

II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Введение

В статье представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2008 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>]. 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 2008 г. сейсмическая энергия $E = \sum_i 10^{K_i}$, где K_i – энергетический класс землетрясения, составила $1.5 \cdot 10^{14}$ Дж при среднегодовом (за 47 лет) значении $6.1 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.7 \cdot 10^{14}$ Дж. Согласно функции распределения годовой сейсмической энергии, построенной по всему интервалу детальных наблюдений в 1962–2008 гг. (рис. II.12), сейсмическая энергия, выделившаяся в 2008 г., близка к медианному значению, ее вероятность составляет 0.47 ± 0.07 .

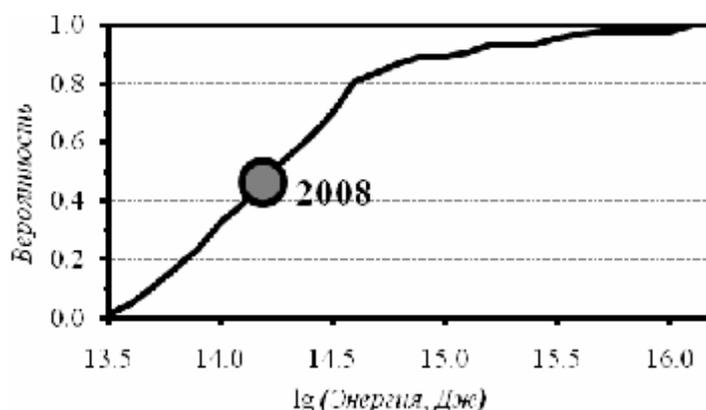


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2008 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2008 г.

Более 2/3 всей выделившейся в 2008 г. сейсмической энергии ($1.1 \cdot 10^{14}$ Дж) приходится на три наиболее сильных землетрясения этого года: 24 июля ($M=6.3$, $M_w=6.2$), 12 сентября ($M=5.3$, $M_w=5.9$) и 18 сентября с ($M=5.4$, $M_w=5.9$). Магнитуды M_w взяты на сайте Геологической службы США [<http://earthquake.usgs.gov/>].

Землетрясение 24 июля с $M=6.3$ ($M_w=6.2$) сопровождалось небольшой афтершоковой последовательностью, состоящей из 10 землетрясений с энергетическими классами $K_S=8.6-10.7$. Роевая активность в 2008 г. также была незначительной. Наиболее представительный рой из 18 землетрясений с энергетическими классами $K_S=8.5-11.8$ произошел в мае–июле на юге сейсмоактивной зоны Камчатки.

Эпицентры наиболее сильных землетрясений 2008 г. и 2σ -эллипсы рассеяния землетрясений в афтершоковой последовательности и рое показаны на рис. II.13 а. Параметры этих сейсмических событий представлены также в табл. II.2. Приведены дата, энергетический класс K_S , моментная магнитуда M_w 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.

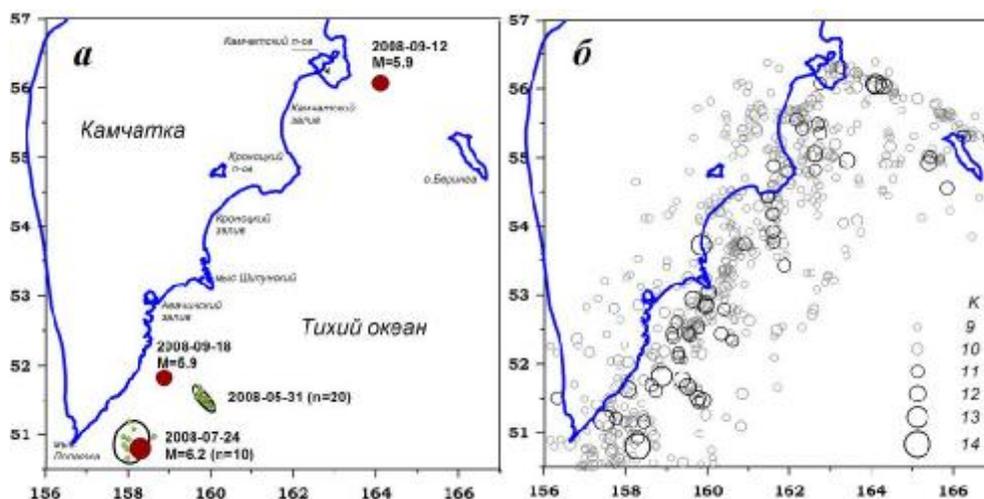


Рис. II.13. Сейсмичность Камчатки в 2008 г.:

- а* – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 5.9$ и группы землетрясений (показаны 2σ -эллипсы аппроксимации зоны группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе);
б – эпицентры независимых землетрясений 2008 г. с $K_S=9-14$

Таблица II.2. Наиболее сильные землетрясения, афтершоковая последовательность и рой, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2008 г.

