

## II.2. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

### Введение

Представляемая работа продолжает исследования, описанные в ежегоднике «Землетрясения России в 2006 году» [Салтыков, Кравченко, 2009], и выполнена по аналогичной схеме.

В статье представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2007 г. и построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности. В комплекс рассматриваемых характеристик входят общая выделившаяся сейсмическая энергия, активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры методик  $RTL$ -,  $\Delta S$ - 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  $56.5^\circ\text{N}$ , долготой  $\lambda=156.0^\circ\text{E}$  и  $167.0^\circ\text{E}$ , 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 2007 г. сейсмическая энергия  $E = \sum_i 10^{K_i}$ , где  $K_i$  – энергетический класс землетрясения, составила  $6.9 \cdot 10^{13}$  Дж при среднегодовом (за 46 лет) значении  $6.2 \cdot 10^{14}$  Дж и медианном годовом значении  $1.7 \cdot 10^{14}$  Дж. Согласно функции распределения годовой сейсмической энергии, построенной по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2007 гг. (рис. II.12), в 2007 г. наблюдался пониженный уровень сейсмичности (в 80% случаев годовая сейсмическая энергия превышала эту величину).

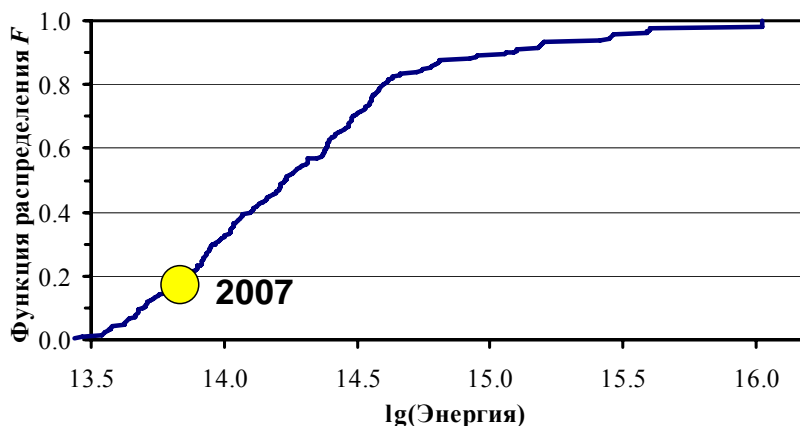


Рис. II.12. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2007 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее 2007 г.

Почти половина выделившейся в 2007 г. сейсмической энергии ( $3.2 \cdot 10^{13}$  Дж) приходится на наиболее сильное землетрясение этого года с  $K_S=13.5$ , произошедшее 30 мая на глубине 128 км. Магнитуда  $M_w$  этого землетрясения, определенная Геологической службой США [<http://earthquake.usgs.gov>], равна 6.4. Эпицентр отмечен на рис. II.13а. Землетрясение сопровождалось небольшой афтершоковой последовательностью – несколько землетрясений, сильнейшее из которых имело энергетический класс  $K=10.9$ .

