

II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2012 г. и построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности. В комплекс рассматриваемых характеристик входят общая выделявшаяся сейсмическая энергия, активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL*-, ΔS - и «*Z*-функция», кластеризация землетрясений. Методики расчета этих параметров описаны в ежегодниках [*Землетрясения России в 2006 году*, 2009; *Землетрясения России в 2007 году*, 2009; *Землетрясения России в 2008 году*, 2010]. При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН [<http://www.emsd.ru>]. 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, в который попадает наиболее сейсмоактивная часть Камчатки. Важным требованием к используемым для анализа сейсмологическим данным является однородность каталога землетрясений. Поэтому 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].

Результаты исследования

Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделявшаяся в 2012 г. сейсмическая энергия составила $1.24 \cdot 10^{14}$ Дж при среднегодовом (за 51 год) значении $5.7 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.6 \cdot 10^{14}$ Дж. Значение функции распределения, соответствующей сейсмической энергии выделившейся в течение 2012 г., равно 0.42 ± 0.07 (рис. II.12).

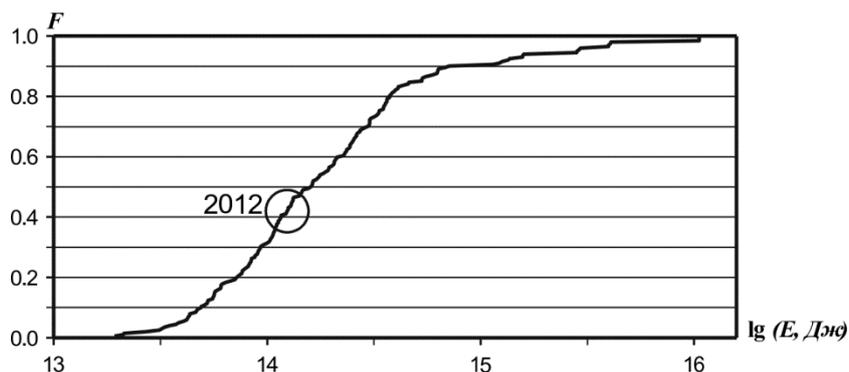


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2012 гг.

Кружком отмечено значение, соответствующее 2012 году

Для качественной оценки текущего уровня сейсмичности используется шкала и методика «СОУС'09», разработанная в лаборатории сейсмического мониторинга Камчатского филиала ГС РАН, 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. II.13 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2012 года.

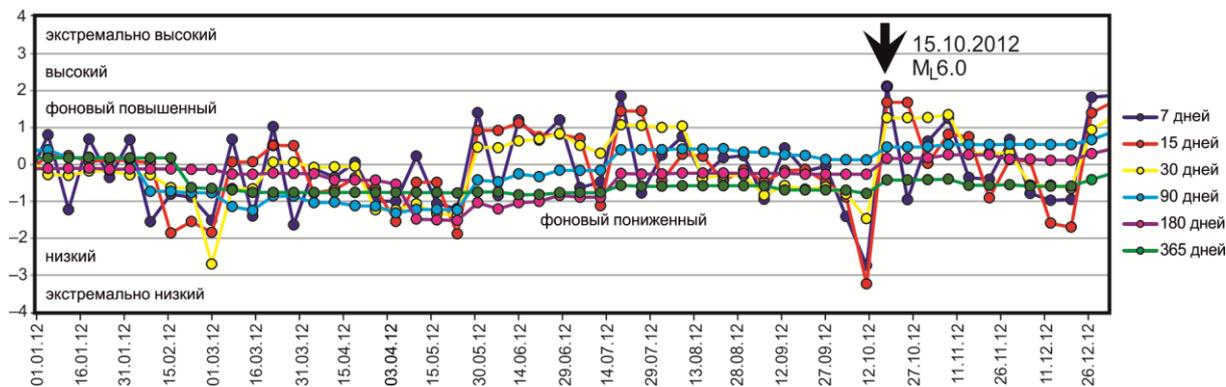


Рис. II.13. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах в 2012 г.

Следует отметить снижение регионального уровня сейсмичности до низкого и экстремально низкого в коротких временных окнах (7, 15 дней) перед землетрясением 15 октября с магнитудой $M_L=6.0$.