Параметры главного события						$\lg(E, \text{Дж})$	$\Delta t, \text{дни}$	Тип группы
дата	K_S	M_w	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	$h, \text{км}$			
31.05.2008	11.8	–	51.5	159.9	34	12.1	42	рой
24.07.2008	14.0	6.2	50.8	158.3	36	14.0	22	афтершоки
12.09.2008	12.5	5.9	56.1	164.1	9	12.5	–	–
18.09.2008	12.7	5.9	51.8	158.9	37	12.7	–	–

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 2008 г. составило 5% от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2008 г. представлена на рис. II.13 б. Визуально эпицентры распределены равномерно в сейсмоактивной полосе вдоль восточного побережья Камчатки, что подтверждает тезис о неинформативности такого представления сейсмичности.

Вариации наклона графика повторяемости g

Наклон графика повторяемости γ является параметром, характеризующим распределение землетрясений (точнее, частоты их появления – N) по магнитуде M (или энергетическому классу K) (закон Гутенберга–Рихтера). Его использование связано, в частности, с наблюдаемым иногда уменьшением наклона графика повторяемости перед сильными событиями [Завьялов, 1984; Моги, 1988].

Исходя из экспоненциального вида распределения N по K , наклон графика повторяемости γ и среднеквадратичная ошибка S_γ его определения вычисляются методом максимального правдоподобия по формуле [Аки, 1965]:

$$\gamma = \log_{10} e \cdot \frac{1}{\sum_i^N K_i / N - K_0}.$$

Среднеквадратичное отклонение этой оценки определяется как $\sigma_\gamma = \frac{\gamma}{\sqrt{N}}$ [Кулдорф, 1966]. Здесь K_0 – минимальный энергетический класс используемых землетрясений, соответствующий уровню представительной регистрации землетрясений; K_i – энергетический класс i -го из N зарегистрированных землетрясений.

Наклон графика повторяемости γ в 2008 г. равен 0.54 ± 0.02 , что соответствует в пределах двойной ошибки определению среднемноголетнему значению 0.497 ± 0.003 . Таким образом, судя по величине параметра γ , 2008 г. не является аномальным для Камчатки в целом. Тем не менее интерес представляют карты значений наклона графика повторяемости γ . Карты площадного распределения γ , 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 (47 лет) осреднении (рис. П.14 б), когда случайные или кратковременные вариации γ нивелируются. При сравнении карт γ , рассчитанных для 2008 г. и для всего времени детальных наблюдений, в 2008 г. на юге Авачинского залива визуально отмечается область пониженных значений γ .

