

II. Анализ сейсмических данных

II.1. Количественный анализ сейсмичности Камчатки

В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко

Введение

В данной работе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2006 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 $K=8.5$, что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [Гордеев и др., 1998].

Результаты исследования

Энергия землетрясений Камчатки. Общая выделившаяся в 2006 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 45 лет) значении $6.3 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.6 \cdot 10^{14}$ Дж. Согласно функции распределения годовой сейсмической энергии, построенной по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2006 гг. (рис. II.1), сейсмическая энергия, выделившаяся в течение 2006 г., близка к медианному значению: функция распределения годовой энергии для $1.8 \cdot 10^{14}$ Дж равна 0.54 ± 0.07 .

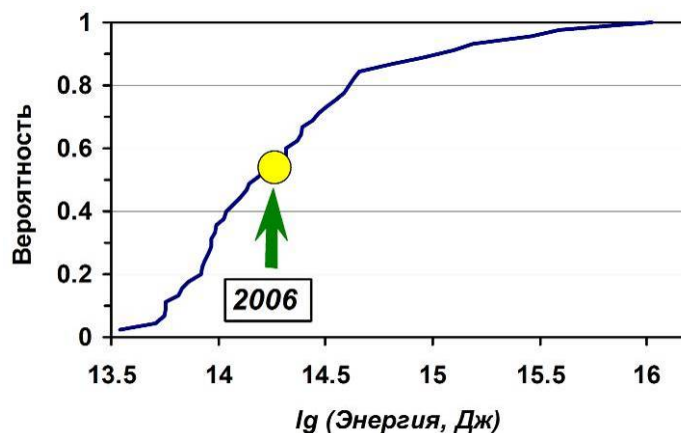


Рис. II.1. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при Камчатских землетрясениях в 1962–2006 гг. Кругом отмечено значение, соответствующее 2006 г.

Более 2/3 всей выделившейся в 2006 г. сейсмической энергии ($1.3 \cdot 10^{14}$ Дж) приходится на четыре наиболее сильных землетрясения этого года: 12 апреля ($M=5.8$), 22 мая ($M=6.8$), 17 августа ($M=5.2$) и 24 августа ($M=6.3$) [Сейсмологический бюллетень за 2006 г., 2006–2007]. Эпицентры этих землетрясений и области их афтершоковых последовательностей показаны на рис. II.2 а. Здесь же отмечен рой землетрясений, состоявший из 40 сейсмических событий, произошедших в течение 20 дней на Кроноцком полуострове в мае–июне 2006 г. Энергетический класс наиболее сильного землетрясения этого роя – 11.2, суммарная выделившаяся энергия составила $4.1 \cdot 10^{11}$ Дж.