Наиболее сильными сейсмическими событиями 2012 г. являются землетрясение с магнитудой $M_L=6.0$, произошедшее на юге Камчатки 15 октября, и три землетрясения с магнитудой $M_L=5.9$, произошедшие в районе Камчатского залива 16 июля, 24 и 28 декабря. Выделившаяся при этих землетрясениях энергия составила 70% общей сейсмической энергии 2012 г. Землетрясение 15 октября ($M_L=6.0$) сопровождалось афтершоковой последовательностью, состоящей из 13 событий с энергетическими классами $K_S=8.6-12.6$. Также небольшая афтершоковая последовательность, состоящая из 10 землетрясений с энергетическими классами $K_S=8.5-11.6$, была вызвана землетрясением 24 декабря ($M_L=5.9$). Рой землетрясений, состоящий из 15 событий с энергетическими классами $K_S=8.5-11.3$, зафиксирован в июне в северо-восточной акватории Авачинского залива.

Эпицентры землетрясений 2012 г. с $M_L=5.9$ и 2σ -эллипсы рассеяния группированных землетрясений показаны на рис. II.14 а. Параметры этих сейсмических событий представлены в табл. II.2. Приведены дата, энергетический класс K_S , локальная магнитуда M_L и координаты главного события; логарифм суммарной энергии группы землетрясений $\lg E$ и длительность Δt , определенная как временной интервал, в течение которого произошло 75% сейсмических событий последовательности, обозначен тип последовательности – рой или афтершоки.

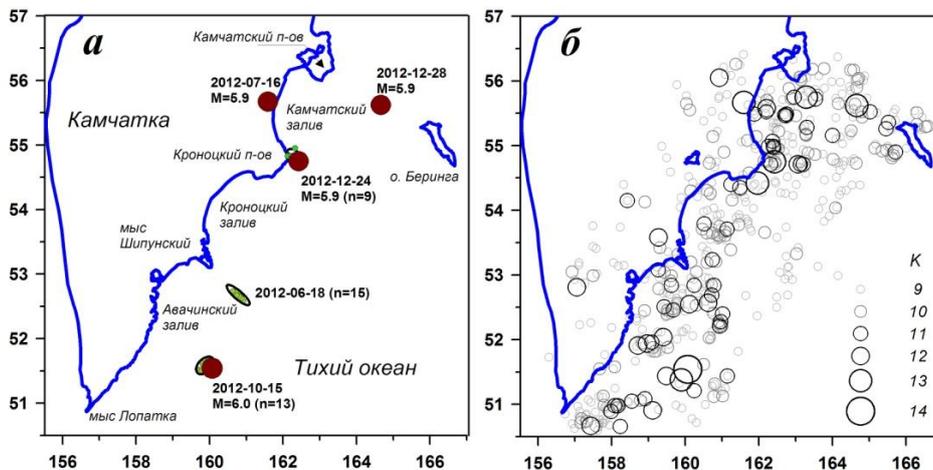


Рис. II.14. Сейсмичность Камчатки в 2012 г.:

а – эпицентры землетрясений с $M_L=5.9$ и группы землетрясений (показаны 2σ -эллипсы аппроксимации зоны группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе); **б** – эпицентры независимых землетрясений 2012 г. с $K_S=9-14$

Таблица П.2. Землетрясения с $ML \geq 5.9$, афтершоковые последовательности и рой, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2012 г.

Параметры главного события						$\lg(E, \text{Дж})$	$\Delta t, \text{дни}$	Тип группы
Дата	K_S	ML	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	$h, \text{км}$			
18.06.2012	11.3	4.9	52.67	160.84	16	11.7	1	рой
17.06.2012	13.3	5.9	55.67	161.59	80			
15.10.2012	13.5	6.0	51.54	160.07	45	12.6	9	афтершоки
24.12.2012	13.2	5.9	54.75	162.42	47	11.7	0.3	афтершоки
28.12.2012	13.3	5.9	55.62	164.66	82			

Группируемые, зависимые события (афтершоковые последовательности и рой) из каталога удалены, поскольку в силу своего компактного расположения в пространстве-времени они могут существенно исказить характеристики фоновой сейсмичности. Используемая для этого программа В.Б. Смирнова (МГУ им. М.В. Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в работе [Молчан, Дмитриева, 1991]. Число группируемых землетрясений в 2012 г. составило около 8% от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2012 г. представлена на рис. П.14 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2012 г. равен 0.47 ± 0.02 , что соответствует в пределах ошибки среднемуголетнему значению (0.475 ± 0.02).