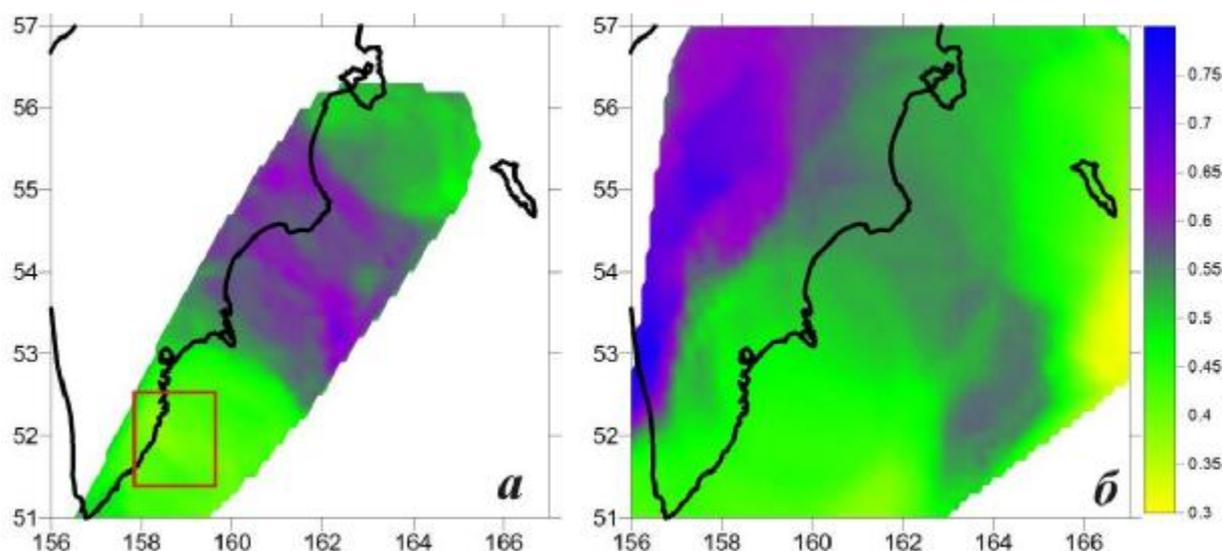


Рис. П.14. Средние значения наклона графика повторяемости g :
а – в 2008 г., б – в 1962–2008 гг.

Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z -тест. Параметр Z рассчитывается как нормированная вариация γ :

$$Z(\varphi, \lambda) = \frac{\gamma_1(\varphi, \lambda) - \gamma_2(\varphi, \lambda)}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}},$$

где γ_i – значения наклона графика повторяемости для двух временных отрезков, σ_i – дисперсии оценок γ на этих отрезках.

На рис. II.15 приведены карты нормированной вариации Z_γ для 2007–2008 гг. и 2006–2008 гг., 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 существование в течение последних трех лет статистически значимого уменьшения γ относительно среднеемноголетнего значения на юге сейсмоактивной зоны Камчатки.

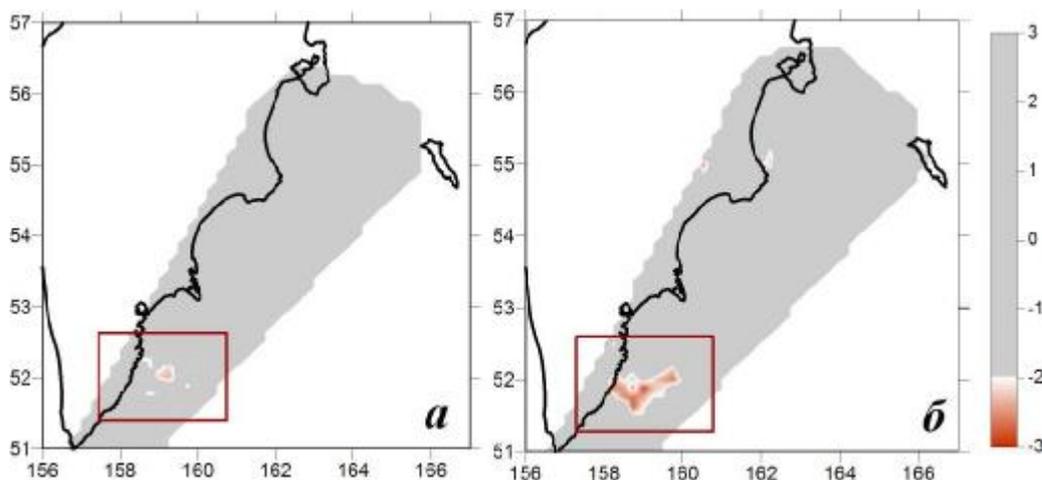


Рис. II.15. Изменение g в 2007–2008 гг. (а) и в 2006–2008 гг. (б), по сравнению с многолетним фоном, нормированное на среднеквадратичное отклонение

Сейсмическая активность A_{10} . Активность A_{10} рассчитывается из числа землетрясений N и наклона графика повторяемости γ и приводится к площади $S=10^3 \text{ км}^2$ и временному интервалу $T=1 \text{ год}$:

$$A_{10} = \frac{1000 \cdot N \cdot (1 - 10^{-\gamma}) \cdot 10^{-\gamma(9.5 - K_0)}}{S \cdot T}.$$

Средняя по исследуемому району активность A_{10} в 2008 г. составила 0.262 ± 0.008 при среднеемноголетнем значении 0.282 ± 0.001 , т.е. активность региона в 2008 г. была ниже среднего уровня на $\approx 7\%$. Однако это различие не является существенным, поскольку среднеквадратичное отклонение по выборке среднегодовых значений A_{10} составляет 0.03, т.е. $\approx 10\%$.

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. Как следует из сравнения рис. II.16 а и II.16 б, в основном распределение активности A_{10} в 2007 г. также соответствует среднеемноголетнему 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 2008 год. и многолетнем (за 47 лет) каталоге. Повышенные относительные значения активности A_{10} наблюдались также в районе Камчатского полуострова, на севере Камчатского залива и на юге Авачинского залива. Область повышенных относительных значений A_{10} в южной части Авачинского залива хорошо согласуется с областью пониженных относительных значений наклона графика повторяемости.

