

II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Введение

В настоящем разделе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2010 г. и построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности. В комплекс рассматриваемых характеристик входят общая выделившаяся 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 $K_S=8.5$ 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 выделившаяся в 2010 г. сейсмическая энергия $E = \sum_i 10^{K_i}$, где K_i – энергетический класс землетрясения, составила $1.8 \cdot 10^{14}$ Дж при среднегодовом (за 49 лет) значении $5.9 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.6 \cdot 10^{14}$ Дж. Для сопоставления текущего года с остальными годами по выделившейся за год сейсмической энергии используется функция распределения, построенная по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2010 гг. (рис. II.12). Сейсмическая энергия, выделившаяся в течение 2010 г., близка к медианному значению.

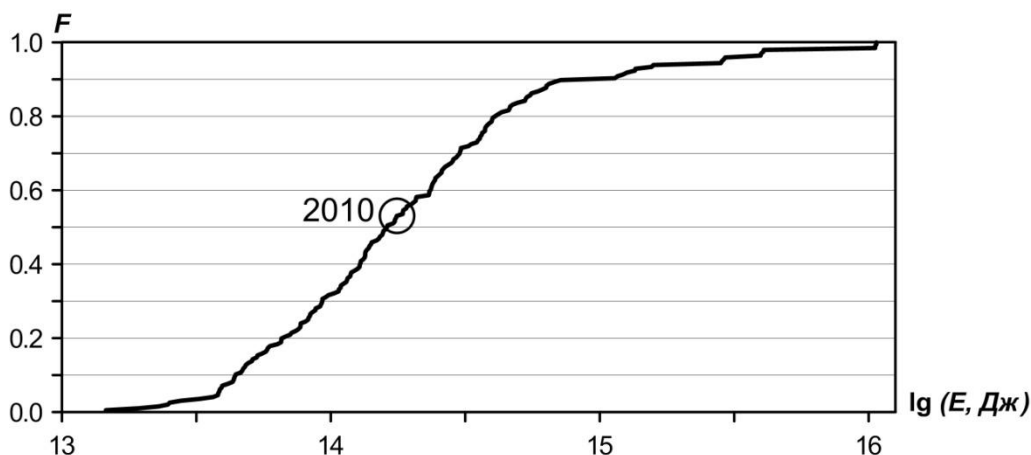


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2010 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2010 г.

Для качественной оценки текущего уровня сейсмичности в 2010 г. была использована шкала и методика «СОУС'09», разработанная в лаборатории сейсмического мониторинга, 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 2010 года. Следует отметить, что первую половину 2010 г. сейсмичность для временного окна один год находилась на минимальном уровне за все время инструментальных наблюдений. Землетрясение 30 июля 2010 г. с $M_L=6.3$ изменило уровень на фоновый средний для второй половины 2010 г. в этом же временном окне. Интересным фактом представляется снижение регионального уровня сейсмичности при более коротком временном окне перед наиболее сильными землетрясениями 2010 г. – 30.07.2010 г. с $M_L=6.3$ и 16.11.2010 г. с $M_L=5.9$.

