

II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2009 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. При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН [<http://www.emsd.ru>]. 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]. Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного широтой $\varphi=50.5^\circ\text{N}$ и 56.5°N , долготой $\lambda=156.0^\circ\text{E}$ 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 $K_5=8.5$ 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 2009 г. сейсмическая энергия $E = \sum_i 10^{K_i}$, где K_i – энергетический класс землетрясения, составила $2.6 \cdot 10^{13}$ Дж при среднегодовом (за 48 лет) значении $6.0 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.6 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделявшейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2009 гг. (рис. II.12). За все время детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (с 1962 г.) такое низкое значение сейсмической энергии наблюдалось впервые.

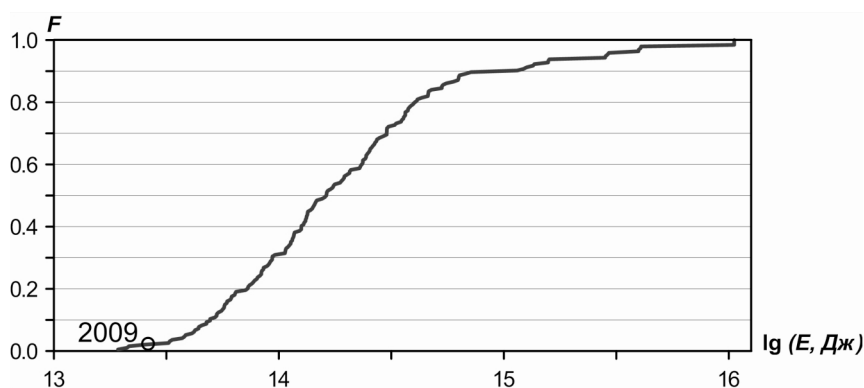


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделявшейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2009 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2009 г.

Почти четверть всей выделявшейся в 2009 г. сейсмической энергии ($6.3 \cdot 10^{12}$ Дж) приходится на два наиболее сильных землетрясения этого года: 14 января и 11 июня с магнитудами $M_L=5.5$. Оба землетрясения произошли в Авачинском заливе, афтершоками не сопровождались. Небольшая афтершоковая последовательность, состоящая

из 14 землетрясений с энергетическими классами $K_S=8.5-10.4$, сопровождала землетрясение 23 октября с $K_S=11.8$ ($M_L=5.2$). Также в восточной части Авачинского залива в июне–июле этого года был зафиксирован рой из 18 землетрясений с энергетическими классами $K_S=8.5-10.5$.

Эпицентры землетрясений 2009 г. с $M_L=5.5$ и 2σ -эллипсы рассеяния группированных землетрясений показаны на рис. П.13 а. Параметры этих сейсмических событий представлены также в табл. П.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.

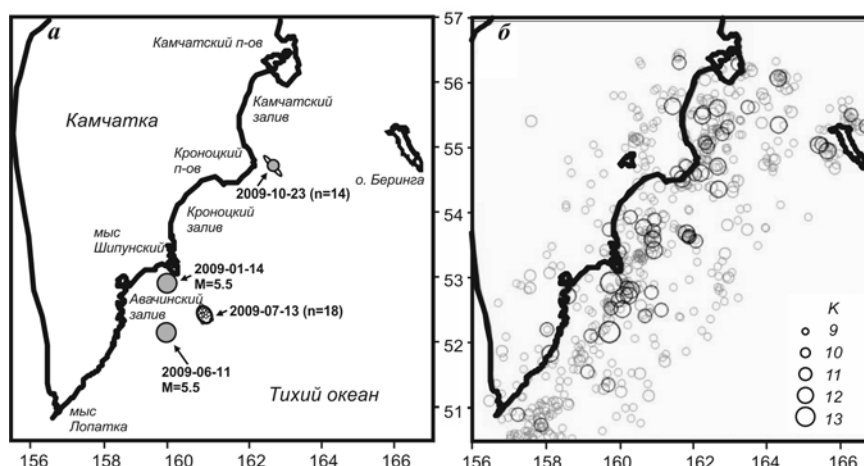


Рис. П.13. Сейсмичность Камчатки в 2009 г.:

а – эпицентры землетрясений с $M_L=5.5$ и группы землетрясений (показаны 2σ -эллипсы аппроксимации зоны группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе); б – эпицентры независимых землетрясений 2009 г. с $K_S=9-13$

Таблица П.2. Наиболее сильные землетрясения, афтершоковая последовательность и рой, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2009 г.