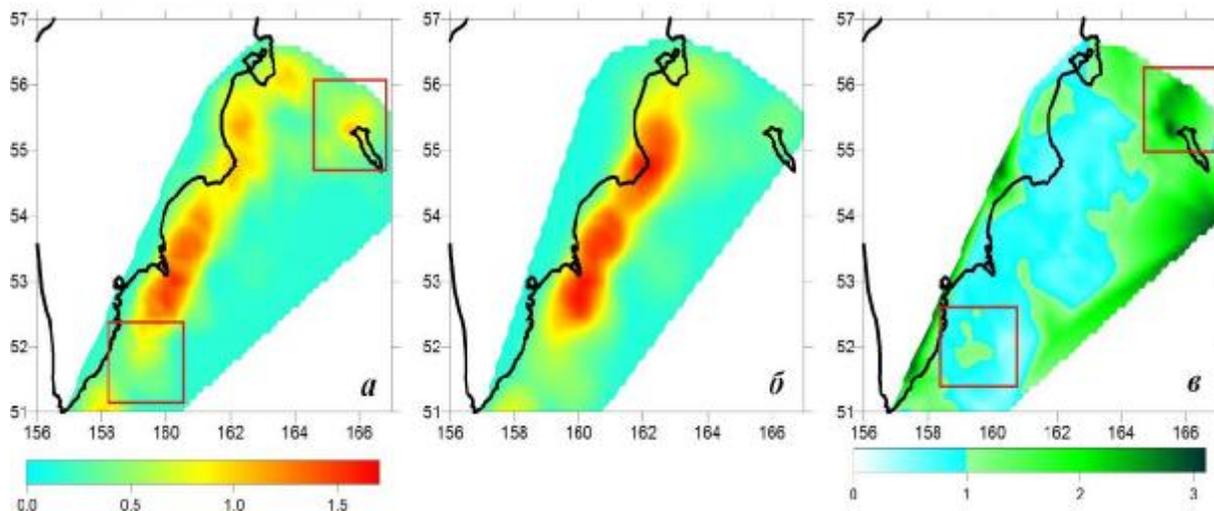


Рис. 11.16. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2008 г. (а) и 1962–2008 гг. (б). Относительная сейсмическая активность A_{10} в 2008 г., по сравнению со средней многолетней активностью (в)

Мониторинг параметров RTL и DS . Методика расчета параметров RTL и ΔS основана на предположении, что в районе готовящегося землетрясения последовательно сменяют друг друга стадии сейсмического затишья и форшоковой активизации. Согласно модели авторов [Соболев, Тюпкин, 1996, 1998; Соболев, 1999], пространственно-временные области с отрицательными значениями параметра RTL соответствуют зонам формирования сейсмического затишья, и значительное сейсмическое событие следует ожидать на краю области аномально низких значений RTL в интервале времени до трех лет после выхода параметра RTL из минимума. Аномалии сейсмического затишья по параметру RTL были выделены перед всеми Камчатскими землетрясениями с $M \geq 7.0$ и перед 10 из 13 (78%) землетрясениями с $M \geq 6.8$ [Кравченко, 2004].

Выделение области сейсмического затишья по методу RTL происходит следующим образом. Исследуемый район покрывается сеткой с шагом $7'30''$ по широте и $15'$ по долготе. Для каждого узла сетки с координатами x , y и z в заданный момент времени t вычисляется значение параметра RTL , который представляет собой произведение трех характеризующих сейсмический режим функций: пространственной R , временной T и учитывающей размер очага землетрясения L :

$$R(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_s,$$

$$T(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_s,$$

$$L(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_i}\right)^p \right] - L_s,$$

где r_i , t_i – соответственно, эпицентральные расстояния и времена землетрясений энергетических классов $K=8.5-13.0$ относительно расчетной точки и даты; l_i – размеры очагов землетрясений, вычисляемые по формуле: $\lg(l_i)=0.244 \cdot K_i-2.266$ [Ризниченко, 1976]; $r_0=50$ км и $t_0=1$ год – коэффициенты, характеризующие степень убывания влияния более удаленных землетрясений. После вычисления стоящего в квадратных скобках выражения в него может быть введена поправка R_s , T_s , L_s на тренд и периодические сезонные вариации. В расчете параметра RTL участвуют сейсмические события, удаленные во времени не более чем на два года от расчетной даты, для которых расстояние

от эпицентра до расчетной точки не превышает 100 км, глубины гипоцентров соответствуют диапазону 30–100 км. Узлы сетки, в которых значения параметра $RTL < -3$ объединяются по принципу пространственно-временного соседства, определяют область сейсмического затишья. Количественно аномалия сейсмического затишья характеризуется минимально достижимым значением RTL и продолжительностью аномалии, определяемой как интервал времени, в течение которого параметр $RTL < -3$.