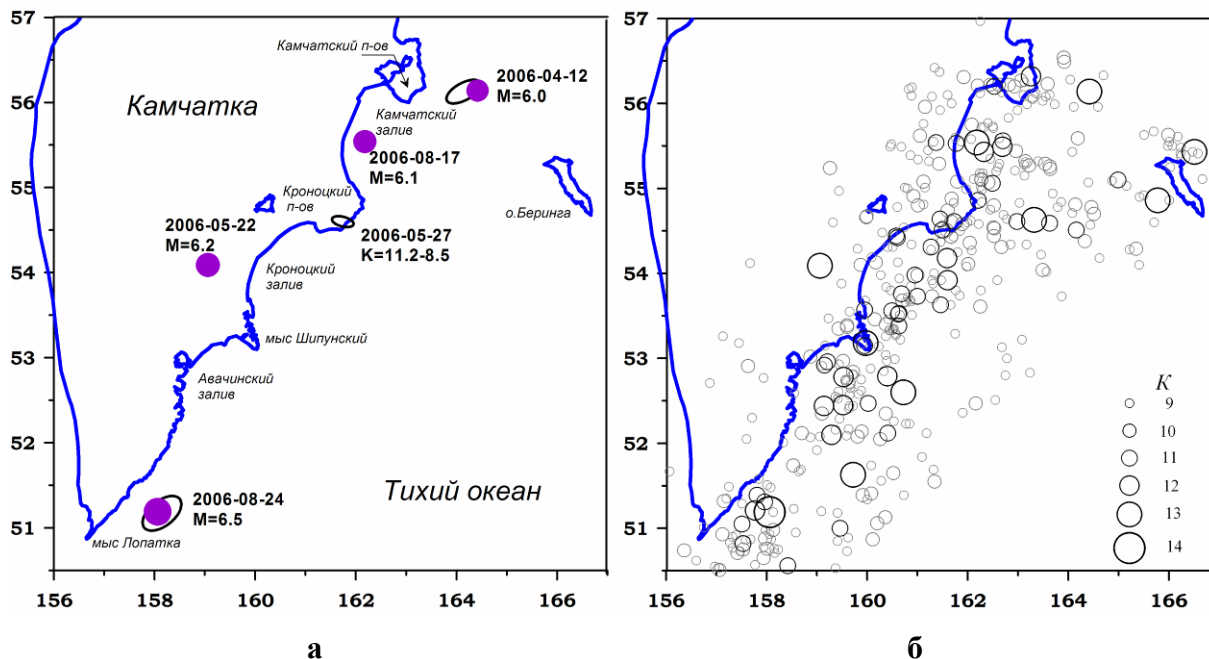


Рис. II.2. Сейсмичность Камчатки в 2006 г.:
а – сильные землетрясения ($M \geq 6$); б – фоновая сейсмичность ($K \geq 8.5$)

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 2006 г. составило 24% от общего количества сейсмических событий. Карта эпицентров независимых землетрясений 2006 г. представлена на рис. II.2 б.

Вариации наклона графика повторяемости γ . Наклон графика повторяемости γ является параметром, характеризующим распределение землетрясений (точнее, частоты их появления – N) по магнитуде M (или энергетическому классу K) (закон Гуттенберга–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 [Aki, 1965]:

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

Среднеквадратичное отклонение этой оценки определяется как: $\sigma_\gamma = \frac{\gamma}{\sqrt{N}}$ [Куллдорф, 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 2006 г. равен 0.48 ± 0.02 , что соответствует в пределах двойной ошибки определению среднеголетнему значению 0.496 ± 0.002 . Таким образом, судя по величине параметра γ , 2006 год не является аномальным. Тем не менее, интерес представляют карты значений наклона графика повторяемости γ , демонстрирующие пространственные особенности его поведения. Были построены карты γ при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 200 км (рис. П.3). Отмечается региональная особенность в распределении γ : его повышенные значения соответствуют продолжению Императорского хребта, уходящему под Камчатку в районе Кроноцкого полуострова. Более ярко этот эффект проявляется при длительном осреднении ($\Delta T=45$ лет), когда случайные или кратковременные вариации γ нивелируются. При сравнении карт γ , рассчитанных для 2006 г. и для всего времени детальных наблюдений, визуально отмечается уменьшение значения γ в 2006 г. для района Кроноцкого залива (рис. П.3 а).

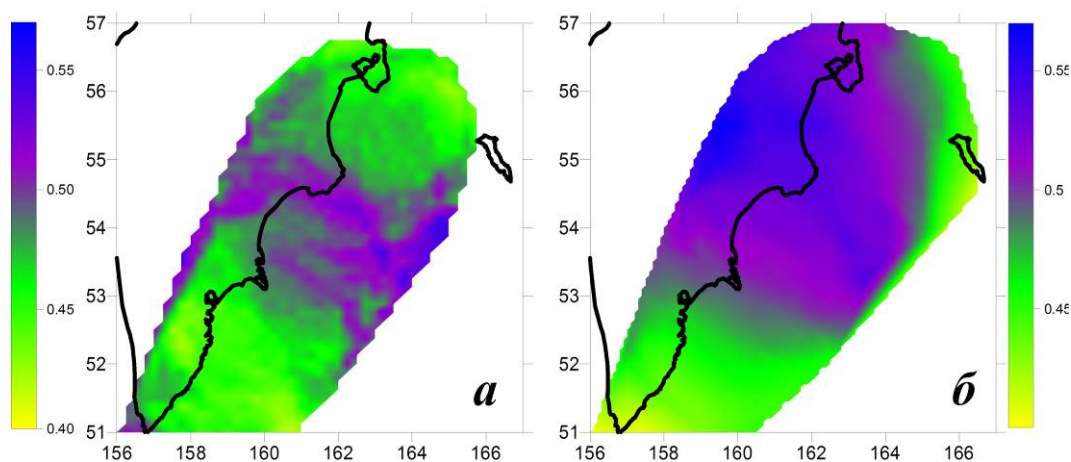


Рис. П.3. Карты наклона графика повторяемости γ :
а – рассчитанные для 2006 г.; б – для сравнения за 1962–2005 гг.

