

## ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ В 2007-2008 ГГ.

Салтыков В. А., Кравченко Н. М.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

**Введение**

В работе представлена сейсмичность Камчатки 2007-2008 гг. Рассматриваются такие сейсмические характеристики, как общая выделившаяся сейсмическая энергия, активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры  $RTL$  и  $\Delta S$ , кластеризация землетрясений, параметры методики «Z-функция». При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.emsd.ru>). Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного широтой  $\varphi=50.5^{\circ}N$  и  $56.5^{\circ}N$ , долготой  $\lambda=156.0^{\circ}E$  и  $167.0^{\circ}E$ , глубиной от 0 до 300 км, в который попадает наиболее сейсмоактивная часть Камчатки. Важным требованием к анализируемым данным является их однородность, поэтому нижний энергетический уровень землетрясений был определен как  $K_S=8.5$  по классификации Федотова, что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [1]. Помимо этого, из анализа исключены группирующиеся события, в частности, афтершоковые последовательности, которые в силу своего компактного расположения в пространстве-времени могут существенно исказить характеристики фоновой сейсмичности. Используемая для этого программа Смирнова В. Б. (МГУ им. Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в работе [4].

**Энергия землетрясений Камчатки**

Общая выделившаяся сейсмическая энергия составила  $6.9 \cdot 10^{13}$  Дж в 2007 г. и  $1.5 \cdot 10^{14}$  Дж в 2008 г., 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 1962-2008 гг., в 2007 г. наблюдался пониженный уровень сейсмичности (в 80% случаев годовая сейсмическая энергия превышала эту величину), а сейсмическая энергия, выделившаяся в течение 2008 г., близка к медианному значению (Рис.1). Пространственное распределение плотности выделившейся сейсмической энергии неравномерно. Наиболее сильные сейсмические события 2007-2008 гг. разделяются на две компактные группы: северную, в районе Камчатского залива и Камчатского полуострова и южную, расположенную южнее  $52^{\circ}$  с. ш. Эпицентры землетрясений с  $M_w > 5.8$  (U.S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov/>) и рои, включающие не менее 10 сейсмических событий, отмечены на Рис.2. Данные об этих землетрясениях представлены также в Таблице 1. Для каждого землетрясения или группы приведены дата, энергетический класс  $K_S$ , моментная магнитуда  $M_w$  и координаты наиболее сильного землетрясения; логарифм суммарной энергии группы землетрясений  $\lg(E_{\text{сум}})$  и длительность  $\Delta t$ , определенная как временной интервал, в течение которого произошло 75% сейсмических событий группы, указан тип последовательности: афтершоковая или рой.

Число группированных землетрясений (афтершоков и роев) в 2007-2008 гг. незначительно, оно составило 7 % от общего количества

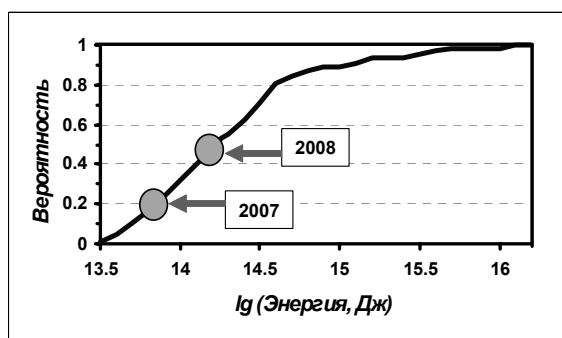


Рис.1. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962-2008 гг.

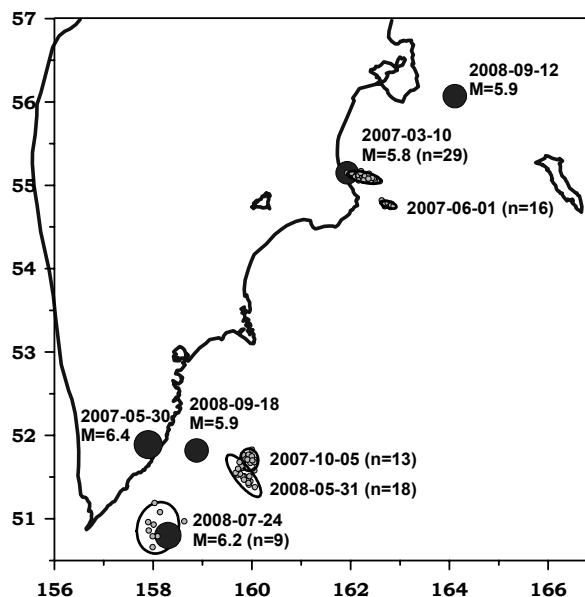


Рис.2. Землетрясения Камчатки 2007-2008 гг. с магнитудой  $M_w > 5.8$ . Отмечены рои с  $n > 10$ .