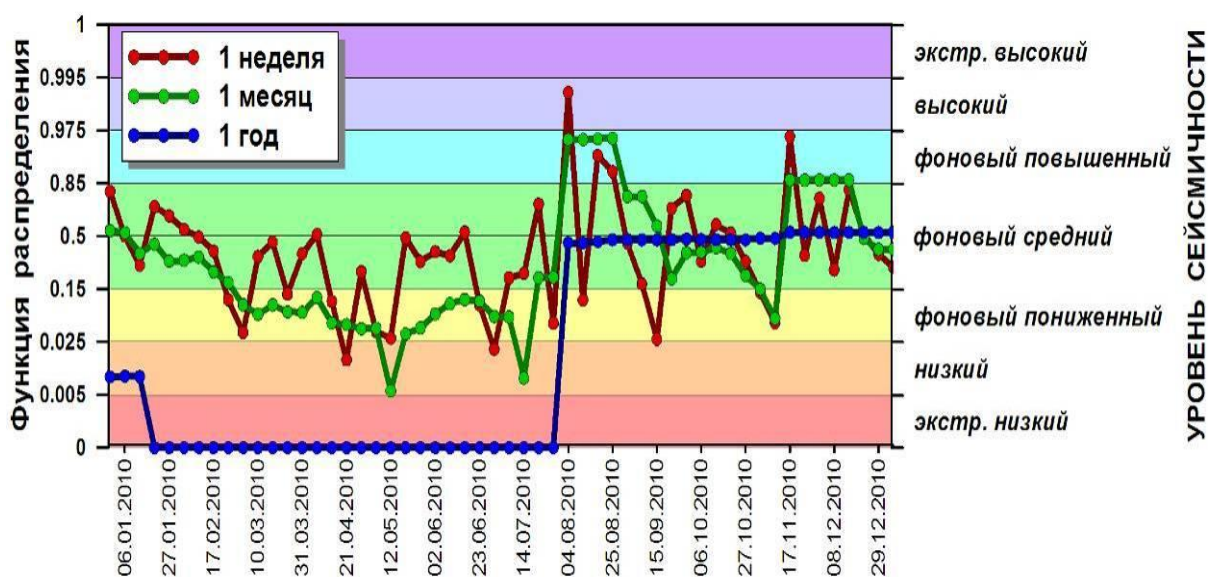


Рис. II.13. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах в 2010 году

Наиболее сильное сейсмическое событие 2010 г. – землетрясение с $M_L=6.3$, произошедшее на востоке от Авачинского залива 30 июля 2010 года. Землетрясение сопровождалось афтершоковой последовательностью, состоящей из 47 событий с $K_S=8.5-12.6$. Энергия землетрясения и сопутствующих ему афтершоков составила почти 3/4 всей выделившейся на Камчатке в 2010 г. сейсмической энергии. Стоит отметить также последовательность, состоящую из 19 афтершоков с энергетическими классами $K_S=8.5-11.4$, вызванную землетрясением 15 августа с $K_S=12.9$ ($M_L=5.7$) на юге Кроноцкого залива, и рой из 21 землетрясения с $K_S=8.5-11.9$, зафиксированный в октябре-ноябре 2010 г. в районе вулкана Кизимен (55.1°N , 160.3°E).

Эпицентры землетрясений 2010 г. с $M_L=5.5$ и 2σ -эллипсы рассеяния группированных землетрясений показаны на рис. II.14 а. Параметры этих сейсмических событий представлены также 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.

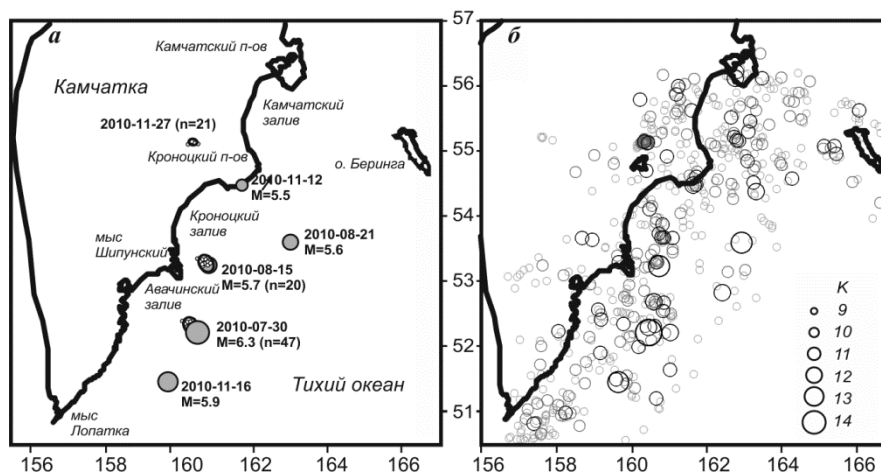


Рис. П.14. Сейсмичность Камчатки в 2010 г.:

а – эпицентры землетрясений с $M_L \geq 5.5$ и группы землетрясений (показаны 2σ -эллипсы аппроксимации зоны группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе); *б* – эпицентры независимых землетрясений 2010 г. с $K_S = 9-13$

Таблица П.2. Землетрясения с $M_L \geq 5.5$, афтершоковые последовательности и рой, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2010 г.