На рис. II.17 представлены карты минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в течение 2008 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.

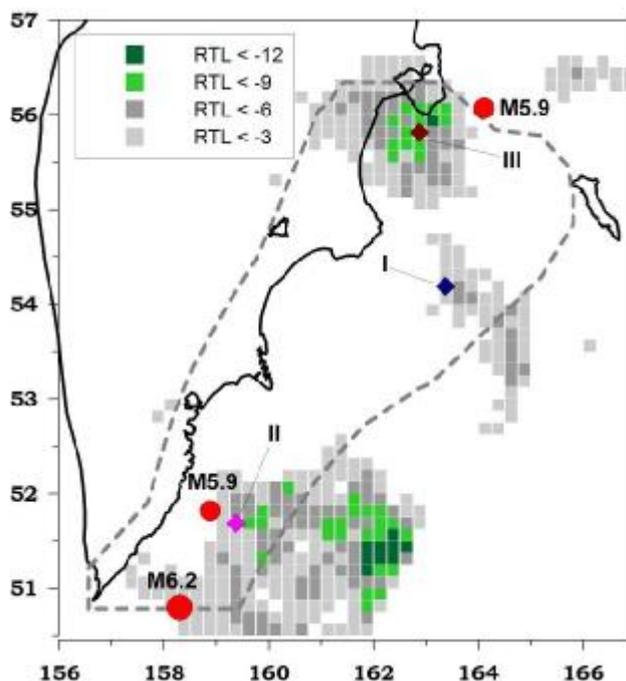


Рис. II.17. Минимальные значения RTL -параметра в 2008 г.

Обозначены эпицентры землетрясений с $M_w \geq 5.9$.

Римскими цифрами отмечены характерные точки аномалии сейсмического затишья, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

Как следует из рис. II.17, в области достоверного определения аномалии выделяются три зоны сейсмического затишья по параметру RTL . Для расчетных точек с максимальными по модулю значениями параметра RTL (отмечены римскими цифрами) каждой из этих зон построены временные RTL -графики (рис. II.18), которые позволяют оценить длительность аномалии и степень ее проявления. В зоне, расположенной восточнее Кроноцкого полуострова, сейсмическое затишье наиболее ярко проявилось в 2006 г., длительность аномалии составила два года. В 2008 г. сейсмическое затишье в восточной зоне практически завершилось. В южной части сейсмоактивной зоны аномалия сейсмического затишья продолжалась примерно полтора года. Минимального значения параметр RTL достигал в июле 2007 года. На границу этой аномальной области в 2008 г. приходятся эпицентры землетрясений с магнитудами $M_w=6.2$ и $M_w=5.9$ (рис. II.17). Моменты возникновения землетрясений отмечены стрелками на графике временного хода параметра RTL (рис. II.18 (II)). Северная аномалия, расположенная в Камчатском заливе, нарастала в течение всего 2008 года. На границу этой зоны приходится эпицентр землетрясения с $M_w=5.9$. Землетрясение произошло при выходе параметра RTL из локального минимума (рис. II.18 (III)).