сейсмических событий, в то время как в среднем за 47 лет наблюдений группированные события составляют четверть всех землетрясений с энергетическим классом  $K_S$  не менее 8.5.

**Таблица 1.** Наиболее сильные землетрясения, афтершоковые последовательности и рои, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2007 - 2008 гг.

дата	Параметры главного события					$\lg(E, \text{Дж})$	$\Delta t, \text{дни}$	Тип группы
	$K_S$	$M_W$	$\varphi, ^\circ N$	$\lambda, ^\circ E$	$h, \text{км}$			
2007-03-10	13.1	5.8	55.1	161.9	40	13.1	43	афтершоки
2007-05-30	13.5	6.4	51.9	157.9	128	13.5	-	-
2007-06-01	11.8	-	54.8	162.6	30	11.9	5	афтершоки
2007-10-05	11.2	-	51.7	159.9	5	11.6	0.3	рой
2008-05-31	11.8	-	51.5	159.9	34	12.1	42	рой
2008-07-24	14.0	6.2	50.8	158.3	36	14	22	афтершоки
2008-09-12	12.5	5.9	56.1	164.1	9	12.5	-	-
2008-09-18	12.7	5.9	51.8	158.9	37	12.7	-	-

### Наклон графика повторяемости $\gamma$

Определение наклона графика повторяемости  $\gamma$  основано на повторяемости землетрясений как фундаментальном свойстве сейсмического процесса. Перед некоторыми сильными землетрясениями наблюдалось уменьшение наклона графика повторяемости [2, 3].

Наклон графика повторяемости  $\gamma$  в 2007 г. равен  $0.52 \pm 0.02$ , в 2008 г. -  $0.54 \pm 0.02$ , что соответствует в пределах двойной ошибки определению среднееголетнему значению  $0.497 \pm 0.002$ .

Карты площадного распределения  $\gamma$ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 100 км, позволяют выделить область пониженных значений  $\gamma$  на юге Авачинского залива (Рис. 3 а). Применение Z-теста подтверждает статистическую значимость этой аномалии в течение 2 лет (2007-2008 гг.) по уровню  $2\sigma$  (Рис. 3б), в течение 3 лет (2006-2008 гг.) - по уровню  $3\sigma$  (Рис. 3в). Карты нормированной вариации  $Z_\gamma$  для 2007-2008 гг. и 2006-2008 гг. по сравнению с многолетним фоном приведены на Рис 3 б, в. Карты построены при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса  $R$  с фиксированным количеством попавших в них землетрясений  $N$  (в данном случае,  $N=100$  и  $N=200$ , соответственно). Окружность, отмеченная на карте, соответствует размеру аномалии.