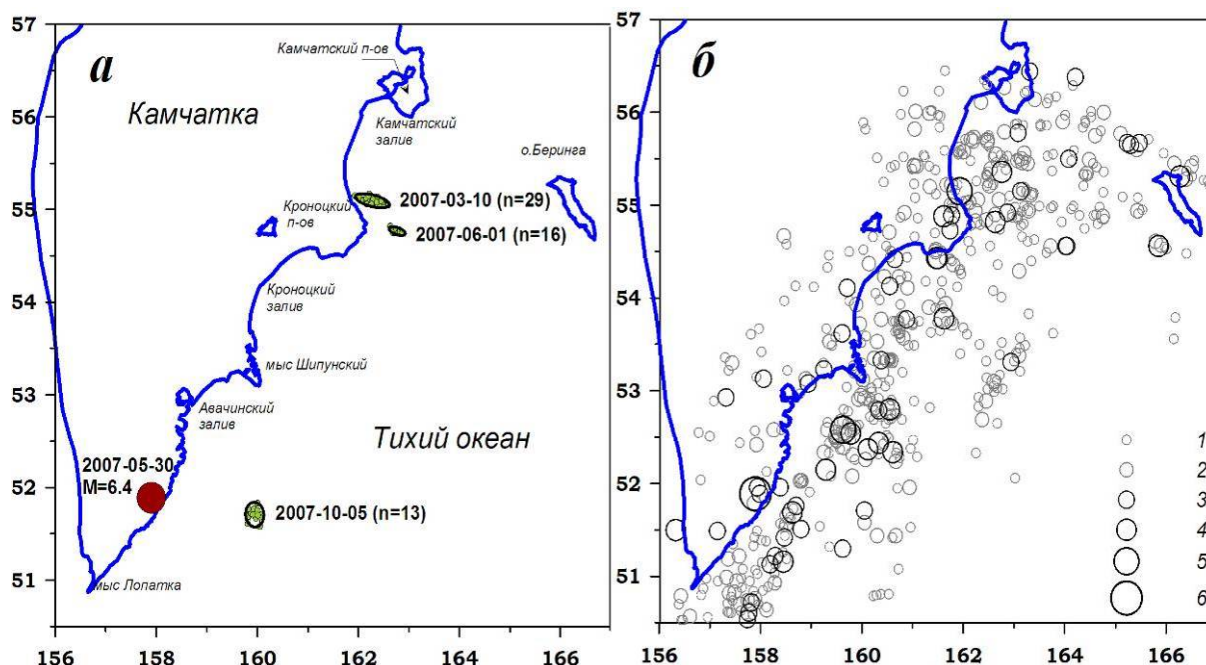


Рис. II.13. Сейсмичность Камчатки в 2007 г.:

а – эпицентр землетрясения с  $M_w=6.4$  и группы землетрясений (показаны  $2\sigma$ -эллипсы аппроксимации зоны группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе); б – фоновая сейсмичность ( $K_S \geq 8.5$ ) (1–6 соответствуют  $K_S=9-14$  с шагом 1)

Другие афтершоковые последовательности и рои 2007 г. также состояли из небольшого числа землетрясений и были непродолжительны во времени. Данные о наиболее сильных из них (включающих не менее 10 сейсмических событий) представлены в табл. II.2. Для каждой последовательности определен ее тип: афтершоковая или рой; приведены дата, энергетический класс  $K_S$ , магнитуда по коде  $M_c$  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 последовательности. Области этих последовательностей также отмечены на рис. II.13 а.

Таблица II.2. Наиболее сильные афтершоковые последовательности и рои, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2007 г.

Тип группы	Параметры главного события в группе					$\lg(E_{\text{сум}}, \text{Дж})$	$\Delta t$
	дата	$K_S$	$M_c$	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$		
афтершоки	10.03.2007	13.1	5.7	55.15	161.93	13.12	43 дня
афтершоки	01.06.2007	11.8	5.0	54.82	162.63	11.89	5 дней
рой	05.10.2007	11.2	4.2	51.71	159.91	11.64	7 часов

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 2007 г. составило 15% от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2007 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  $\gamma$ .** Наклон графика повторяемости  $\gamma$  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; Мого, 1988].

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

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

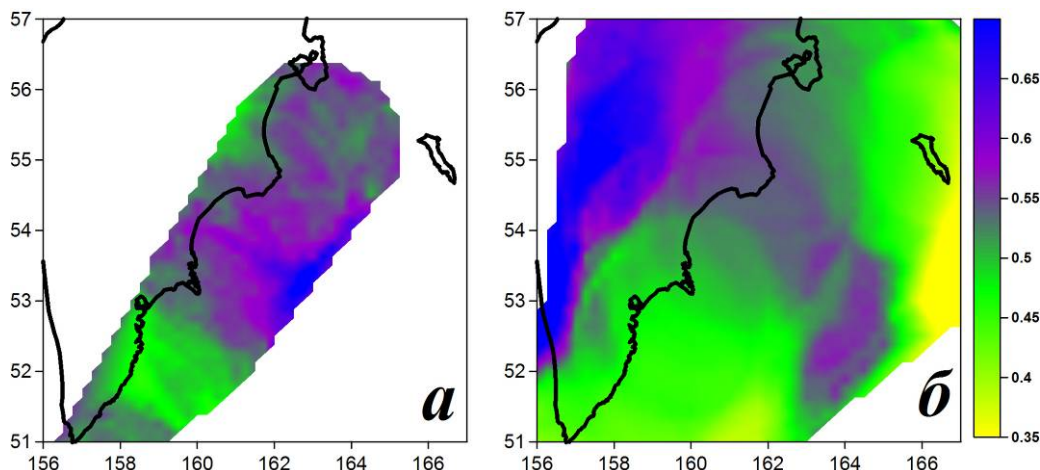
Среднеквадратичное отклонение этой оценки определяется как:  $\sigma_\gamma = \frac{\gamma}{\sqrt{N}}$  [Кулльдорф, 1966]. Здесь  $K_0$  – минимальный энергетический класс используемых землетрясений, соответствующий уровню представительной регистрации землетрясений;  $K_i$  – энергетический класс  $i$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