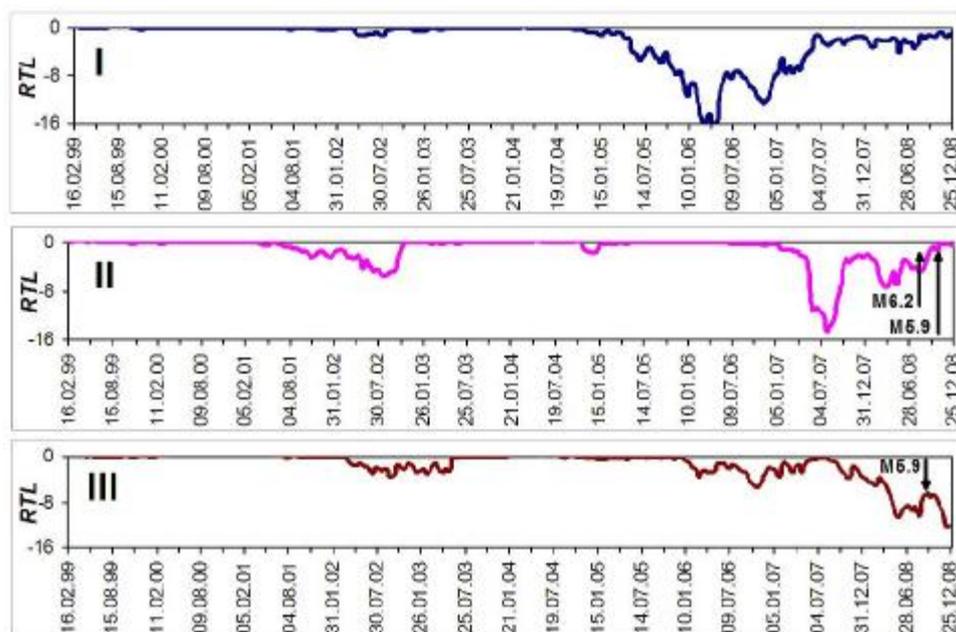


Рис. II.18. Временной ход RTL-параметра в характерных точках аномалии (рис. II.17) в течение последних 10 лет.

Отмечены моменты землетрясений, приходящихся на границы аномалий

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 2008 г. Сейсмическая активность по параметру ΔS наиболее значительно проявилась в 2008 г. в южной части камчатской сейсмоактивной зоны. Область повышенных значений ΔS южнее Авачинского залива граничит с завершившейся аномалией сейсмического затишья по параметру *RTL*, что является одним из прогностических критериев возможного сильного землетрясения [Соболев, Тюпкин, 1998]. Также эта зона сейсмической активизации по параметру ΔS хорошо согласуется (с учетом радиусов сканирования) с областью повышенных значений сейсмической активности A_{10} и пониженных значений наклона графика повторяемости γ .

Контроль кластеризации землетрясений. Третьей стадией подготовки сильного землетрясения, согласно методике [Соболев, 1999], является возникновение кластеров землетрясений. Кластером считается появление двух или более землетрясений, если расстояние между их гипоцентрами меньше критического $R_{cr}=3l_i+\epsilon$ [км], где l_i – размер сейсмогенного разрыва ($\lg l_i=0.244K_i-2.266$), ϵ – поправка на неточность определения гипоцентров, принятая равной 10 км, и время между этими событиями меньше $T_{cr}=0.01 \cdot 10^{0.4(K_i-8.5)}$ [годы]. К кластерам относились только те группы, в которых предыдущее землетрясение было не больше последующего.

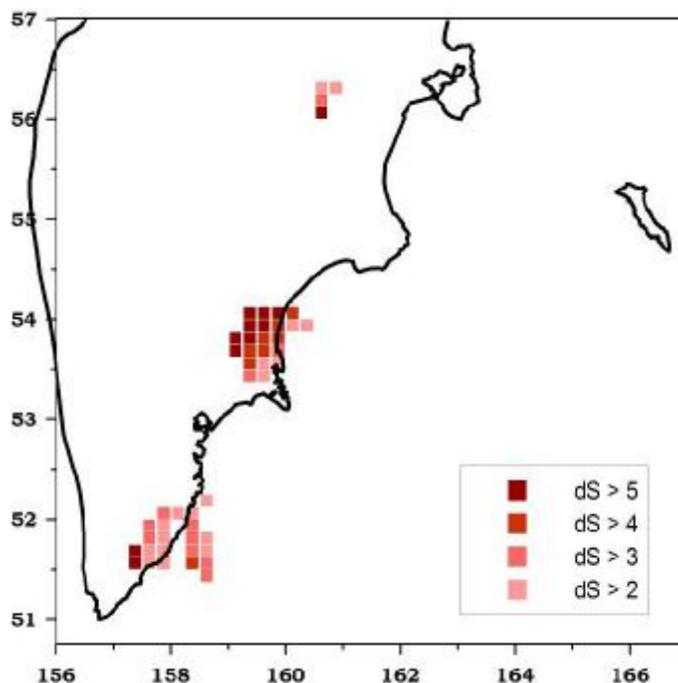


Рис. П.19. Максимальные значения DS-параметра, рассчитанные на декабрь 2008 г.

При анализе рассматриваются различные варианты параметров рассматриваемых кластеров. Параметрами кластеров являются минимальный класс землетрясений в кластере k_0 и минимальный класс основного события в кластере K_0 .