Параметры главного события						$\lg(E, Дж)$	$\Delta t, дни$	Тип группы
Дата	K_S	M_L	$\varphi, ^\circ N$	$\lambda, ^\circ E$	$h, км$			
30.07.2010	14.1	6.3	52.20	160.50	38	14.1	1	афтершоки
15.08.2010	12.9	5.7	53.25	160.74	56	12.9	0.3	афтершоки
21.08.2010-	12.6	5.6	53.61	162.94	83	12.6	–	–
12.11.2010	12.4	5.5	54.48	161.65	71	12.4	–	–
16.11.2010	13.3	5.9	51.46	159.65	61	13.3	–	–
27.11.2010	11.9	5.2	55.20	160.40	7	12.1	39	рой

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 2010 г. составило около 17% от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2010 г. представлена на рис. П.14 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ в 2010 г. равен 0.56 ± 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.15. 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 (49 лет) осреднении (рис. П.15 б), когда случайные или кратковременные вариации γ нивелируются. При сравнении карт γ , рассчитанных для 2010 г. и для всего времени детальных наблюдений, на фоне общего для региона увеличения γ выделяется более сильное увеличение γ на юге Камчатки и в окрестности Кроноцкого полуострова.

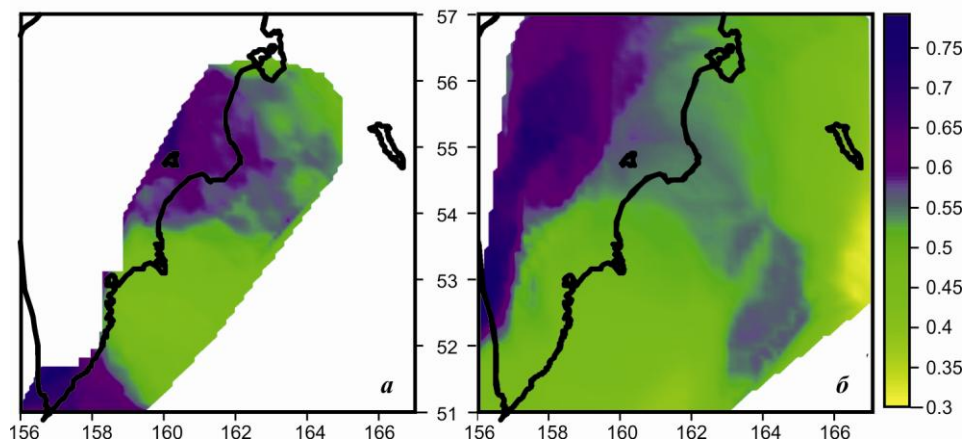


Рис. П.15. Средние значения наклона графика повторяемости γ :
а – в 2010 г.; б – в 1962–2010 гг.

Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z-тест.

На рис. П.16 приведены карты нормированной вариации Z_γ для 2010 г. (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 2010 году. Следует обратить внимание на то, что увеличение γ на юге Камчатки было отмечено впервые по данным 2009 года. Эта аномалия сохраняет свое пространственное положение, но можно предположить на основе значений Z , что она начинает вырождаться. Для остальной территории статистически значимых вариаций γ в любую сторону не обнаружено.

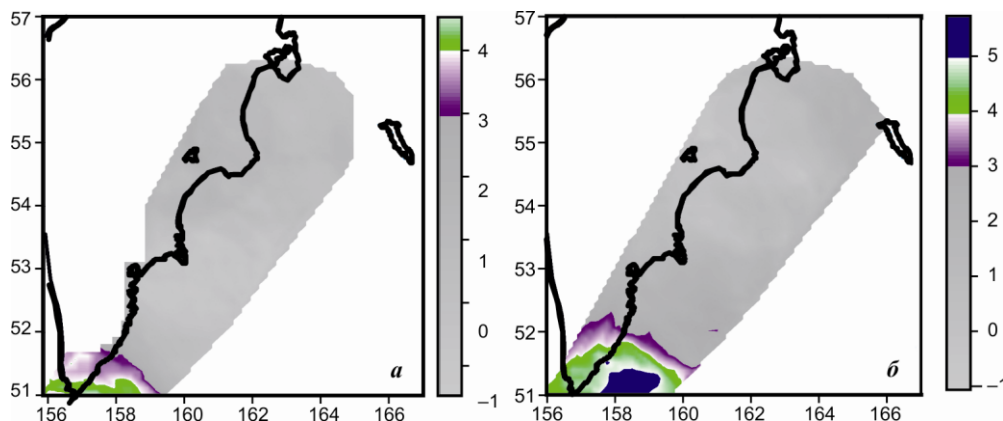


Рис. П.16. Изменение γ в 2010 г. (а) и в 2009 г. (б) по сравнению с многолетним фоном,
нормированное на его среднеквадратичное отклонение

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по исследуемому району активность A_{10} в 2010 г. составила 0.256 ± 0.008 при среднемноголетнем значении 0.279 ± 0.001 , т.е. активность региона в 2010 г. была ниже среднего уровня на $\approx 8\%$.