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. П.4 приведены карты нормированной вариации Z_γ для 2005–2006 гг., по сравнению с многолетним фоном и по сравнению с 2001–2004 гг. Карты построены при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса R с фиксированным количеством попавших в них землетрясений N (в данном случае – $N=100$). Оказалось, что при увеличении временного окна до двух лет южнее Кроноцкого полуострова обнаруживается статистически значимое ($p < 0.01$) уменьшение γ относительно среднеголетнего значения. Следует также отметить процесс уменьшения γ в Камчатском заливе: значения γ различаются в 2005–2006 гг. и в 2001–2004 гг. Окружности, отмеченные на картах, соответствуют размерам аномалий.

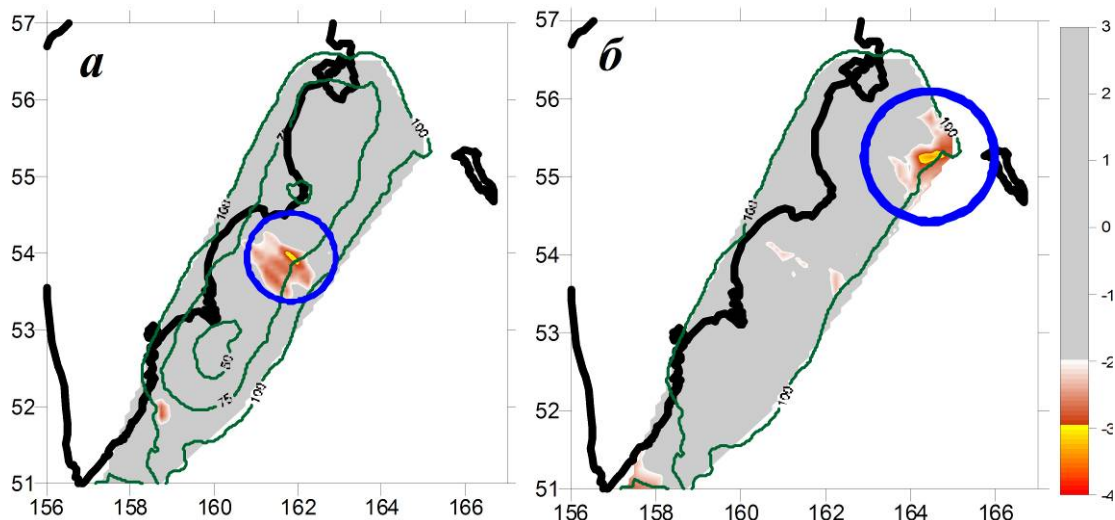


Рис. 2.4. Изменение γ в 2005–2006 гг. по сравнению с многолетним фоном:
а – нормированное на его среднеквадратичное отклонение, *б* – по сравнению с 2001–2004 гг.
 Изолинии соответствуют радиусу элементарной пространственной ячейки, содержащей 100 землетрясений, окружность – пространственному размеру аномалии

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 $T=1$ 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 2006 г. составила 0.248 ± 0.006 при среднемноголетнем значении 0.283 ± 0.001 , т.е. активность региона в 2006 г. была ниже среднего уровня на $\approx 12\%$. Однако это различие не является существенным, поскольку среднеквадратичное отклонение по выборке среднегодовых значений A_{10} составляет 0.03.