Параметры главного события						$\lg (E, Дж)$	$\Delta t, дни$	Тип группы
дата	K_S	M_L	$\varphi, ^\circ N$	$\lambda, ^\circ E$	$h, км$			
14.01.2009	12.5	5.5	52.2	159.7	11	12.5	–	–
11.06.2009	12.5	5.5	50.9	159.7	98	12.5	–	–
13.07.2009	10.5	4.5	52.4	160.7	4	11.0	28	рой
23.10.2009	11.8	5.2	54.7	162.7	10	11.8	2	афтершоки

Афтершоковые последовательности в силу своего компактного расположения в пространстве-времени могут существенно исказить характеристики фоновой сейсмичности. Программа, используемая для их выделения, создана В.Б. Смирновым (МГУ им. М.В. Ломоносова) и реализует алгоритм, описанный в работе [Молчан, Дмитриева, 1991]. Число выделенных по этой методике землетрясений в 2009 г. составило около 5% от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2009 г. представлена на рис. П.13 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2009 г. равен 0.61 ± 0.02 , что существенно превышает среднееголетнее значение 0.500 ± 0.003 , т.е. пропорция между землетрясениями различной энергии изменилась в сторону уменьшения доли более сильных событий.

С целью обнаружения детальных особенностей сейсмичности региона рассчитываются карты площадного распределения γ . Карты наклона графика повторяемости землетрясений, построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км, представлены на рис. П.14. Отмечается региональная особенность в распределении γ : его повышенные значения соответствуют продолжению Императорского хребта, уходящему под Камчатку в районе Кроноцкого полуострова. Этот эффект проявляется при длительном (48 лет) осреднении (рис. П.14 б), когда случайные или кратковременные вариации γ нивелируются. При сравнении карт γ , рассчитанных для 2009 г. и для всего времени детальных наблюдений, на фоне общего для региона увеличения γ выделяется более сильное увеличение γ на юге Камчатки.

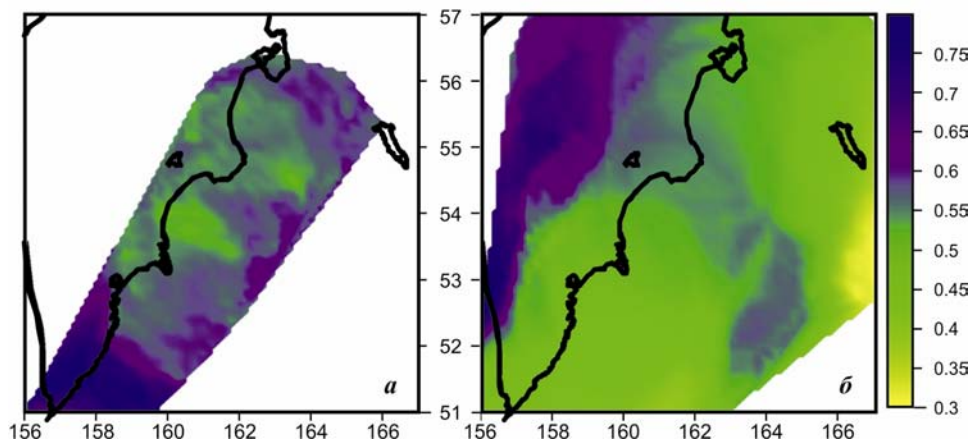


Рис. П.14. Средние значения наклона графика повторяемости γ :
а – в 2009 г.; б – в 1962–2009 гг.

Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест.

На рис. П.15 приведены карты нормированной вариации Z_γ для 2006–2008 гг. (а) и для 2009 г. (б), по сравнению с многолетним фоном.

Карты построены при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса R с фиксированным количеством попавших в них землетрясений N (в данном случае $N=100$). Проведенное сканирование подтверждает высокую статистическую достоверность увеличения γ на юге Камчатки в 2009 году. В прошлые годы (как минимум 5 лет) в этом районе наблюдалась аномалия пониженных значений γ (рис. П.15 а). Эти две аномалии соседствуют в пространстве-времени, что может косвенно указывать на их генетическую взаимосвязь.