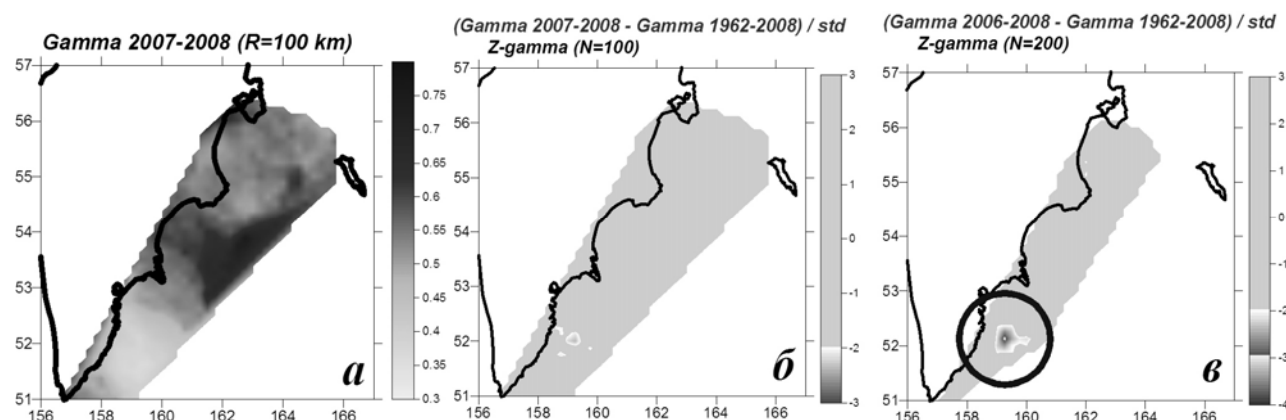


Рис.3. Карты наклона графика повторяемости  $\gamma$ , рассчитанные для 2007-2008 гг., (а) и изменения  $\gamma$  в 2007-2008 гг. (б) и в 2006-2008 гг. (в), нормированные на их среднеквадратичные отклонения.

### Сейсмическая активность $A_{10}$

Средняя по исследуемому району активность  $A_{10}$  в 2007 г. составила  $0.250 \pm 0.008$ , в 2008 г. -  $0.262 \pm 0.008$  при среднееголетнем значении  $0.282 \pm 0.001$ . В целом активность региона в 2007 -2008 гг. была ниже среднего уровня на 7-10%. Однако это различие не является существенным, поскольку среднеквадратичное отклонение по выборке среднегодовых значений  $A_{10}$  составляет 0.03, т.е.  $\approx 10\%$ . Площадные распределения  $A_{10}$  в 2007-2008 гг. (Рис. 4а) также в целом соответствуют среднееголетним распределениям (Рис. 4б). Более информативными являются карты отношения значений  $A_{10}$ , полученных на коротком (2 года) и длинном (47 лет) каталогах -  $A_{10}(2007-$

2008)/ $A_{10}(1962-2008)$ ). Повышенные относительные значения  $A_{10}$  в 2007-2008 гг. наблюдались на юге Авачинского залива, на севере Камчатского залива, в северо-западной акватории острова Беринга.

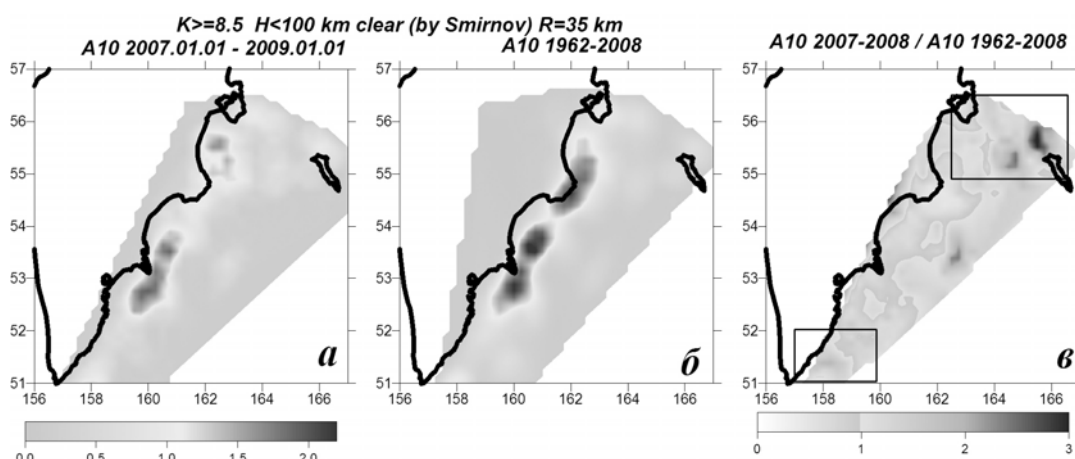


Рис.4. Карты сейсмической активности  $A_{10}$ , рассчитанные для 2007-2008 гг. (а), для сравнения – для 1962-2008 гг. (б), активности  $A_{10}$  для 2006-2008 гг., нормированной на многолетнюю активность (в).

### Параметр $RTL$

Применение методики расчета прогностического параметра  $RTL$ , предложенной Соболевым Г.А. и Тюпкиным Ю.С. [5], позволяет выявить зоны формирования сейсмических затиший, определяемые как области с отрицательными значениями параметра  $RTL$ . Методика ориентирована на сильные землетрясения ( $M \geq 7$ ). Землетрясение происходит, как правило, на краю аномалии в интервале до трех лет после выхода  $RTL$  из минимума.