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. 2.5. Как следует из сравнения рис. 2.5 а и 2.5 б, в основном, распределение активности A_{10} в 2006 г. также соответствует среднемноголетнему распределению. Более информативными являются карты относительных значений A_{10} , полученных на коротком (1 год), и длинном (45 лет), каталогах. Из анализа этих карт можно сделать вывод, что в 2006 г. повышенные относительные значения активности A_{10} наблюдались в северной части рассматриваемой области, в районе острова Беринга, Камчатского и Кроноцкого полуостровов, Камчатского залива. В южной части Камчатки, между мысами Лопатка и Шипунский, A_{10} имеет повышенные значения в узкой полосе субширотной ориентации в районе Авачинского залива. Следует заметить, что повышенные значения на границах закрашенной области статистически малозначимы.

Мониторинг параметров RTL и ΔS . 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.

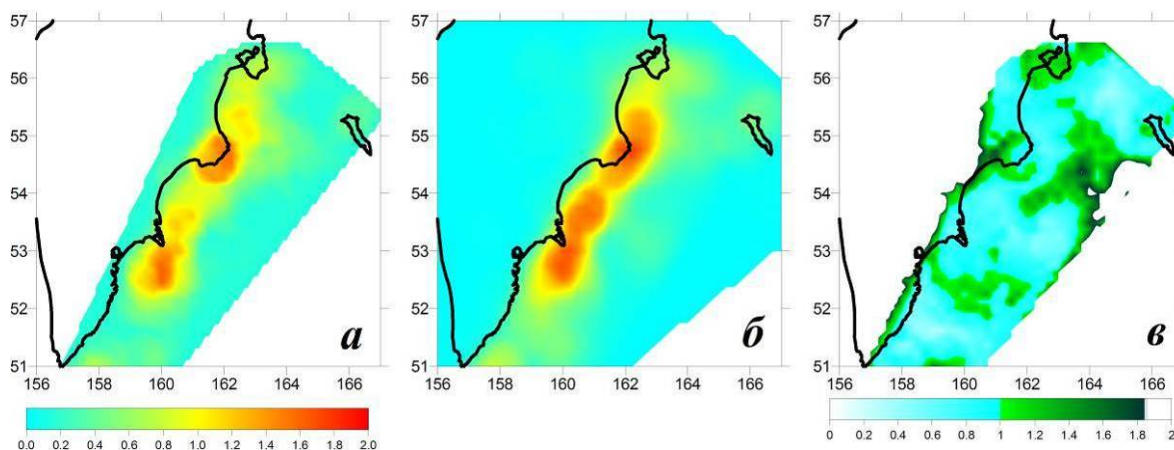


Рис. II.5. Карты сейсмической активности A_{10} :
а – для 2006 г.; **б** – для сравнения за 1962–2006 гг.;
в – для 2006 г., A_{10} нормирована на многолетнюю активность

Выделение области сейсмического затишья по методу RTL происходит следующим образом. Исследуемый район покрывается сеткой с шагом $7'30''$ по широте и $15'$ по долготу. 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 удалённых 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 $RTL < -3$.

В 2001–2003 гг. в Камчатском заливе и в южной части сейсмоактивной зоны существовали значительные сейсмические аномалии по параметру RTL [Салтыков, Кравченко, 2004]. В 2002 г. значения RTL достигали -40 и -18 в отдельных расчетных точках северной и южной аномалий, соответственно. Длительность затиший составила более 1.7 года для северной и около двух лет – для южной аномалий. Затишья в обеих зонах завершились осенью 2003 г. Ожидаемых сейсмических событий с $M \geq 7$, на которые ориентирован метод RTL , не произошло, хотя прошло более трех лет после окончания затишья.

На рис. II.6 представлены карты минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в сейсмоактивной области Камчатки в течение 2006 г. 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.