Наклон графика повторяемости  $\gamma$  в 2007 году равен  $0.52 \pm 0.02$ , что соответствует в пределах двойной ошибки определению среднемноголетнему значению  $0.472 \pm 0.002$ . Таким образом, судя по величине параметра  $\gamma$ , 2007 год не является аномальным для Камчатки в целом. Тем не менее интерес представляют карты значений наклона графика повторяемости  $\gamma$ . Карты площадного распределения  $\gamma$ , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км, представлены на рис. II.14. Очевидно, что карта 2007 г. не обеспечивает необходимой детальности, однако крупномасштабные изменения распределения  $\gamma$  на ней прослеживаются: в северной части сейсмоактивной зоны наклон графика повторяемости больше, чем в южной части. Отмечается региональная особенность в распределении  $\gamma$ : его повышенные значения соответствуют продолжению Императорского хребта, уходящему под Камчатку в районе Кроноцкого полуострова. Этот эффект проявляется при длительном (46 лет) осреднении (рис. II.14 б), когда случайные или кратковременные вариации  $\gamma$  нивелируются.

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

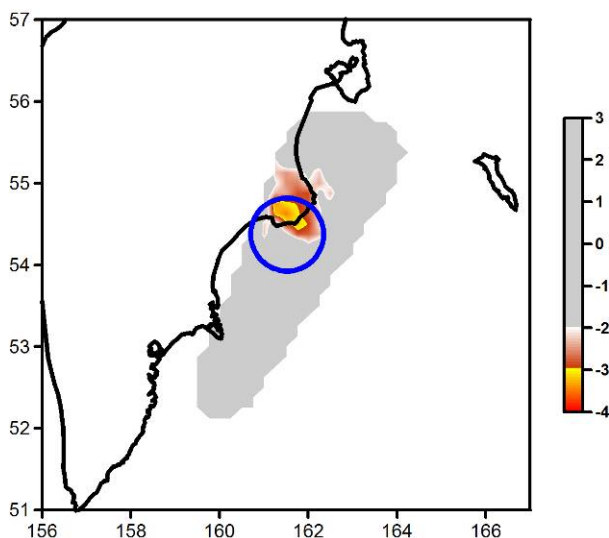
$$Z(\varphi, \lambda) = \frac{\gamma_1(\varphi, \lambda) - \gamma_2(\varphi, \lambda)}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}},$$

где  $\gamma_i$  – значения наклона графика повторяемости для двух временных отрезков,  $\sigma_i$  – дисперсии оценок  $\gamma$  на этих отрезках.



**Рис. II.14. Карты наклона графика повторяемости  $\gamma$ :**  
*а – рассчитанные для 2005–2007 гг.; б – для сравнения за 1962–2007 гг.*

На рис. II.15 приведена карта нормированной вариации  $Z_\gamma$  для 2007 г. по сравнению с многолетним фоном. Карта построена при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса  $R$  с фиксированным количеством попавших в них землетрясений  $N$  (в данном случае  $N=100$ ). В 2007 г. обнаружено статистически значимое ( $p < 0.01$ ) уменьшение  $\gamma$  относительно среднеемноголетнего значения в районе Кроноцкого полуострова. Окружность, отмеченная на карте, соответствуют размеру аномалии.



