

Салтыков В. А.^{1,2}, Кравченко Н. М.¹¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru² Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский**Введение**

В работе дана общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2005-2006 гг. и построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности. В комплекс рассматриваемых характеристик входят общая выделившаяся сейсмическая энергия, активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры RTL и ΔS , кластеризация землетрясений и параметры методики «Z-тест». 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. Нижний энергетический уровень землетрясений был определен как $K=8.5$, что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [1]. Из анализа исключены зависимые, группирующиеся события. Используемая для этого программа Смирнова В. Б. (МГУ имени Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в работе [2].

Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделившаяся сейсмическая энергия

$$E = \sum_i 10^{K_i}, \text{ где } K_i - \text{энергетический класс}$$

землетрясения, составила $5.8 \cdot 10^{13}$ Дж в 2005 г. и $1.8 \cdot 10^{14}$ Дж в 2006 г., 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., в 2005 г. наблюдался пониженный уровень сейсмичности (в 85% случаев годовая сейсмическая энергия превышала эту величину), а сейсмическая энергия, выделившаяся в течение 2006 г., близка к медианному значению (Рис.1).

Половина выделившейся в 2005 г. энергии приходится на два наиболее сильных землетрясения этого года: 7 июля с магнитудой $M_w=5.6$ и 26 июля с магнитудой $M_w=5.8$ (Рис. 2). В течение 2006 г. произошло 7 землетрясений с магнитудой ≥ 5.5 : 6 февраля ($M_w=5.7$), 12 апреля ($M_w=6$), 18 мая ($M_w=5.7$), 22 мая ($M_w=6.2$), 17 августа ($M_w=6.1$), 24 августа ($M_w=6.5$) и 1 сентября ($M_w=5.7$). Сейсмическая энергия, выделившаяся в результате этих землетрясений и связанных с ними афтершоков, составила $1.3 \cdot 10^{14}$ Дж. Моментные магнитуды M_w , используемые в работе, взяты на сайте Геологической службы США (U.S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov>). В мае 2006 г. в районе Кроноцкого полуострова был зафиксирован рой землетрясений, состоящий из 40 событий с энергетическими классами 8.5 - 11.2. Сейсмическая энергия, выделившаяся в рое землетрясений, составила $2 \cdot 10^{11}$ Дж.

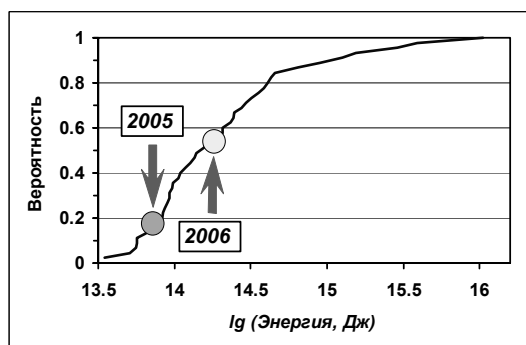
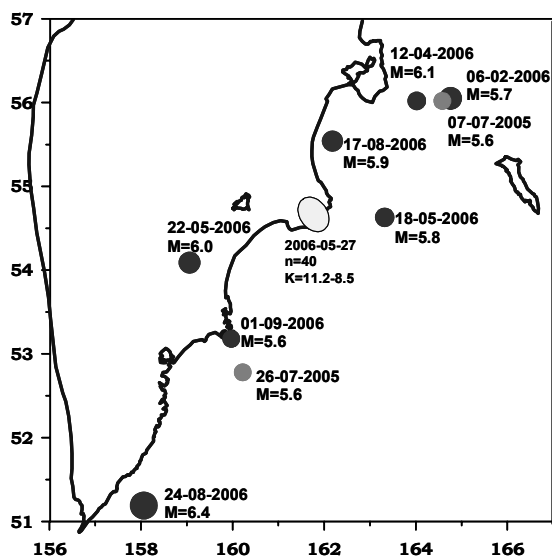
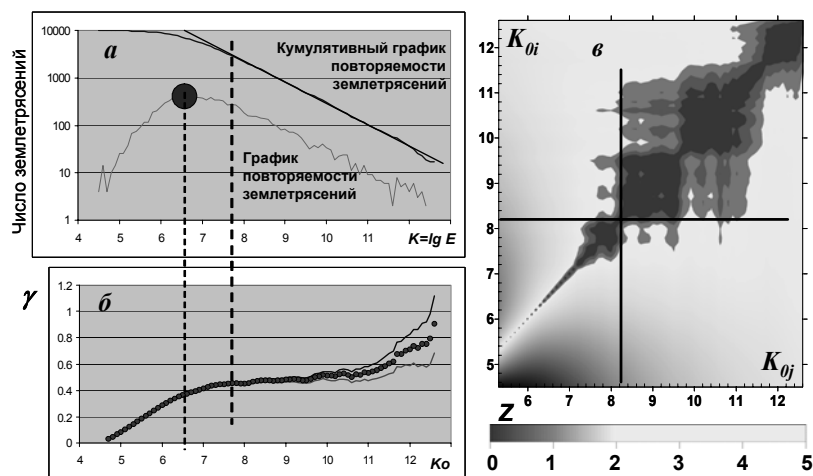