Карты площадного распределения наклона графика повторяемости землетрясений γ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км, представлены на рис. П.15. Отмечается региональная особенность в распределении γ : его повышенные значения соответствуют продолжению Императорского хребта, уходящему под Камчатку в районе Кроноцкого полуострова. Этот эффект ярко проявляется при длительном (51 год) осреднении (рис. П.15 в), когда случайные или кратковременные вариации γ нивелируются. При сравнении карт γ , рассчитанных для 2012 г. (рис. П.15 б) и для всего времени детальных наблюдений (рис. П.15 в), визуально выделяется уменьшение γ в 2012 г. в районе Камчатского залива и увеличение γ на юге Камчатки, в районе мыса Лопатка.

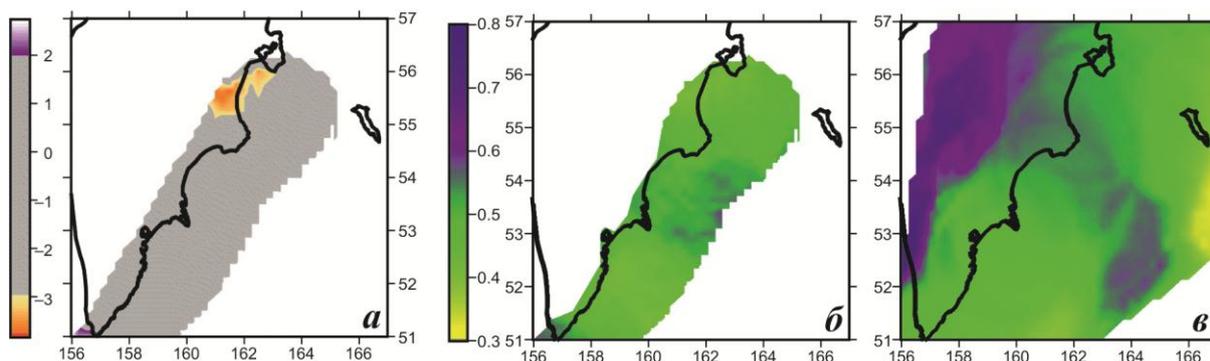


Рис. П.15. Средние значения наклона графика повторяемости γ в 2012 г. (б) и в 1962–2012 гг. (в). Изменение γ в 2012 г. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение (а)

Для выявления статистически значимых изменений γ применяется Z-тест. На рис. П.15 а показана карта нормированной вариации Z_γ для 2012 г. по сравнению с многолетним фоном. Карта построена при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса R с фиксированным количеством попавших в них N землетрясений (в данном случае $N=200$).

Статистическая достоверность уменьшения γ в районе Камчатского залива соответствует уровню значимости $\alpha=0.01$. Статистическая значимость увеличения γ в районе мыса Лопатка – на уровне $\alpha=0.05$. Впервые увеличение γ на юге Камчатки было отмечено по данным 2009 г. [Салтыков, Кравченко, 2011]. Аномалия сохраняет свое пространственное положение, но постепенно вырождается.

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по указанному району активность A_{10} в 2012 г. составила 0.249 ± 0.006 при среднемноголетнем значении 0.279 ± 0.001 . Таким образом, в целом активность региона была ниже среднего уровня на $\approx 10\%$.

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 2012 г. значительно отличается от среднемноголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Камчатского, Кроноцкого и Шипунского полуостровов, Авачинского залива и акватории, прилегающей к южной части Камчатки ($51-52^\circ\text{N}$), при этом восточнее Камчатского залива активность существенно превысила средние значения.