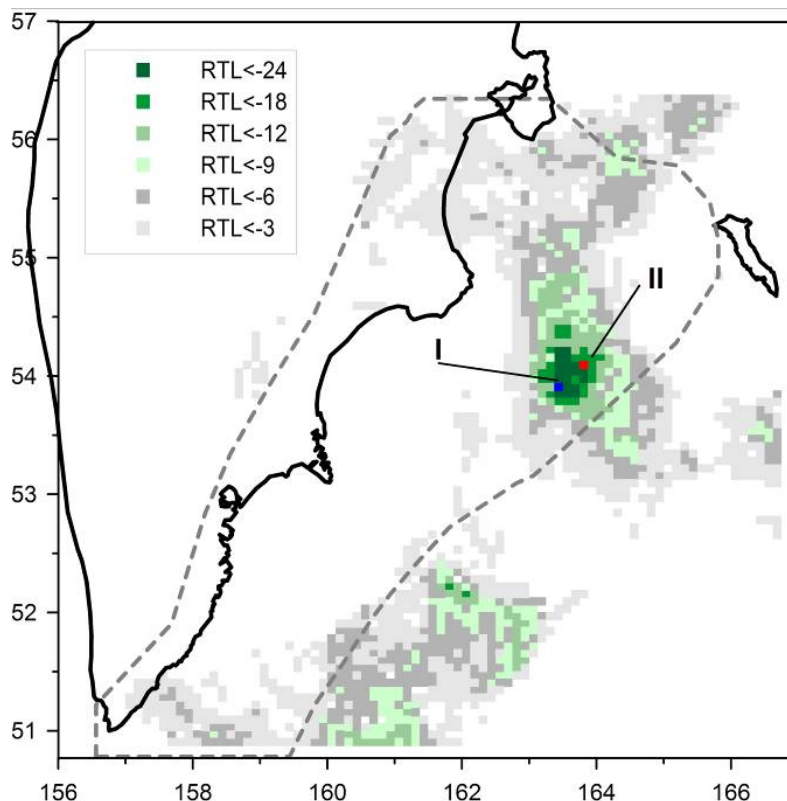


Рис. II.6. Карта минимальных значений RTL -параметра в 2006 г.

Цифрами отмечены реперные точки, пунктиром – область надежного определения параметра RTL

В зоне, расположенной восточнее Кроноцкого полуострова и примыкающей к северной аномалии 2001–2003 гг., сейсмическое затишье наиболее ярко проявилось в 2005 г., значение параметра RTL в отдельных расчетных точках достигало -25 . Для характерных точек I и II (точки с максимальными по модулю значениями параметра RTL) построены временные RTL -графики (рис. II.7), из которых следует, что аномалия RTL 2005–2006 гг. длилась ≈ 16 месяцев и завершилась в августе 2006 г.

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 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.