Рис. 1. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962-2006 гг.

Рис. 2. Землетрясения Камчатки 2005-2006 гг. с магнитудой $M_w > 5.5$. Отмечено положение роя землетрясений ($n=40$)

Определение уровня надежной регистрации

Уровень надежной регистрации землетрясений обычно определяют по кумулятивному графику повторяемости землетрясений (Рис. 3а). Отклонение графика от линейного тренда означает изменение наклона графика повторяемости γ , что и определяет уровень надежной регистрации K_0 . Иногда уровень надежной регистрации определяют по максимуму графика повторяемости. Отнесем полученные результаты на график зависимости γ от K_0 (Рис. 3б).



Второй способ определяет K_0 на интервале значительного изменения γ , и поэтому не приемлем. При первом способе отклонение графика повторяемости от прямой определяется обычно визуально, что также часто ведет к неверной оценке K_0 . Для того чтобы определить значение K_0 , ниже которого изменение γ значимо, рассчитаем нормированную вариацию γ для каждой пары $K_{0i}-K_{0j}$:

$$Z_{ij} = \frac{|\gamma(K_{0i}) - \gamma(K_{0j})|}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}}$$

Рис.3. Иллюстрация к определению уровня надежной регистрации камчатских землетрясений 2005-2006 гг.: график и кумулятивный график повторяемости землетрясений (а), зависимость наклона графика повторяемости от K_0 (б), нормированная вариация γ (в)

Будучи нанесенные на координатную плоскость (K_{0i}, K_{0j}) значения нормированной вариации γ определяют область малых значений Z , в пределах которой наклон графика повторяемости можно считать постоянным. Граница этой области определяет уровень надежной регистрации. Для оперативного каталога камчатских землетрясений 2005-2006 гг. уровень надежной регистрации, определенный таким образом, соответствует энергетическому классу 8.2

Вариации наклона графика повторяемости γ и сейсмической активности A_{10}

Определение наклона графика повторяемости γ и сейсмической активности A_{10} основано на повторяемости землетрясений как фундаментальном свойстве сейсмического процесса.

Наклон графика повторяемости γ в 2005 г. равен 0.50 ± 0.02 , в 2006 г. - 0.48 ± 0.02 , что соответствует в пределах ошибки определения среднемноголетнему значению 0.496 ± 0.002 . Средняя по исследуемому району активность A_{10} в 2005 г. составила 0.271 ± 0.007 , в 2006 г. - 0.248 ± 0.006 при среднемноголетнем значении 0.285 ± 0.001 . Среднеквадратичное отклонение по выборке среднегодовых значений A_{10} составляет 0.03. Таким образом, по средним для Камчатки значениям параметров γ и A_{10} 2005-2006 гг. не являются аномальными. Площадные распределения A_{10} (Рис. 4) и γ (Рис. 5) в 2005-2006 г. также в целом соответствуют среднемноголетним распределениям, поэтому более информативными являются карты относительных значений A_{10} и