На Рис. 5 приведена карта минимальных значений  $RTL$ , наблюдавшихся в сейсмоактивной области Камчатки в течение 2007-2008 гг. Штриховой линией отмечена область сканирования, за пределами которой аномалия не считается достоверной. Для характерных точек аномалий (отмечены на рисунке черными ромбиками) рассчитаны графики временного хода параметра  $RTL$ , согласно которым сейсмические затишья на юге и востоке сейсмоактивной зоны закончились в 2008 году, а аномалия, расположенная в Камчатском заливе, нарастала в течение всего этого года. Минимум  $RTL$  восточной аномалии приходится на март-май 2006 г., южной – на август 2007 г. За время развития южной аномалии  $RTL$  в ближайшей ее окрестности произошли 3 наиболее сильные землетрясения 2007-2008 гг. Эпицентры этих землетрясений, помеченные соответствующей магнитудой, показаны на карте (Рис.5), время их возникновения – на приведенных рядом графиках. На край северной аномалии также приходится эпицентр землетрясения с  $M=5.9$

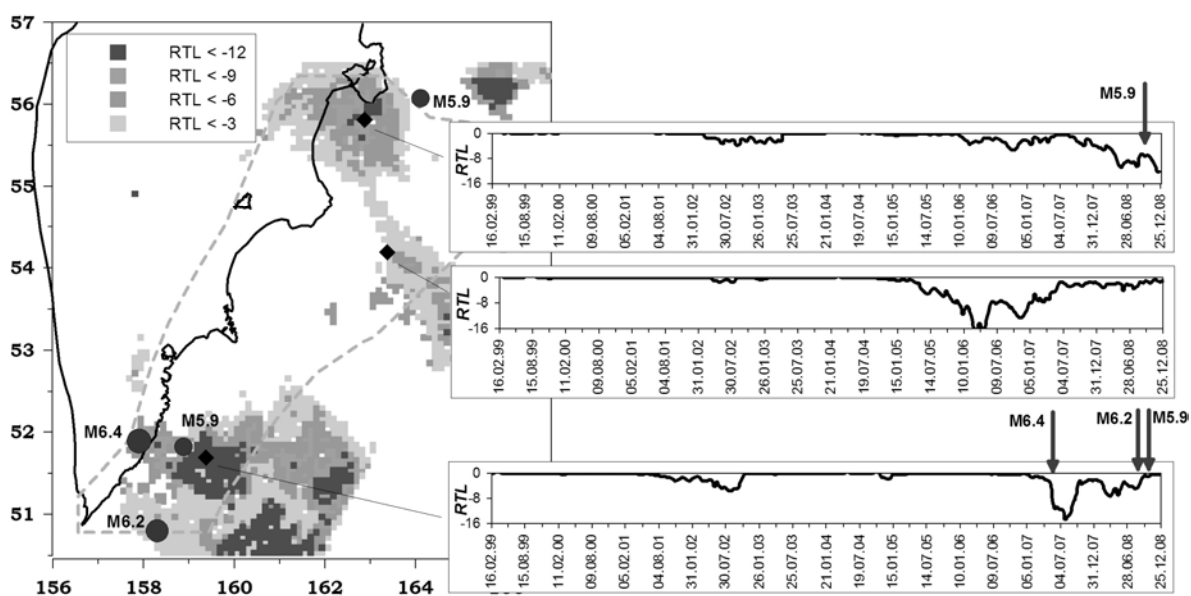


Рис.5. Карта минимальных значений параметра  $RTL$  в течение 2007-2008 гг. и графики временного хода  $RTL$ , рассчитанные для характерных точек аномалий.

### Параметр $\Delta S$

Параметр  $\Delta S$  рассчитывается как разница между накопленной за последний год площадью сейсмогенных разрывов в пределах круговой области радиусом 50 км и среднегодовым значением. Его повышенные значения ( $\Delta S > 1$ ) могут быть проинтерпретированы как форшоковая активизация [6].

Карты вариаций площадей сейсмогенных разрывов  $\Delta S$  в 2007 и 2008 гг. относительно среднегодовых значений показаны на Рис. 6. Согласно этим картам, область повышенной сейсмической активности 2007 г. примыкает к восточной *RTL*-аномалии (рис.5), а активизация по параметру  $\Delta S$  2008 г. соседствует с южной зоной сейсмического затишья 2007 г.