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.17. Как следует из сравнения рис. П.17 а и П.17 б, в основном распределение активности A_{10} в 2010 г. соответствует среднемноголетнему распределению. Наиболее яркой аномалией можно считать сейсмическую активизацию в районе вулкана Кизимен (55.1°N , 160.3°E).

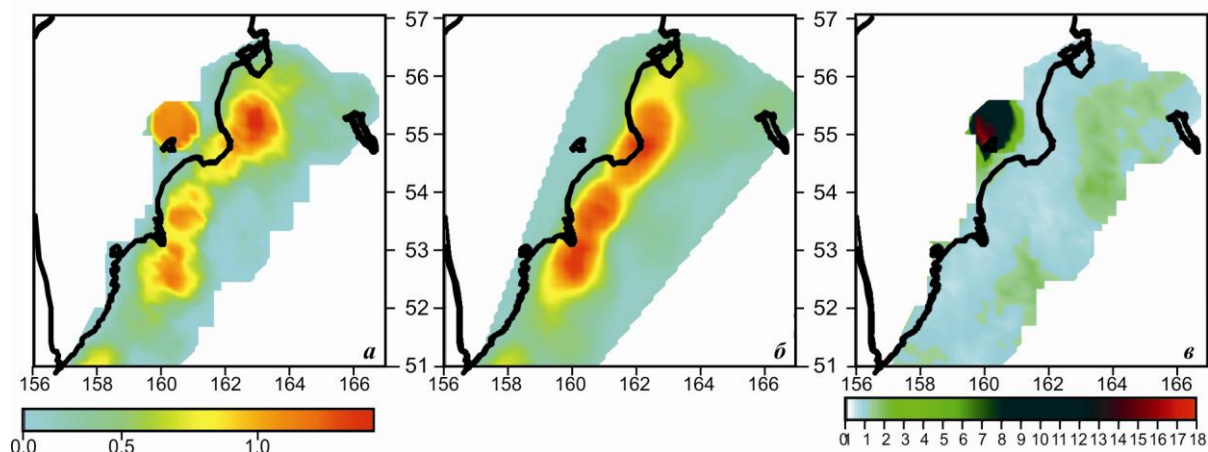


Рис. 11.17. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2010 г. (а) и 1962–2010 гг. (б). Относительная сейсмическая активность A_{10} в 2010 г., по сравнению со средней многолетней активностью (в)

Учитывая в среднем низкий уровень сейсмичности этой территории, рост активности A_{10} в 2010 г. произошел более чем на порядок. Из анализа рис. 11.17 можно сделать вывод, что в 2010 г. повышенные относительные значения активности A_{10} наблюдались в районе Камчатского пролива, восточнее Камчатского, Кроноцкого и Авачинского заливов и на самом юге Камчатки.

Мониторинг параметров RTL и ΔS

На рис. 11.18 показана карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2010 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.

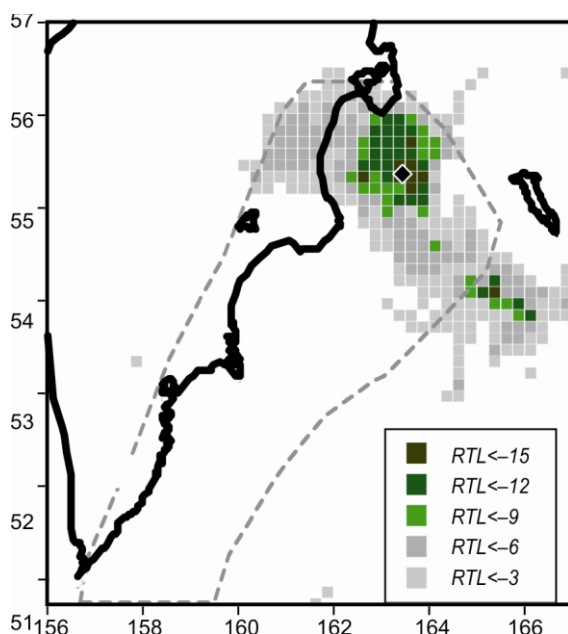


Рис. 11.18. Минимальные значения RTL -параметра в 2010 г. Ромбом отмечена характерная точка аномалии сейсмического затишья, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