На рис. П.20 отмечены кластеры, выделенные в 2008 г. в исследуемой области Камчатки. Как видно из рисунка, кластеры разделяются на две группы, одна из которых вытянута вдоль восточного побережья Камчатки в полосе широт от 50°N до 54°N , другая представляет собой цепочку, соединяющую Камчатский полуостров и остров Беринга. Южная часть кластеров согласуется с обеими зонами сейсмической активизации по параметру ΔS . Цепочка кластеров, расположенная на севере сейсмоактивной зоны, приходится на границу развивающейся сейсмической аномалии по параметру RTL .

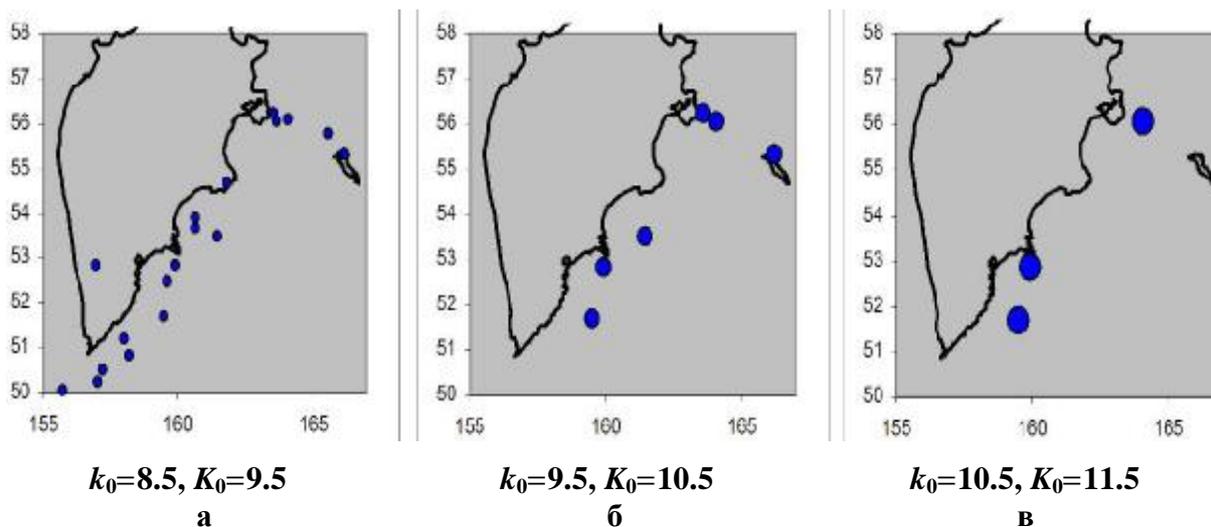


Рис. П.20. Эпицентры главных событий кластеров землетрясений 2008 г. при различных значениях параметров k_0 и K_0 :

k_0 – минимальный класс землетрясений в кластере (первое землетрясение),
 K_0 – минимальный класс основного события в кластере (последнее землетрясение)

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция». Методика «Z-функция», так же как и методика *RTL*, ориентирована на выявление сейсмических затиший как временных аномалий в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей. Методика опирается на работы [Wyss, Habermann, 1988; Habermann, 1988; Wiemer, Wyss, 1994]. Основными параметрами являются:

1) параметр $LTA(t, \Delta t) = Z = (R_2 - R_1) / \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$, определяющий статистическую значимость различий в скоростях сейсмического потока R (количество землетрясений в единицу времени) на двух временных участках (один – длительностью Δt и привязанный ко времени t окончания этого участка, другой – включает в себя все остальное время, σ_i – стандартные отклонения R на этих участках);

2) параметр $SRD(t, \Delta t) = 1 - R_2 / R_1$, связанный с величиной уменьшения скорости сейсмического потока (то есть $SRD=1$ при полном исчезновении землетрясений, $SRD=0$ при фоновом режиме сейсмичности).

Результаты применения Z-теста к анализу камчатской сейсмичности опубликованы в [Салтыков, Кугаенко, 2000; Салтыков, Кугаенко, Кравченко, 1998]. Как показал ретроспективный анализ [Кравченко, 2005], в 60% случаев в окрестности зоны уменьшения сейсмической скорости в восемь и более раз ($SRD \geq 0.875$) происходит землетрясение с магнитудой M не менее 6.0 в интервале времени до двух с половиной лет после завершения стадии затишья.