**Рис. II.15. Изменение  $\gamma$  в 2007 г. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение.**

*Окружность соответствует пространственному размеру аномалии*

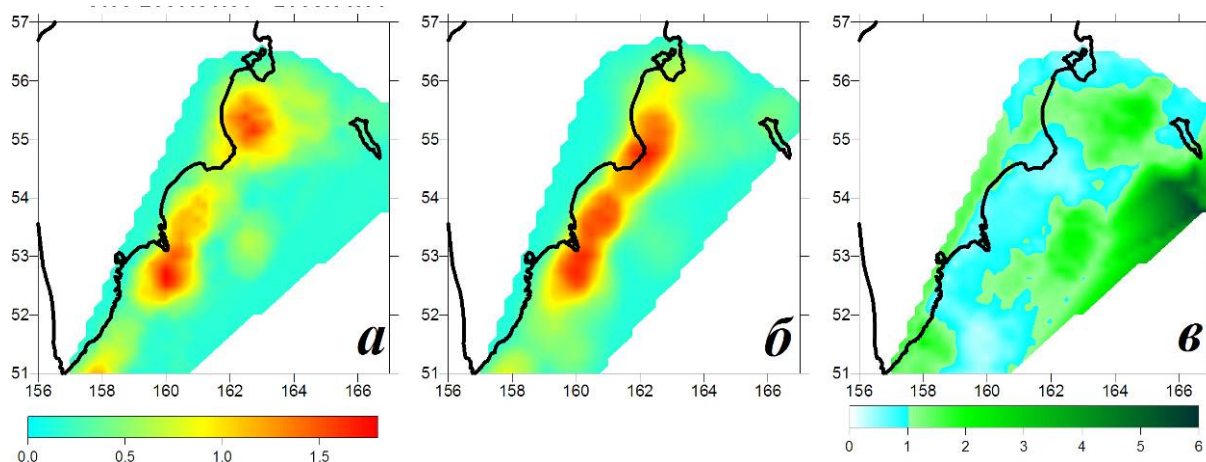
**Сейсмическая активность  $A_{10}$ .** Активность  $A_{10}$  рассчитывается из числа землетрясений  $N$  и наклона графика повторяемости  $\gamma$  и приводится к площади  $S=10^3 \text{ км}^2$  и временному интервалу  $T=1 \text{ год}$ :

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

Средняя по исследуемому району активность  $A_{10}$  в 2007 г. составила  $0.250 \pm 0.008$  при среднеемноголетнем значении  $0.283 \pm 0.001$ . Таким образом, в целом активность региона была ниже среднего уровня почти на 15%. 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. П.16. Как следует из сравнения рис. П.16 а и рис. П.16 б, в основном распределение активности  $A_{10}$  в 2007 г. также соответствует среднемноголетнему распределению. При выявлении особенностей площадного распределения  $A_{10}$  более информативными являются карты относительных значений  $A_{10}$ , полученных на коротком (1 год) и длинном (46 лет) каталогах –  $A_{10}(2007)/A_{10}(1962-2007)$ . Из анализа рис. П.16 в можно сделать вывод, что в 2007 г. повышенные относительные значения активности  $A_{10}$  наблюдались в северной части рассматриваемой области, в районе острова Беринга, Камчатского и Кроноцкого полуостровов, Камчатского залива и на самом юге Камчатки.



**Рис. П.16. Карты сейсмической активности  $A_{10}$ :**  
*а* – рассчитанные для 2007 г.; *б* – для сравнения за 1962–2007 гг.;  
*в* – для 2007 г.,  $A_{10}$  нормирована на многолетнюю активность

**Мониторинг параметров  $RTL$  и  $\Delta S$ .** Методика расчета параметров  $RTL$  и  $\Delta S$  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.

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  $L$ :

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

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

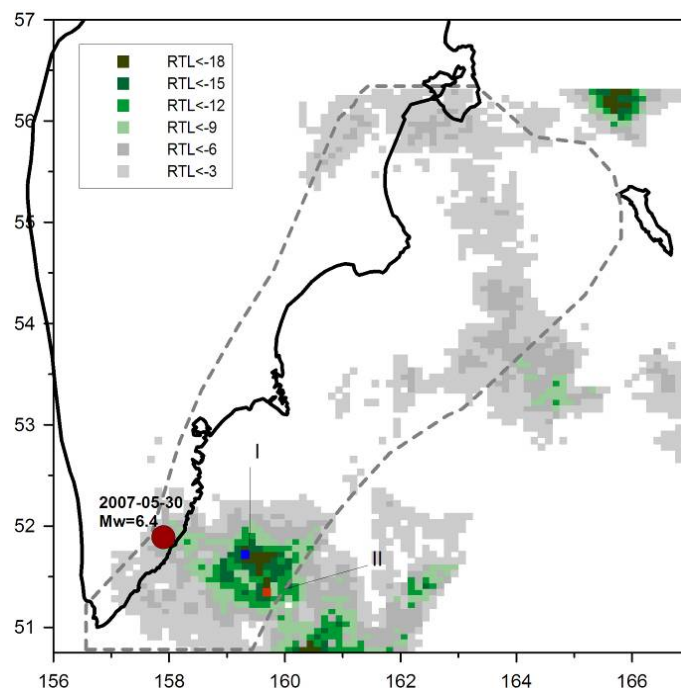
$$L(x, y, z, t) = \left[ \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_i}\right)^p \right] - L_S,$$

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  $\lg(l_i)=0.244 K_i-2.266$  [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 и определяют область сейсмического затишья. Количественно аномалия сейсмического затишья характеризуется минимальным 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 сейсмоактивной области Камчатки, в течение 2007 года. 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.