Аномалия сейсмического затишья по параметру RTL в Камчатском заливе проявилась весной 2008 г. и закончилась осенью 2010 года. Согласно временному ходу параметра RTL , рассчитанному для характерной точки аномалии (отмечена ромбом на рис. 11.18), длительность сейсмического затишья составила около двух с половиной лет. Минимальное значение $RTL = -28$ за все время развития аномалии (рис. 11.19).

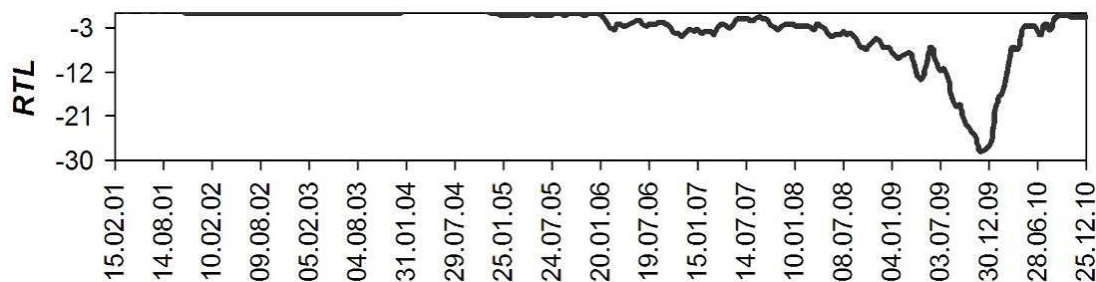


Рис. II.19. Временной ход RTL -параметра в характерной точке аномалии (рис. II.18) в течение последних 10 лет

На следующем за RTL -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии должна проявиться форшоковая активизация, согласно методике Г.А. Соболева [Соболев, 1999], описанной также в ежегодниках [Землетрясения России в 2006 году, 2009; Землетрясения России в 2007 году, 2009; Землетрясения России в 2008 году, 2010]. 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 среднееголетним значением (T_{\max} – длина каталога).

На рис. II.20 представлена карта максимальных вариаций площади сейсмогенных разрывов ΔS в 2010 году. Можно говорить об отсутствии в 2010 г. проявления локального увеличения площади сейсмогенных разрывов ΔS в Камчатском заливе. Аномалии ΔS восточнее Кроноцкого и Авачинского заливов не имеют пространственно близких аномалий RTL . Таким образом, свидетельства о переходе подготовки сильного землетрясения на юге Камчатки или в Камчатском заливе во второй этап – форшоковой активизации после завершения сейсмического затишья по параметру RTL – нет.