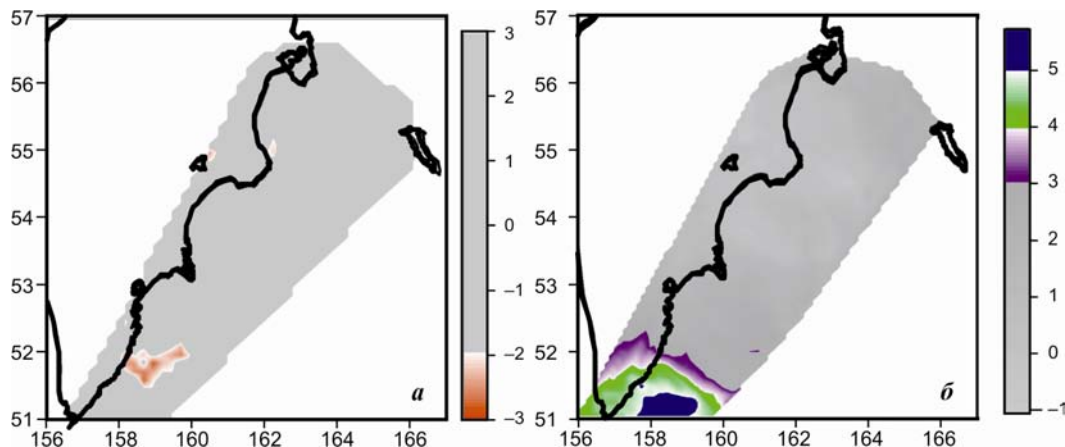


Рис. П.15. Изменение γ в 2006–2008 гг. (а) и 2009 г. (б), по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по исследуемому району активность A_{10} в 2009 г. составила 0.244 ± 0.009 при среднемноголетнем значении 0.281 ± 0.001 , т.е. активность региона в 2009 г. была ниже среднего уровня на $\approx 13\%$.

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. П.16.

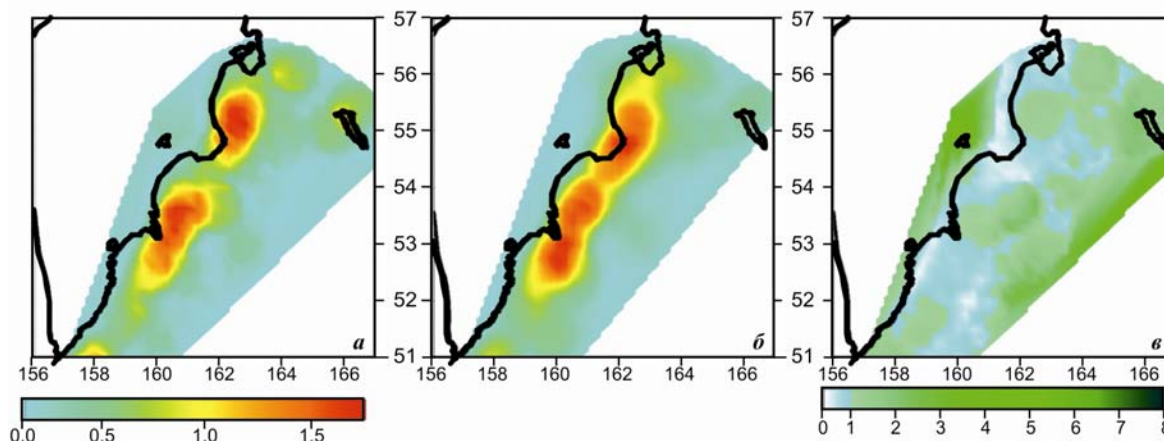
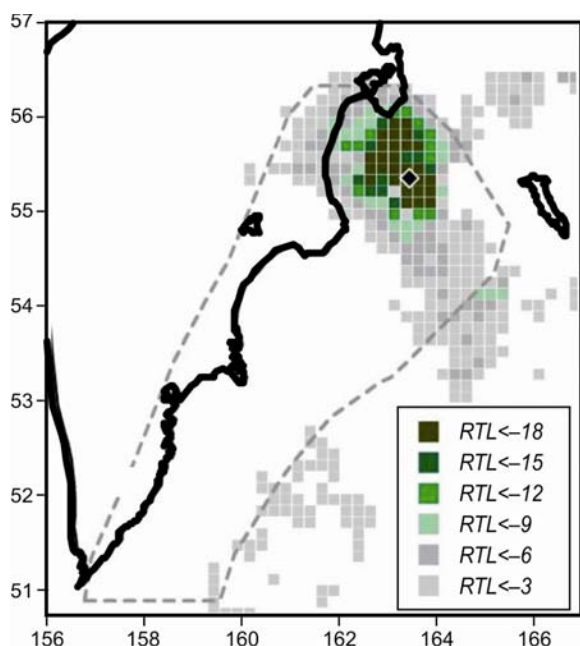