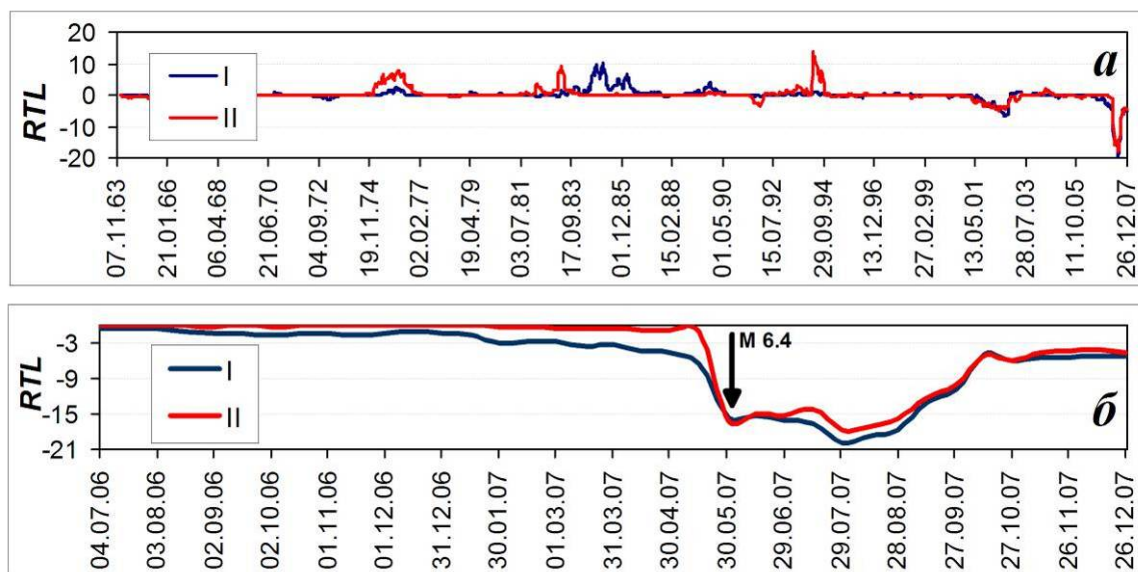
**Рис. II.17. Карта минимальных значений  $RTL$ -параметра в 2007 г.**

**Обозначен эпицентр землетрясения 30.05.2007 г. ( $M_w=6.4$ ).**

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

На юге сейсмоактивной зоны выделяется область сейсмического затишья по параметру  $RTL$ . Для характерных точек I и II (точки с максимальными по модулю значениями параметра  $RTL$ ) построены временные  $RTL$ -графики (рис. II.18), из которых следует, что длительность аномалии к концу 2007 г. составляла около 9 месяцев (по уровню  $-3$ ), но наиболее активная фаза аномалии длилась 5 месяцев. Минимального значения ( $-20$ ) параметр  $RTL$  достигал в августе. Землетрясение 30.05.2007 г. с магнитудой  $M_w=6.4$  произошло на краю этой аномальной области во время развития аномалии. Связь его с аномалией  $RTL$  неоднозначна. С одной стороны, землетрясение произошло не на выходе из аномалии, а, скорее, на ее максимальной глубине, при этом длительность аномалии достаточно мала [Соболев, Пономарев, 2003]. С другой стороны, методика  $RTL$

разрабатывалась для прогноза более сильных событий, хотя отмечены случаи появления *RTL*-предвестника и перед аналогичными землетрясениями. 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].