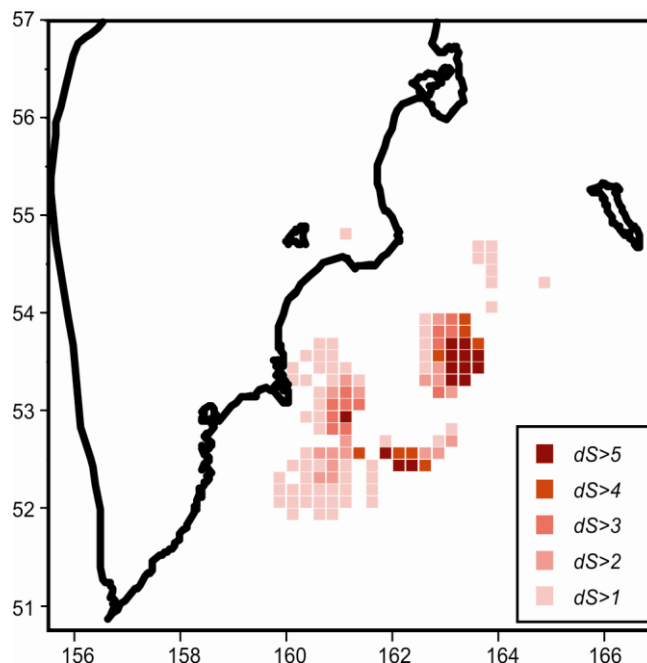


Рис. II.20. Максимальные значения ΔS -параметра в 2010 году

Контроль кластеризации землетрясений

На рис. II.21 отмечены кластеры, выделенные в 2010 г. в исследуемой области Камчатки. Как видно из рисунка, распределение кластеров по сейсмофокальной области не является равномерным. Обращают на себя внимание группы кластеров в Камчатском заливе, в районе вулкана Кизимен и южнее мыса Лопатка.

Кластеры землетрясений с наибольшими по энергии главными событиями (выделены три кластера с энергетическим классом главного события $K > 12.5$) расположены вдоль восточной границы Авачинского залива.

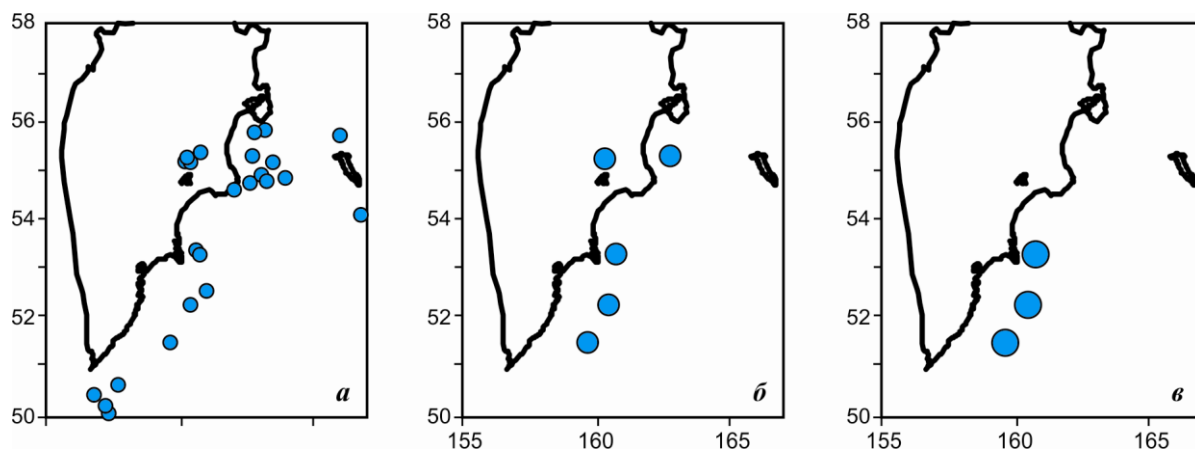


Рис. II.21. Эпицентры главных событий кластеров землетрясений 2010 г. при различных значениях параметров k_0 и K_0 :
a – $k_0=8.5, K_0=9.5$; *б* – $k_0=9.5, K_0=10.5$; *в* – $k_0=10.5, K_0=12.5$

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

В 2010 г. в сейсмоактивной области Камчатки существовали две пространственные области (рис. II.22), выделенные с помощью Z-функции и представляющие 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.

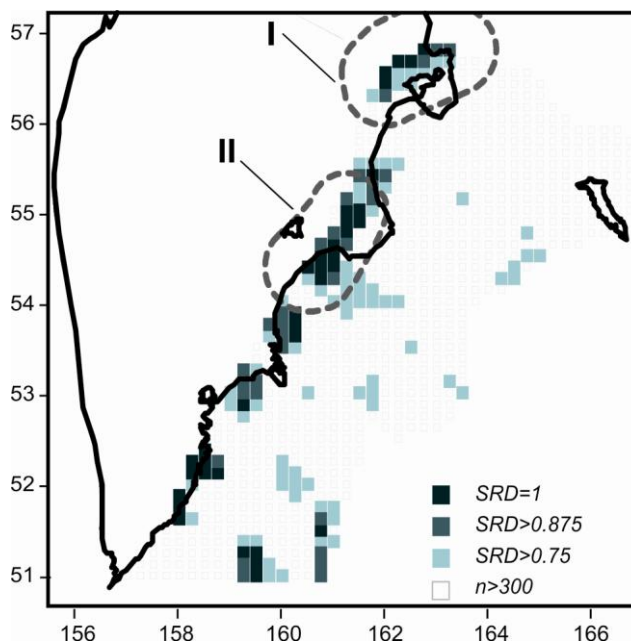


Рис. II.22. Карта значений $SRD > 0.75$ в течение 2010 г. Штриховой линией отмечена область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз в течение не менее года