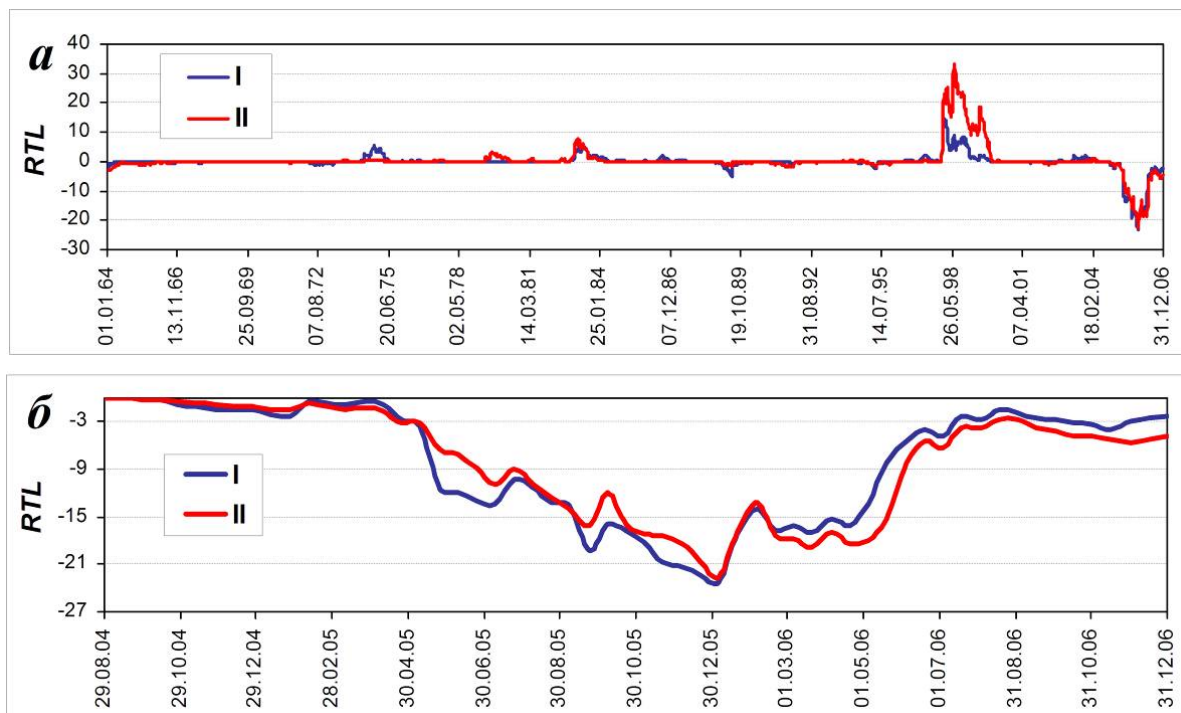


Рис. II.7. Временной ход RTL-параметра в 1962–2006 гг. в реперных точках (рис. II.6): а – в течение всего интервала наблюдений; б – в последние 2.5 года

На рис. II.8 представлена карта максимальных вариаций площади сейсмогенных разрывов ΔS в 2006 г. Сейсмическая активность по параметру ΔS наиболее значительно проявилась в северной части камчатской сейсмоактивной зоны. Из сравнения рис. II.6 и II.8 видно, что область сейсмической активности по параметру ΔS примыкает к северной аномалии RTL, что может свидетельствовать о переходе подготовки сильного землетрясения из этапа сейсмического затишья в этап форшоковой активизации.

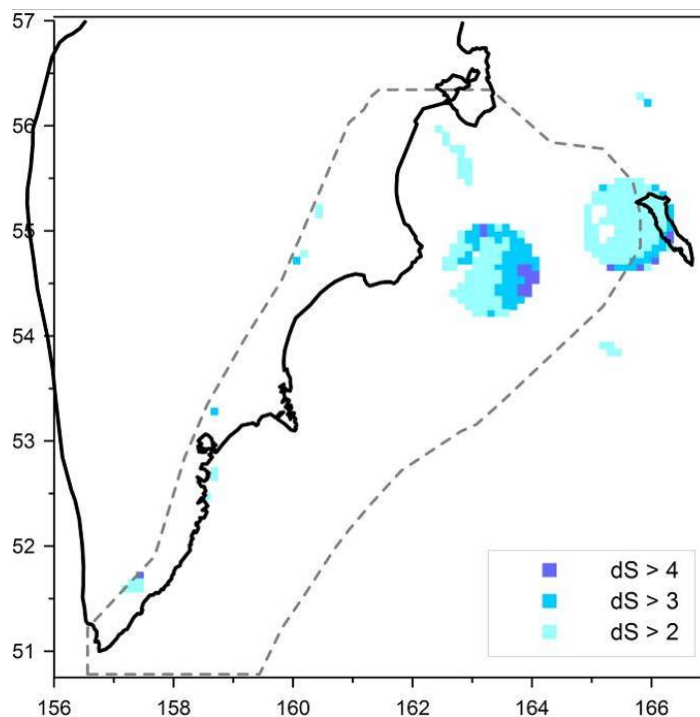


Рис. II.8. Карта максимальных значений ΔS -параметра, рассчитанных на декабрь 2006 г. Пунктиром отмечена зона надежного определения ΔS -параметра

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 ($\lg l_i=0.244-2.266$), 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.

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.9 отмечены кластеры, выделенные в 2006 г. в исследуемой области Камчатки. Основная часть кластеров 2006 г. приходится на северную часть камчатской сейсмоактивной зоны. Причем эта особенность наблюдается для кластеров с различной энергией. Полученные данные не противоречат выводам, полученным по методикам *RTL* и ΔS .