**Рис. 11.18.** Временной ход *RTL*-параметра в характерных точках аномалии (рис. 11.17) в течение всего интервала наблюдений (а) и в последние 1.5 года (б).  
Стрелкой отмечен момент землетрясения 30.05.2007 г. ( $M_w=6.4$ )

На следующем за *RTL*-аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности *RTL*-аномалии должна проявиться форшоковая активизация согласно методике [Соболев, 1999]. Выявление сейсмической активизации построено на основе анализа площадей сейсмогенных разрывов. Вычисляется разница  $\Delta S$  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:

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

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

На рис. 11.19 представлена карта максимальных вариаций площади сейсмогенных разрывов  $\Delta S$  в 2007 году. Сейсмическая активизация по параметру  $\Delta S$  наиболее значительно проявилась в акватории Кроноцкого полуострова. Отметим, что в 2006 г. в этом месте отмечалась аномалия *RTL* [Салтыков, Кравченко, 2009].

**Контроль кластеризации землетрясений.** Третьей стадией подготовки сильного землетрясения согласно методике Г.А. Соболева [Соболев, 1999] является возникновение кластеров землетрясений. Кластером считается появление двух или более землетрясений, если расстояние между их гипоцентрами меньше критического  $R_{cr}=3l_i+\varepsilon$  (км), где  $l_i$  – размер сейсмогенного разрыва ( $\lg l_i=0.244K_i-2.266$ ),  $\varepsilon$  – 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.

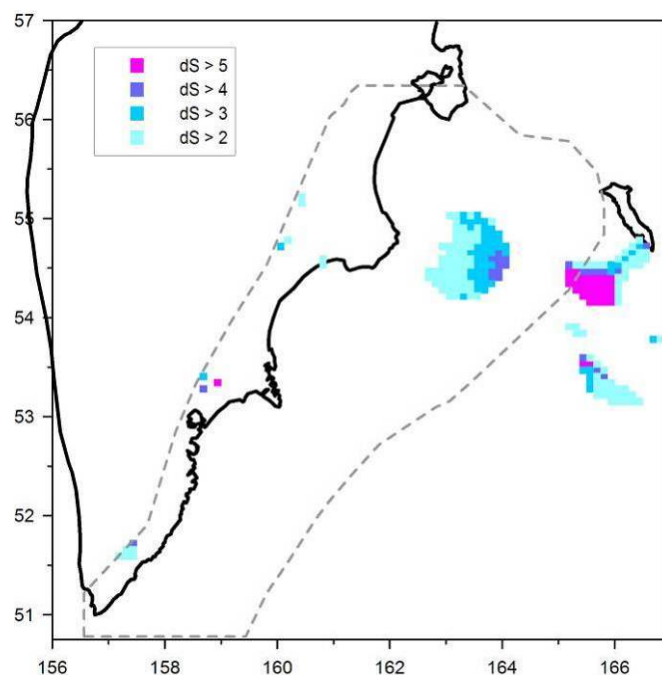


Рис. II.19. Карта максимальных значений  $\Delta S$ -параметра, рассчитанных на декабрь 2007 г. Пунктиром отмечена зона надежного определения  $\Delta S$ -параметра

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

На рис. II.20 отмечены кластеры, выделенные в 2007 г. в исследуемой области Камчатки. Как видно из рисунка, аномалии в пространственном распределении кластеров не выделяются. Следует также отметить, что в 2007 г. не обнаружены кластеры с энергетическим классом главного события  $K$  более 11.5.