Графики функции $Z(t)$, рассчитанные для выделенных зон сейсмической аномалии в скользящем временном окне 12 месяцев, приведены на рис. II.23. В зоне I (рис. II.22) уменьшение скорости сейсмического потока в восемь раз наблюдалось с августа 2009 г. по конец 2010 г., в зоне II – с сентября 2009 г. по сентябрь 2010 года.

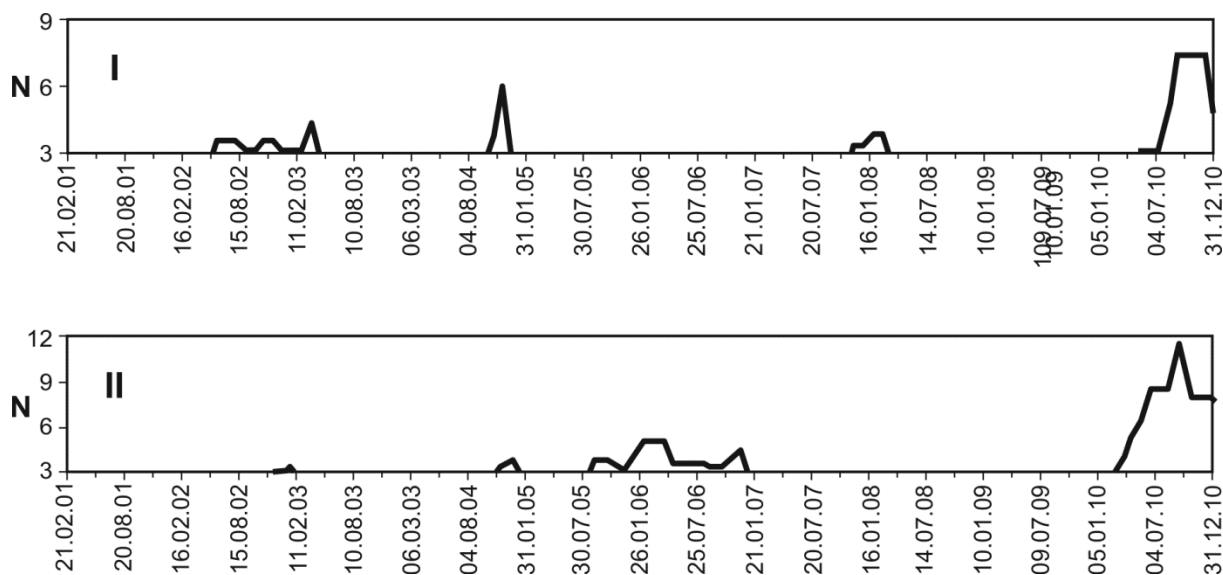


Рис. II.23. Зависимости $Z(t)$, рассчитанные для зон уменьшения интенсивности сейсмического потока в восемь раз (рис. II.22) в скользящем окне шириной 12 месяцев

Заключение

На основе региональных каталогов Камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2010 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 2010 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2010 гг.).

Получены следующие результаты по сейсмичности Камчатки в 2010 г., в целом не противоречащие друг другу, несмотря на различие методик мониторинга:

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

- на юге Камчатки наблюдаются повышенные значения активности A_{10} и увеличенные значения наклона графика повторяемости в течение последних двух лет; примечательно, что ранее вблизи этой области наблюдалось статистически значимое уменьшение γ [Салтыков, Кравченко, 2010];

- в Авачинском заливе наблюдаются аномалии dS и кластеры землетрясений с энергетическим классом главных событий $K > 12.5$.

Отмечено снижение регионального уровня сейсмичности перед наиболее сильными землетрясениями 2010 г. – 30.07.2010 г. с $M_L=6.3$ и 16.11.2010 г. с $M_L=5.9$.

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.