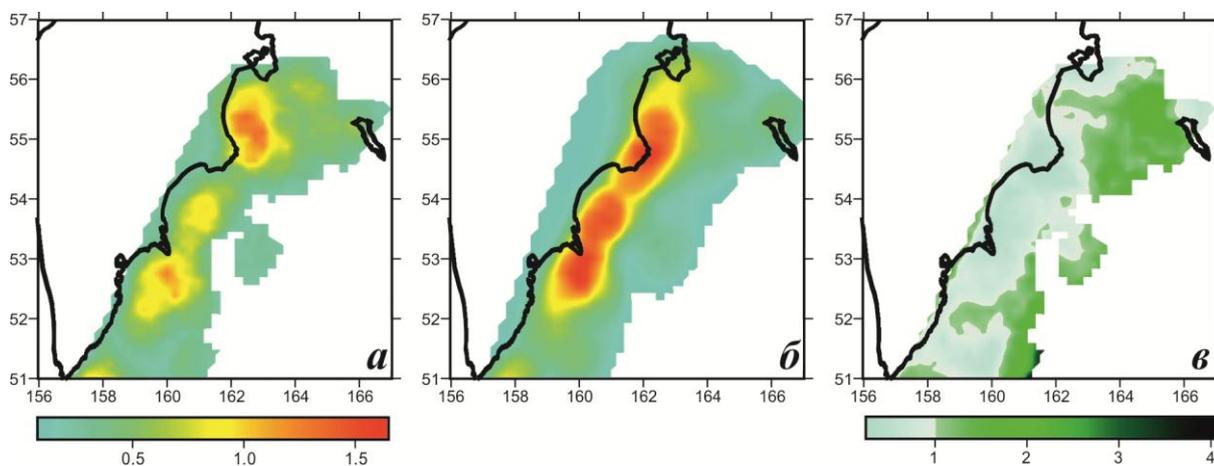


Рис. II.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2012 г. (а) и 1962–2012 гг. (б). Относительная сейсмическая активность A_{10} в 2012 г., по сравнению со средней многолетней активностью (в)

Мониторинг параметров RTL и ΔS

На рис. II.17 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2012 г. в сейсмоактивной области Камчатки. Штриховой линией отмечена область сканирования, для которой количество землетрясений, приходящихся на расчетный цилиндр, не менее 750. Аномалия, определенная за пределами этой области, не считается достоверной. Как следует из рисунка, значительных аномалий по параметру RTL в течение 2012 г. не наблюдалось.

На следующем за RTL -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии, согласно методике Г.А. Соболева [Соболев, 1999], должна проявиться форшоковая активизация.

На рис. II.18 представлена карта вариаций площади сейсмогенных разрывов ΔS в 2012 г. Область повышенных значений площади сейсмогенных разрывов ΔS в Камчатском заливе приходится на область сейсмического затишья по параметру RTL , закончившегося в апреле 2010 г. [Салтыков, Кравченко, 2011].

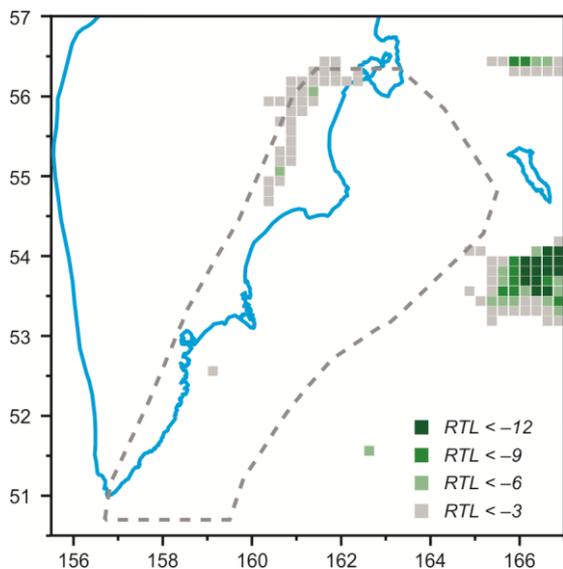


Рис. II.17. Минимальные значения RTL-параметра в 2012 г.

Пунктиром отмечена область надежного определения параметра RTL

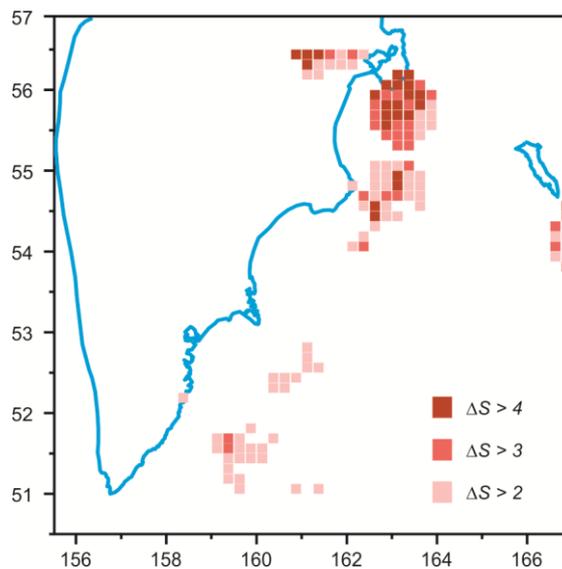


Рис. II.18. Значения ΔS-параметра, рассчитанные на декабрь 2012 г.