На рис. П.21 показана карта максимальных значений SRD , рассчитанных в 2008 году. Штриховой линией отмечена область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз по сравнению с фоновой. На рис. П.22 приведен график $Z(t)$, построенный для выделенной зоны для временного окна $dT=12$ мес., согласно которому сейсмическое затишье статистически значимо. Положение сейсмического затишья, определенное Z-функцией, практически совпадает с южной областью аномальных значений параметра *RTL*. На границу этой области, как уже отмечалось, приходится землетрясения с магнитудами $M_w=6.2$ и $M_w=5.9$. Оба землетрясения произошли во время нарастания аномалии, время их возникновения отмечено на графике $Z(t)$ (рис. П.22).

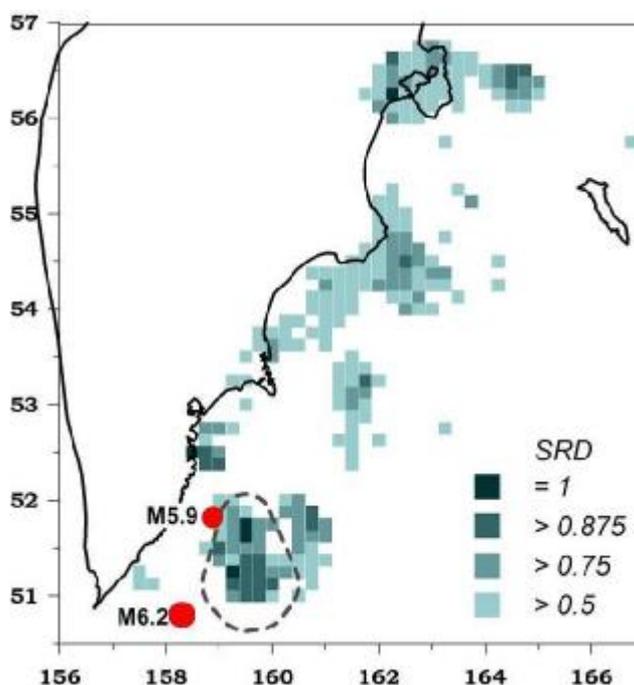


Рис. П.21. Максимальные значения SRD , рассчитанные в 2008 г.: обозначены эпицентры землетрясений 24 июля 2008 г. ($M_w=6.2$) и 18 сентября 2008 г. ($M_w=5.9$)

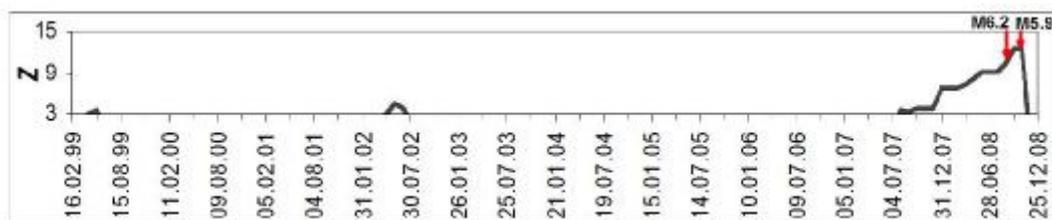


Рис. II.22. Зависимость $Z(t)$, рассчитанная для области уменьшения интенсивности сейсмического потока в восемь раз (рис. II.21) в скользящем окне шириной 12 месяцев. Стрелками отмечены моменты землетрясений, приходящихся на границу аномалии

Заключение

На основе региональных каталогов Камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2008 году. В комплекс 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 2008 г. с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2008 гг.).

Несмотря на различие методик мониторинга, получены следующие результаты, не противоречащие друг другу, и которые могут быть рассмотрены в совокупности по территориальному признаку:

На юге Камчатки:

- выявлена зона пониженных значений нормированной вариации γ ;
- наблюдаются повышенные значения активности A_{10} ;
- завершились аномалии сейсмических затиший по *RTL*- и *Z*-параметрам;
- наблюдается активизация по параметру ΔS ;
- произошла основная часть кластеров землетрясений.

В северной части сейсмоактивной зоны Камчатки (район Камчатского залива, острова Беринга):

- развивается аномалия *RTL*;
- зона повышенных значений активности A_{10} совпадает с положением кластеров различной энергии.

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.

Авторы благодарны члену-корреспонденту РАН Г.А. Соболеву за содействие при внедрении методик мониторинга сейсмичности в КФ ГС РАН, канд. физ.-мат. наук В.Б. Смирнову за предоставление программы выделения афтершоков сильных землетрясений. Особая признательность выражается нашим коллегам О.Г. Волович и В.В. Иванову за создание программ, использованных в данной работе.