$ $M_w=8.3$ $ML=7.8$	400×180	1. Гипербола, $\Delta t \sim 9$ час, $n=30$.	$T = \frac{3}{b} \sim$ 700	$K_S \geq 9.9$. Смена стадий совпадает во времени с двумя самыми сильными афтершоками с $M_w=6.7$ (рис. П.17 г).
			2. Гипербола, $\Delta t \sim 120$ сут., $n=21$.		
			3. Экспонента, $b=0.0043$, $\Delta t \sim 180$ сут., $n=8$.		
6	12.11.2013 $K_S=15$ $M_w=6.4$ $ML=6.8$	19×7	1. Гипербола, $\Delta t \sim 15$ сут., $n=16$.	$T = \frac{3}{b} \sim$ 150	$K_S \geq 7.4$. Сильные афтершоки ($ML=5.1$) не вызва- ли смены режима (рис. П.17 д).
			2. Экспонента, $b=0.019$, $\Delta t \sim 110$ сут., $n=17$.		

Заключение

На основе региональных каталогов землетрясений дана характеристика сейсмичности Камчатки в 2013 году. Оценены общая выделившаяся сейсмическая энергия, уровень сейсмичности по шкале «СОУС'09», активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ . Отмечена уникальность сильнейших сейсмических событий Камчатского региона 2013 года.

Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2013 г., со средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2013 гг.). Отмечено снижение активности A_{10} ниже среднего значения в районе Авачинского и Кроноцкого заливов и ее увеличение восточнее Авачинского залива. Статистически достоверное уменьшение γ наблюдалось на севере Камчатки в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова, а также в Авачинском заливе.

Детально рассмотрены рои и афтершоковые последовательности, сопровождавшие сильные землетрясения. Показано, что афтершоковые процессы состоят из нескольких характерных стадий, параметры которых приведены. Отмечается, что смена стадий, как правило, совпадает во времени с сильнейшими афтершоками последовательности.