Контроль кластеризации землетрясений

На рис. II.19 отмечены эпицентры главных событий кластеров, выделенных в 2012 г. в зоне мониторинга сейсмичности Камчатки. Распределение кластеров по сейсмофокальной области неравномерно. Обращают на себя внимание группы кластеров с наибольшими по энергии главными событиями на востоке и юго-востоке от Авачинского залива. Группа кластеров в Камчатском заливе примыкает к зоне повышенных значений ΔS (рис. II.18).

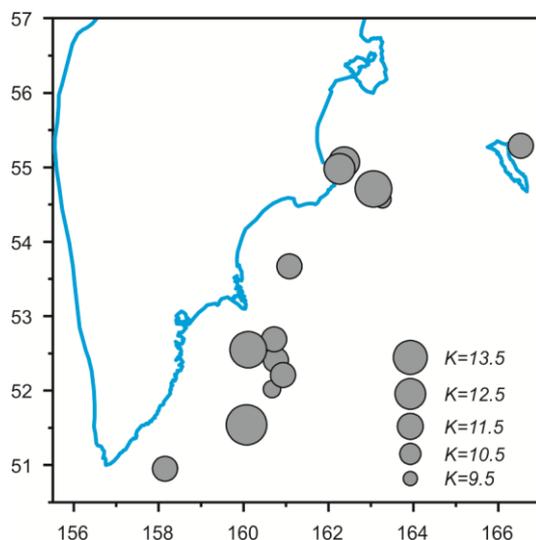


Рис. II.19. Эпицентры главных событий кластеров землетрясений 2012 г.

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

В 2012 г. в сейсмоактивной области Камчатки существовали четыре пространственные области (рис. II.20), выделенные с помощью Z-функции и представляющие интерес в качестве возможного предвестника сильного землетрясения. Графики функции $Z(t)$, рассчитанные для выделенных зон сейсмической аномалии в скользящем временном окне 12 месяцев, приведены на рис. II.21. В зоне I (рис. II.20) уменьшение скорости сейсмического потока в 16 раз ($SRD=0.94$) наблюдалось в течение 16 месяцев – с февраля 2009 г. по май 2011 года. Эпицентр землетрясения 15.10.2012 г. с магнитудой

$ML=6.0$ приходится на границу этой аномалии (рис. П.20). Землетрясение произошло спустя полтора года после окончания затишья. Момент землетрясения отмечен стрелкой на соответствующем графике функции $Z(t)$ (рис. П.21). Абсолютное сейсмическое затишье существовало в районе Авачинского залива, мыса Шипунского и южной части Кроноцкого залива (зона II) в течение 14 месяцев (с мая 2011 г. по июль 2012 г.). В районе Камчатского полуострова (зона III) отмечено уменьшение скорости сейсмического потока в десять раз ($SRD=0.9$) в течение 16 месяцев (август 2011 г. – декабрь 2012 г.). В течение всего 2012 г. уменьшение уровня сейсмичности в восемь раз ($SRD=0.875$) наблюдалось в районе Кроноцкого полуострова (зона IV).

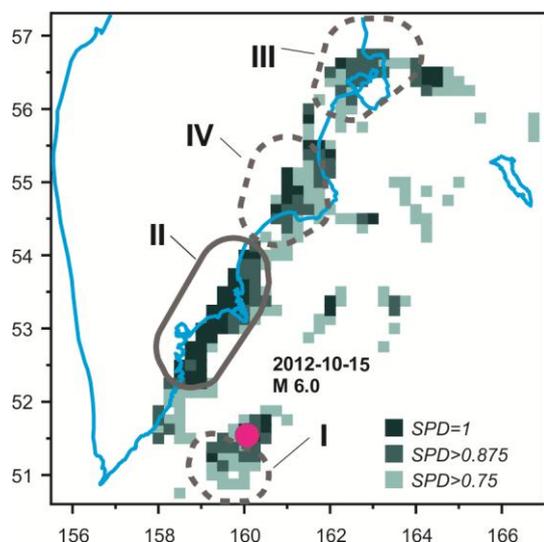


Рис. П.20. Карта значений $SRD>0.75$ в течение 2012 года.