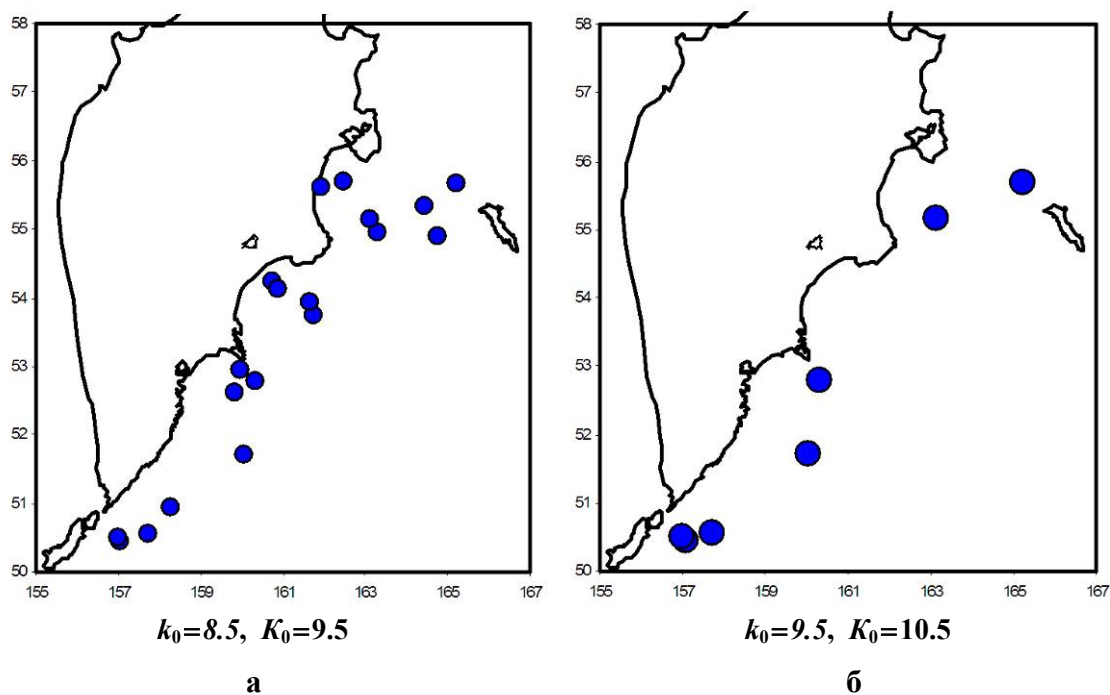


Рис. II.20. Карты эпицентров главных событий кластеров землетрясений 2007 г. при различных значениях параметров  $k_0$  и  $K_0$



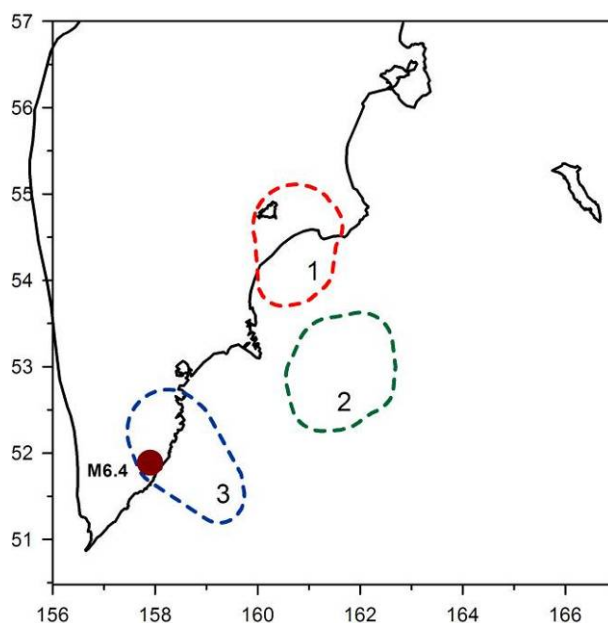
**Выявление сейсмических затиший по методике «Z-функция».** Методика «Z-функция», так же, как и методика *RTL*, ориентирована на выявление сейсмических затиший временных аномалий в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей. Методика опирается на работы [Wyss, Habermann, 1988; Habermann,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

1) параметр  $LTA(t, \Delta t) = Z = (R_2 - R_1) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ , определяющий статистическую значимость различий в скоростях сейсмического потока  $R$  (количество землетрясений в единицу времени) на двух временных участках (один – длительностью  $\Delta t$  и привязанный ко времени  $t$  окончания этого участка, другой – включает в себя все остальное время;  $\sigma_i$  – 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).