Рис. П.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2009 г. (а) и 1962–2009 гг. (б). Относительная сейсмическая активность A_{10} в 2009 г., по сравнению со средней многолетней активностью (в)

Как следует из сравнения рис. П.16 а и П.16 б, в основном распределение активности A_{10} в 2009 г. соответствует среднемноголетнему распределению. Область повышенной сейсмической активности визуально проявляется в северной акватории острова Беринга. Существование этой области подтверждается построением карты относительных значений A_{10} , полученных на каталоге за 2009 год и многолетнем (за 48 лет) каталоге (рис. П.16 в). Повышенные относительные значения активности A_{10} наблюдались также в районе Камчатского пролива, Камчатского залива, восточнее Кроноцкого залива и на самом юге Камчатки. Заметим, что повышенные значения на границах области статистически малозначимы.

Мониторинг параметров RTL и ΔS



На рис. П.17 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2009 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.

Рис. П.17. Минимальные значения RTL -параметра в 2009 г. Ромбом отмечена характерная точка аномалии сейсмического затишья, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

Аномалия сейсмического затишья по параметру RTL в 2009 г. занимала всю акваторию Камчатского залива. Согласно временному ходу параметра RTL , рассчитанному для характерной точки аномалии (отмечена ромбом на рис. II.17), длительность сейсмического затишья в Камчатском заливе к концу 2009 г. составила более двух лет, минимальное значение $RTL = -25$ (рис. II.18).

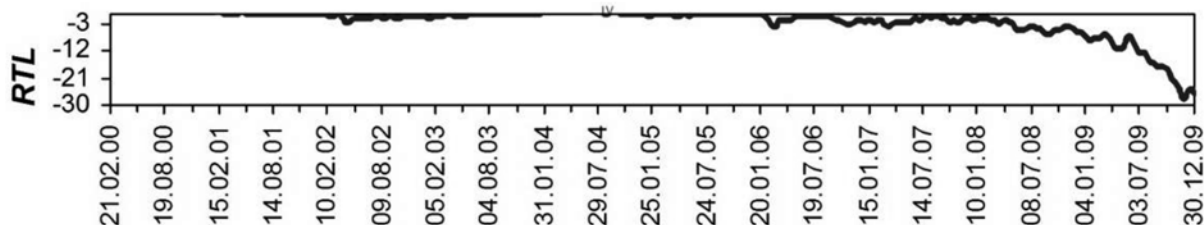


Рис. II.18. Временной ход RTL -параметра в характерной точке аномалии (рис. II.17) в течение последних 10 лет

На следующем за RTL -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии должна проявиться форшоковая активизация, согласно методике Г.А. Соболева [Соболев, 1999]. Выявление сейсмической активизации построено на основе анализа площадей сейсмогенных разрывов. Вычисляется разница ΔS между накопленной площадью сейсмогенных разрывов в пределах круговой области радиусом $R_{\max} = 50$ км за последний год ($T_{\max} = 1$ год) и среднемноголетним значением (T_{\max} – длина каталога). Площади разрывов оцениваются по формуле:

$$S = \frac{1}{T_{\max}} \cdot \frac{1}{S_{R_{\max}}} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{\frac{2}{3}(K_i - K_0)},$$

где K_i – энергетический класс текущих событий, $K_0 = 8.5$. Далее параметр ΔS нормируется на его среднеквадратичное отклонение за весь период наблюдений в данной пространственной области.

На рис. II.19 представлена карта максимальных вариаций площади сейсмогенных разрывов ΔS в 2009 г., согласно которой яркие проявления локального увеличения площади сейсмогенных разрывов dS в 2009 г. отсутствуют.