Штриховой линией отмечена область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз в течение не менее года, сплошной линией – область абсолютного сейсмического затишья

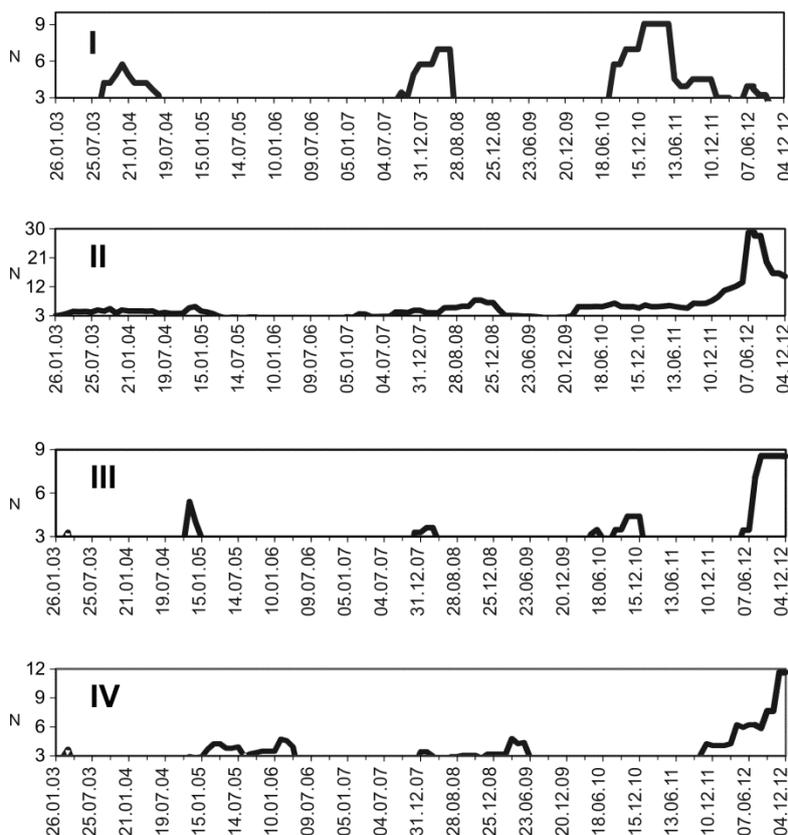


Рис. П.21. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон сейсмического затишья (рис. П.20) в скользящем окне шириной 12 месяцев. Стрелкой отмечен момент землетрясения 15 октября 2012 г. ($ML=6.0$)

Заключение

На основе региональных каталогов Камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2012 году. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL*-, ΔS - и «*Z*-функции». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2012 г. с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2012 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2012 г.:

– наклон графика повторяемости: пониженные значения на севере Камчатки (Камчатский полуостров, Камчатский залив), повышенные значения на юге Камчатки (район м. Лопатка);

– активность A_{10} : повышенные значения в Камчатском заливе, на юге Авачинского залива, юге Камчатки; пониженные – Камчатский, Кроноцкий и Шипунский полуострова, Кроноцкий и Авачинский заливы;

– *Z*-функция: на севере Камчатки наблюдается развитие *Z*-аномалий; в Авачинском заливе – абсолютное сейсмическое затишье. Завершившаяся *Z*-аномалия на юге Камчатки связывается с землетрясением 15.10.2012 г. $M_L=6.0$;

– площадь сейсмогенных разрывов dS : повышенные значения в Камчатском заливе, в районе Камчатского и Кроноцкого полуостровов;

– кластеры землетрясений: выявлены два кластера с энергией максимального землетрясения $K \geq 12.0$. Кластеры с наибольшими по энергии главными событиями расположены на востоке и юго-востоке от Авачинского залива.

Учитывая хорошее пространственно-временное соответствие ряда признаков, имеющих потенциально предвестниковый характер, можно сделать заключение о повышенной сейсмической опасности района Камчатского залива и юга Камчатки. Этот вывод соответствует долгосрочному прогнозу академика С.А. Федотова [Федотов и др., 2008].

Представленные материалы были своевременно рассмотрены при оценке развития сейсмической обстановки на Камчатке Российским экспертным советом по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.