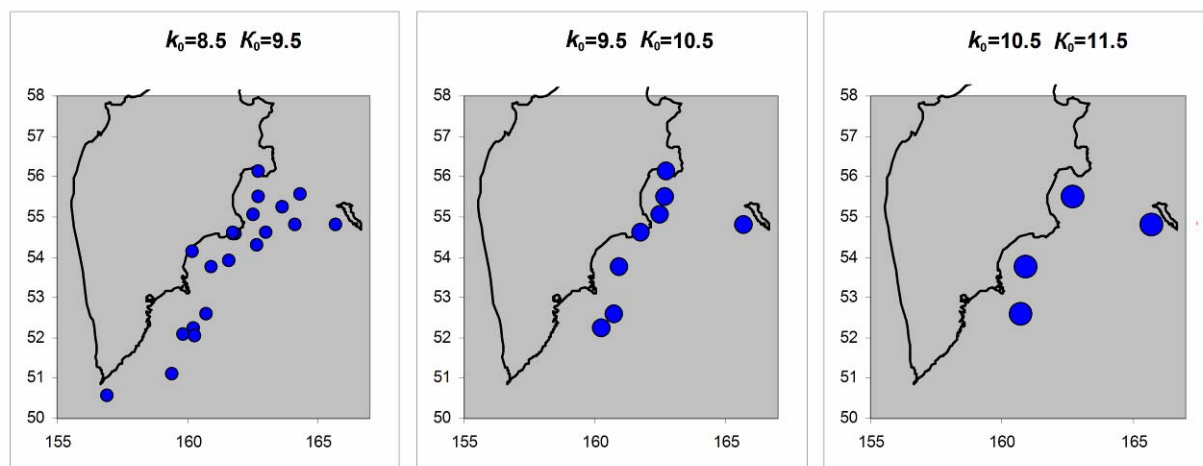


Рис. П.9. Карты эпицентров главных событий кластеров землетрясений 2006 г. при различных значениях параметров k_0 и K_0

Выявление сейсмических затихий по методу «Z-функция». Методика «Z-функция», так же как и методика *RTL*, ориентирована на выявление сейсмических затихий как временных аномалий в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей. Методика опирается на работы М. Виса и Р. Хабермана [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 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.

В 2006 г. интерес представляли шесть пространственных областей (зон), выделенных в сейсмоактивной области Камчатки с помощью Z -теста. В этих зонах (рис. II.10) 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. В зоне 1 аномалия сейсмического затишья ($SRD=0.85$) наблюдалась во временном окне 13 месяцев (с июня 2002 г. по июнь 2003 г.). В зоне 2 уменьшение скорости сейсмического потока более чем в восемь раз наблюдалось с октября 2003 г. по октябрь 2004 г. В зоне 3 скорость сейсмического потока была почти в девять раз меньше фоновой в течение 14 месяцев (до мая 2005 г.). В зоне 4 отмечено уменьшение скорости сейсмического потока в восемь раз в течение полутора лет (с июля 2004 г. по сентябрь 2005 г.). В зонах 5 и 6 аномалии сейсмического затишья проявились практически одновременно. В июне 2006 г. значения параметра SRD во временном окне 12 месяцев для обеих аномалий составили 0.90.

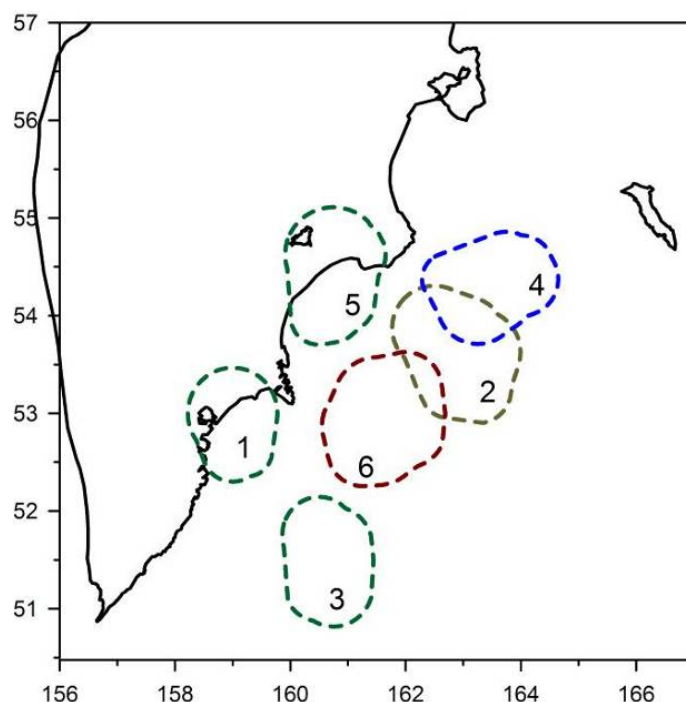


Рис. II.10. Схема расположения зон сейсмического затишья, выделенных по методике Z -тест в 2003–2006 гг. Пунктиром отмечена граница зон уменьшения уровня сейсмичности не менее чем в восемь раз в течение не менее года