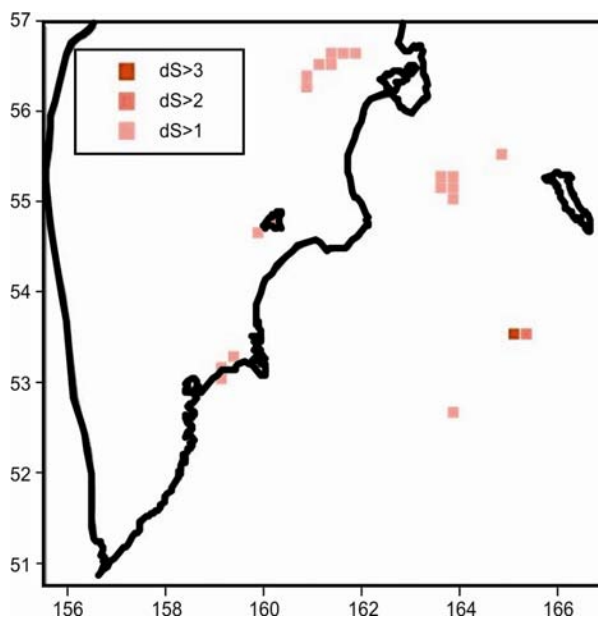


Рис. II.19. Максимальные значения ΔS -параметра, рассчитанные на декабрь 2009 г.

Контроль кластеризации землетрясений

На рис. П.20 отмечены кластеры, выделенные в 2009 г. в исследуемой области Камчатки. Как видно из рисунка, яркие аномалии в местоположении кластеров не выделяются. Можно отметить отсутствие кластеров землетрясений в Авачинском заливе и южнее, до мыса Лопатка.

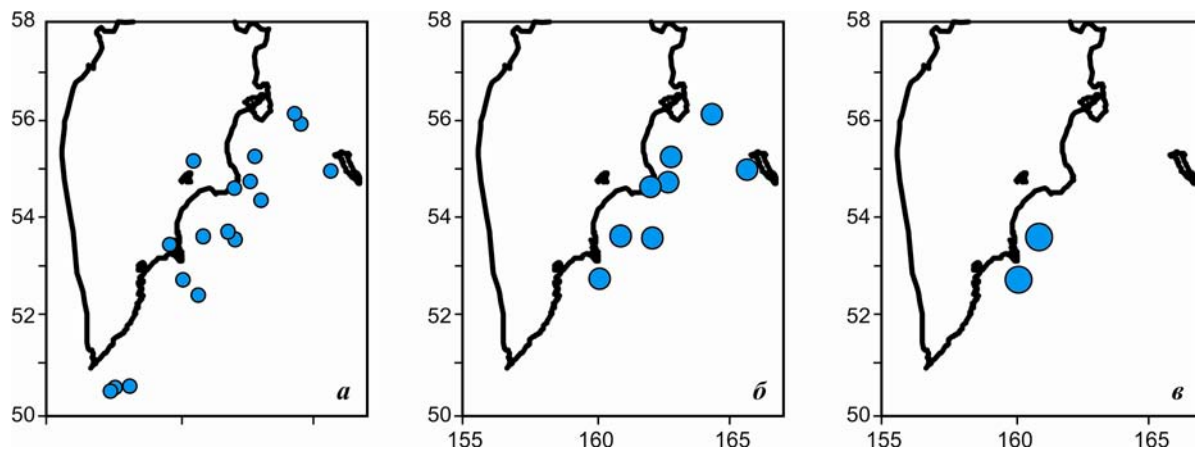


Рис. П.20. Эпицентры главных событий кластеров землетрясений 2009 г. при различных значениях параметров k_0 и K_0 :
 а – $k_0=8.5, K_0=9.5$; б – $k_0=9.5, K_0=10.5$; в – $k_0=10.5, K_0=11.5$

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

В 2009 г. в сейсмоактивной области Камчатки существовала лишь одна пространственная область (рис. П.21), выделенная с помощью Z-функции и представляющая интерес в качестве возможного предвестника сильного землетрясения. В отдельных узлах на юге Камчатки наблюдались большие значения SRD , но малое число землетрясений не позволило квалифицировать их как аномалии.