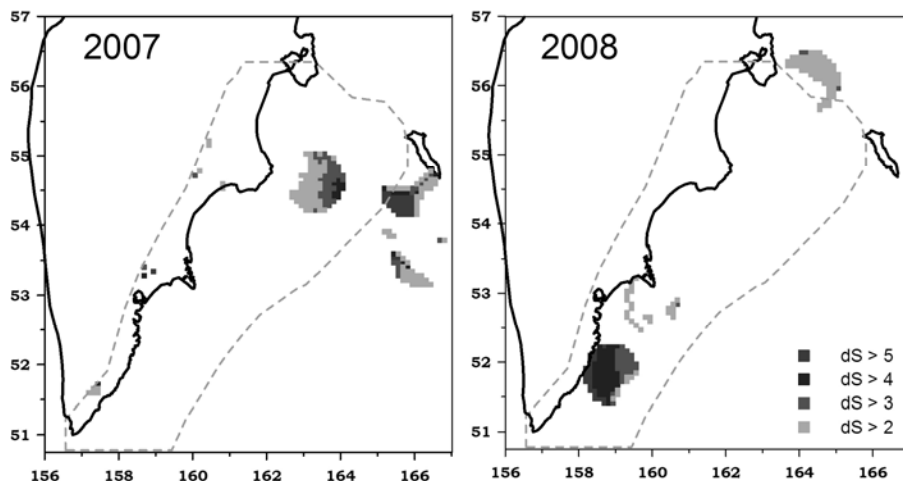


Рис. 6. Карты значений  $\Delta S$ -параметра, рассчитанные на декабрь 2007 г. и 2008 г., соответственно.

### Контроль кластеризации землетрясений

Образование кластеров землетрясений может свидетельствовать о стягивании сейсмической активности к месту будущего макроразрыва [6]. Параметрами кластеров являются минимальный класс землетрясений в кластере  $k_0$  и минимальный класс основного события в кластере  $K_0$ . При анализе рассматриваются различные варианты параметров кластеров.

Кластеры 2007 г. обладали небольшой энергией (энергетический класс главного события  $K$  не превышал 11.5) и были распределены достаточно равномерно вдоль наиболее сейсмически активной зоны Камчатки. В расположении кластеров 2008 г. выделяются две группы, представленные кластерами с различной энергией (Рис. 7). При этом положение кластеров с наибольшей энергией южной группы хорошо согласуется с сейсмической активизацией по параметру  $\Delta S$ . Цепочка кластеров, расположенная на севере сейсмоактивной зоны, приходится на границу развивающейся сейсмической аномалии по параметру *RTL*.

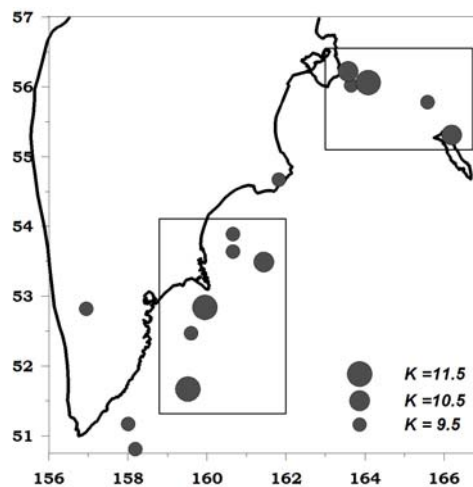


Рис. 7. Карты эпицентров главных событий кластеров землетрясений 2008г.

### Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

Метод «Z-функция» опирается на работу [7] и, также как и метод *RTL*, ориентирован на выявление сейсмических затиший как временных аномалий в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей. Основными характеристиками методики являются параметр

$LTA(t, \Delta t) = Z = (R_2 - R_1) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ , определяющий статистическую значимость различий в скоростях сейсмического потока  $R$  на двух временных участках (один – длительностью  $\Delta t$  и привязанный ко времени  $t$  окончания этого участка, другой – включает в себя все остальное время) и параметр  $SRD(t, \Delta t) = 1 - R_2 / R_1$ , определяющий величину уменьшения скорости сейсмического потока. Абсолютному сейсмическому затишью соответствует  $SRD=1$ , уменьшению уровня сейсмичности в 8 раз -  $SRD=0.875$ , уменьшению в 4 раза -  $SRD=0.75$ .