Интересно отметить развитие сейсмического процесса на востоке Кроноцкого залива, в районе местоположения частично перекрывающихся зон 2, 4 и 6. При этом, как следует из сравнения графиков параметра SRD , построенных для временного окна 12 месяцев для каждой из этих зон, во времени аномалии практически не перекрываются (рис. II.11). Сейсмическое затишье первоначально проявилось в зоне 2, затем разделилось на две области, каждая из которых развивалась независимо. Применение Z -теста для области, охватывающей зоны 2, 4, 6, позволяет выделить значимое ($LTA=7.0$) уменьшение уровня сейсмичности почти в четыре раза ($SRD=0.73$) с апреля 2004 г. по март 2005 г.

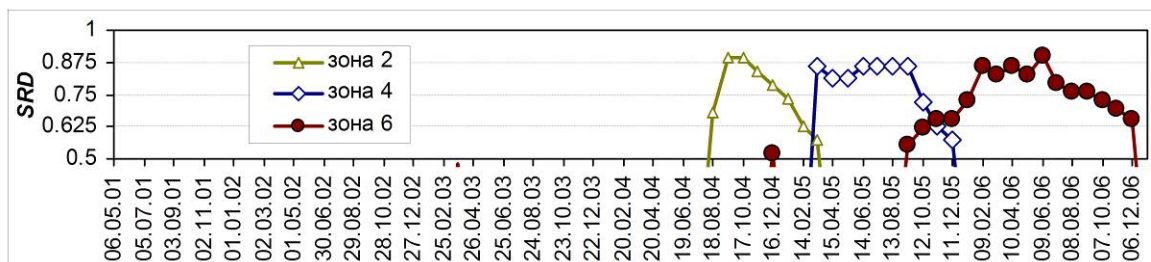


Рис. 11.11. Временной ход значений SRD, рассчитанных для зон 2, 4 и 6 в скользящем окне шириной 12 месяцев

В 2006 г. в сейсмоактивных зонах Камчатки произошли четыре землетрясения с магнитудой $M > 6$, на которые ориентирована методика «Z-функция». Пространственно-временная связь между этим землетрясением и выделенными аномалиями сейсмического затишья не прослеживается.

Заключение

На основе региональных каталогов Камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2006 г. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL и Z-теста. Проведено сравнение значений параметров A_{10} и γ , полученных для 2006 г., с их средними значениями за весь период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1962–2006 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) завершилась аномалия RTL;
- 2) наблюдается аномалия dS ;
- 3) наблюдаются повышенные значения активности A_{10} в относительной шкале;
- 4) наблюдаются кластеры землетрясений;
- 5) выявлены зоны уменьшения γ ;
- 6) завершилась Z-аномалия.

Следует отметить интересный факт: исчезновение ряда предвестников, наблюдавшихся ранее (в течение нескольких последних лет) на юге Камчатки:

- 1) завершение аномалии RTL не привело к сильному землетрясению;
- 2) продолжает наблюдаться повышенное значение dS в районе Авачинского залива, но эти значения существенно ниже прошлогодних в том же районе;
- 3) не наблюдаются кластеры землетрясений, а в 2005 г. они практически все наблюдались между мысами Шипунский и Лопатка. При этом время между ними уменьшалось, что являлось еще одним прогностическим признаком;
- 4) произошедшее в августе землетрясение с $M=6.2$ не ассоциируется ни с одной из завершенных Z-аномалий;
- 5) зона уменьшения γ на юге Камчатки остается значимой на большом временном интервале осреднения – более четырех лет, а на более коротких отрезках этот вывод не подтверждается.

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.