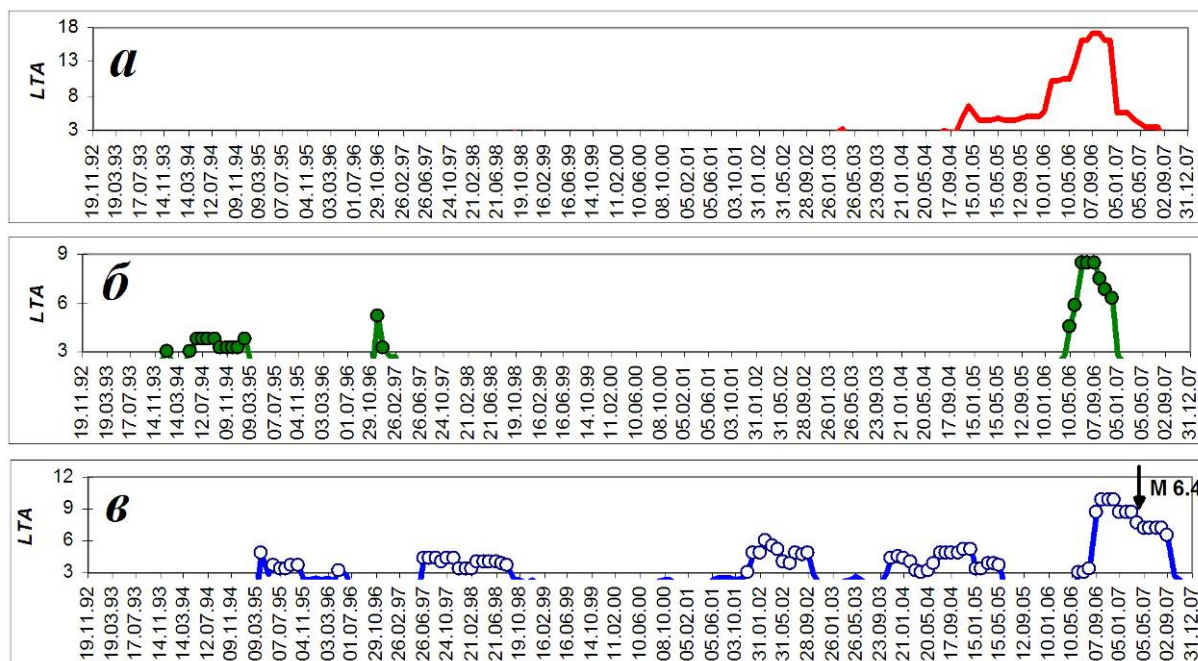
Результаты применения Z-теста к анализу камчатской сейсмичности опубликованы в [Салтыков, Кугаенко, 2000; Салтыков, Кугаенко, Кравченко, 1998]. Как показал ретроспективный анализ [Кравченко, 2005], в 60% случаев в окрестности зоны уменьшения сейсмической скорости в восемь и более раз ( $SRD \geq 0.875$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

В 2007 г. интерес представляли три пространственные области (зоны), выделенные в сейсмоактивной области Камчатки с помощью «Z-функции». В этих зонах (рис. II.21) наблюдалось уменьшение скорости сейсмического потока не менее чем в восемь раз, по сравнению с фоновой сейсмичностью, в течение не менее года. Каждое сейсмическое затишье характеризовалось большими значениями  $Z$  ( $LTA > 9$ ), что обеспечивало высокую статистическую значимость аномалии. Время существования сейсмических затиший в этих зонах можно оценить по графикам параметра  $LTA$ , построенных для временного окна 12 месяцев (рис. II.22). На границу зоны 3 приходится эпицентр наиболее сильного землетрясения этого года – 30.05.2007 г. Момент землетрясения отмечен на графике  $LTA$  для зоны 3.



**Рис. II.21. Схема расположения зон сейсмического затишья, выделенных по методике «Z-функция» в 2005–2007 гг.**

Пунктиром отмечена граница зон уменьшения уровня сейсмичности не менее чем в восемь раз в течение не менее года. Обозначен эпицентр землетрясения 30.05.2007 г. ( $M_w=6.4$ )



**Рис. 2.22. Временной ход значений LTA, рассчитанных для зон сейсмического затишья в скользящем окне шириной 12 месяцев:**  
*а – зона 1, б – зона 2, в – зона 3.*

*Стрелкой отмечен момент землетрясения 30.05.2007 г. ( $M_w=6.4$ )*

### Закключение

На основе региональных каталогов Камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2007 г. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность  $A_{10}$ , наклон графика повторяемости  $\gamma$ , параметры методик *RTL* и «*Z-функция*». Проведено сравнение значений параметров  $A_{10}$  и  $\gamma$ , полученных для 2007 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2007 гг.).

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

#### Камчатский залив, Кроноцкий полуостров:

- 1) выявлена зона уменьшения  $\gamma$ ;
- 2) наблюдаются повышенные значения активности  $A_{10}$ ;
- 3) наблюдается аномалия  $\Delta S$ , сменившая наблюдавшуюся здесь ранее (в 2006 г.) аномалию *RTL*;
- 4) завершилась *Z*-аномалия.

#### Юг Камчатки, Авачинский залив:

- 1) наблюдаются повышенные значения активности  $A_{10}$  в относительной шкале;
- 2) завершается *RTL*-аномалия;
- 3) завершилась *Z*-аномалия.

Произошедшее 30 мая землетрясение с  $M_w=6.4$  по положению в пространстве ассоциируется с *Z*- и *RTL*-аномалиями сейсмического затишья.

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.