На рис. 8 показана карта максимальных значений параметра  $SRD$  в 2007-2008 гг. Области, в которых наблюдалось уменьшение скорости сейсмического потока не менее, чем в 8 раз, по

сравнению с фоновой, в течение не менее года оконтурены штриховой линией. Время существования сейсмических затиший в этих зонах и их статистическую значимость можно оценить по приведенным рядом графикам  $Z(t)$ , построенных для временного окна ( $\Delta t$ ) 12 месяцев. При сравнении Рис. 5 и 8 видно, что южная зона сейсмического затишья по  $Z$  частично перекрывается с южной аномалией по параметру  $RTL$ . Следует отметить также, что эпицентры трех наиболее сильных землетрясений 2008 г. приурочены к выделенным аномалиям сейсмических затиший. Моменты возникновения этих землетрясений отмечены на соответствующих графиках  $Z(t)$ .

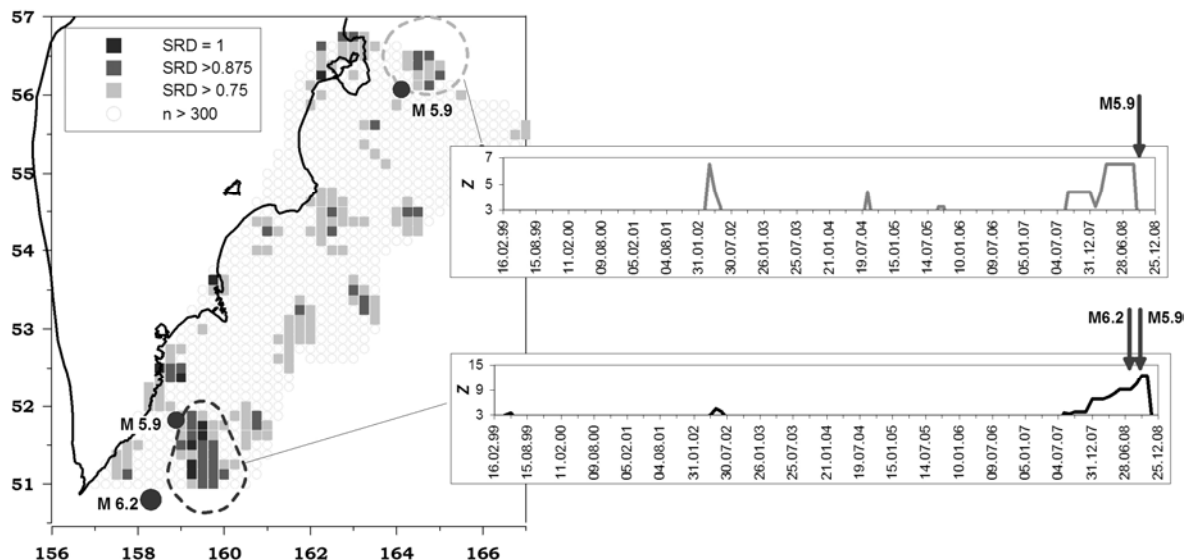


Рис. 8. Карта максимальных значений  $SRD$ -параметра в течение 2007-2008 гг. Пунктиром отмечены области уменьшения уровня сейсмичности в 8 раз в течение не менее года. Для отмеченных аномалий приведены графики временного хода  $Z$ -функции.

### Заключение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки 2007-2008 гг. Несмотря на различие методик мониторинга, получены следующие, не противоречащие друг другу результаты:

на севере Камчатки развивается аномалия  $RTL$ , выявлена область повышенных значений активности  $A_{10}$  совпадающая с расположением кластеров различной энергии;

на юге Камчатки выявлена зона пониженных значений нормированной вариации  $\gamma$ , наблюдались повышенные значения активности  $A_{10}$ , завершились аномалии сейсмических затиший по  $RTL$  и  $Z$  – параметрам, наблюдалась активизация по параметру  $dS$ , произошла основная часть кластеров землетрясений.

Учитывая среднесрочный характер прогноза по рассматриваемым методикам, юг Камчатки может быть определен как место наиболее возможного сильного землетрясения с магнитудой более 7.0 в ближайшие 2-3 года.

### Список литературы

1. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 6-27.
2. Завьялов А.Д. Наклоны графика повторяемости как предвестник сильных землетрясений на Камчатке // Прогноз землетрясений. №5. Душанбе-Москва: Дониш. 1984. С.173-184.
3. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
4. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных (Вычислительная сейсмология. Вып.24). М.: Наука, 1991. С.19-50
5. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. №4. С.64-74.
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
7. Wyss M., Habermann R.E. Precursory quiescence // Pageoph. 1988. Vol.126. P.319-332.