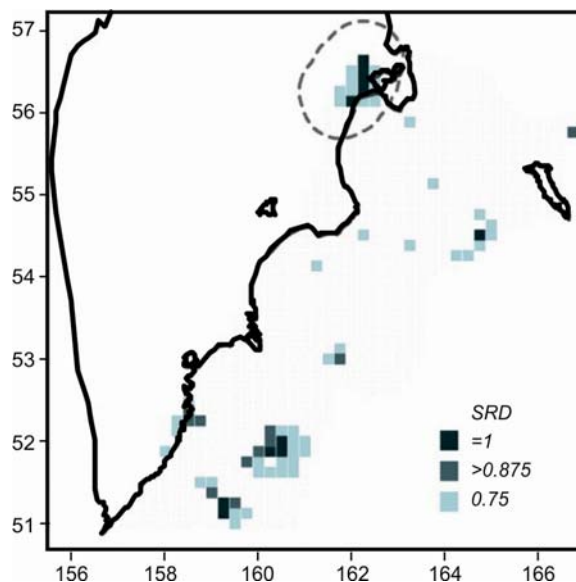


Рис. П.21. Карта значений $SRD > 0.75$ в 2009 г. Штриховой линией отмечена область уменьшения скорости сейсмического потока в семь раз в течение 14 месяцев

Графики функций $LTA(t)$ и $SRD(t)$, рассчитанные для выделенной зоны сейсмической аномалии, приведены на рис. П.22. В этой зоне (рис. П.21) уменьшение скорости сейсмического потока в семь раз в течение 14 месяцев наблюдалось с декабря 2007 г. по январь 2009 года.

На рис. П.22 приведен график $Z(t)$, построенный для выделенной зоны для временного окна $dT=14$ мес., согласно которому сейсмическое затишье статистически значимо.

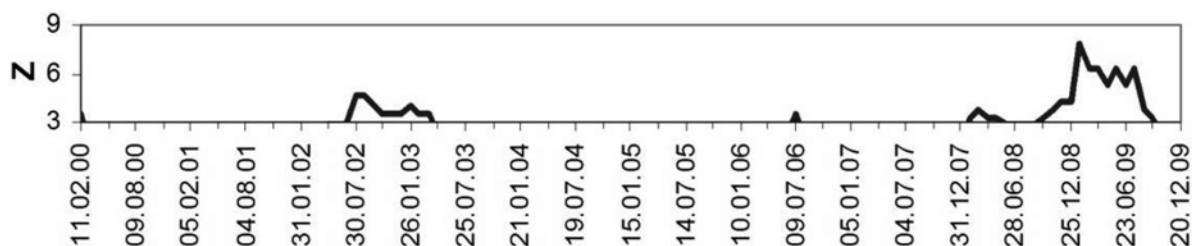


Рис. П.22. Зависимость $Z(t)$, рассчитанная для области уменьшения интенсивности сейсмического потока в семь раз (рис. П.21) в скользящем окне шириной 14 месяцев

Заключение

На основе каталогов землетрясений Камчатского региона построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2009 году. В набор рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик *RTL* и «*Z*-функции». Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2009 г. с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2009 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2009 г., в целом не противоречащие друг другу, несмотря на различие методик мониторинга:

- на севере Камчатки (в Камчатском заливе) наблюдается развитие аномалии *RTL*, завершилась *Z*-аномалия, наблюдаются повышенные значения активности A_{10} , статистически значимых вариаций γ не происходило;

- на юге Камчатки наблюдаются повышенные значения активности A_{10} и резкое (в 1.5 раза в течение одного года) увеличение наклона графика повторяемости. Примечательно, что ранее в этой области наблюдалось статистически значимое уменьшение γ .

Наиболее яркими аномалиями в сейсмическом режиме Камчатки в 2009 г. следует считать абсолютный минимум сейсмической энергии землетрясений, установленный за все время детальных наблюдений (1962–2009 гг.), региональное изменение (увеличение) наклона графика повторяемости землетрясений и смену знака аномалии γ на юге Камчатки.

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 могут быть полезными при рассмотрении и оценке развития сейсмической обстановки на Камчатке заинтересованными структурами, например Российским экспертным советом по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.