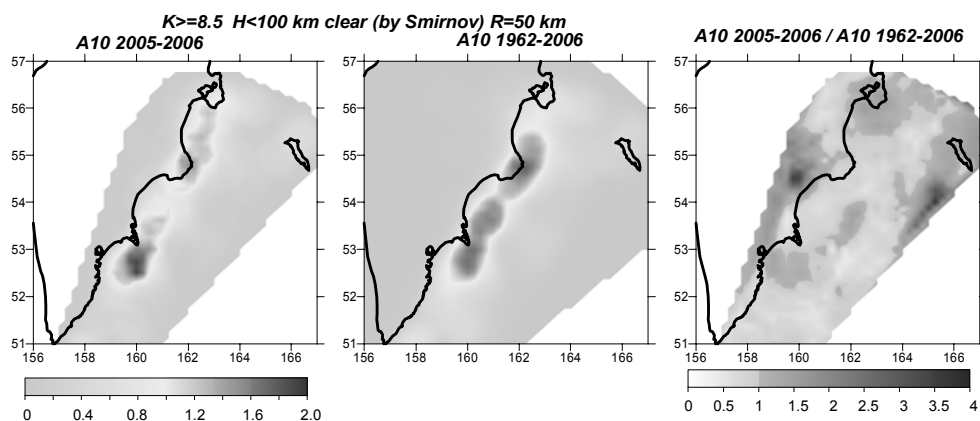


Рис.4. Карты сейсмической активности A_{10} , рассчитанные для 2005-2006 г., для сравнения – для 1962-2006 г., активности A_{10} для 2005-2006 г., нормированной на многолетнюю активность

вариаций γ . Из анализа карты относительных значений A_{10} , полученных на каталоге за 2005-2006 гг. и многолетнем (за 45 лет) каталоге, следует, что в исследуемый период времени наибольшая

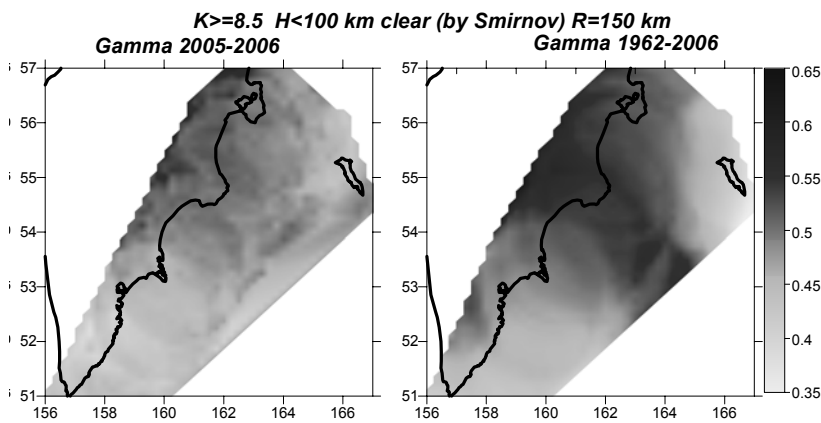


Рис. 5. Карты наклона графика повторяемости γ , рассчитанные для 2005-2006 г. и для 1962-2006 г.

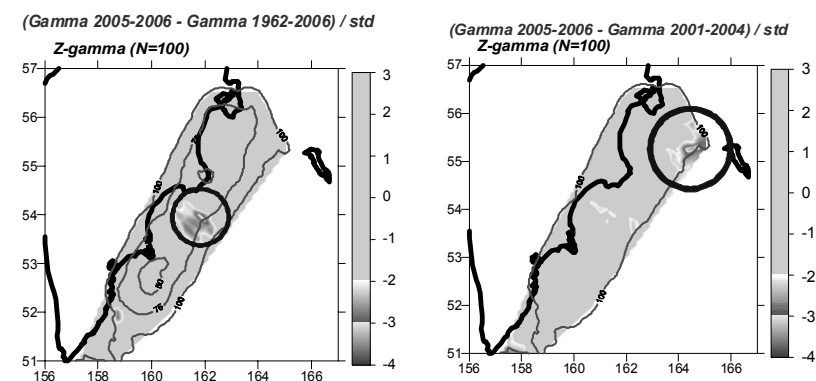


Рис.6. Карты вариаций γ в 2005-2006 гг. относительно многолетнего фона и относительно 2001-2004 гг. Изолинии соответствуют радиусу ячейки, содержащей 100 событий, окружности - размерам аномалий.

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 [11], 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 до трех лет после выхода RTL из минимума.

В 2001-2003 гг. в Камчатском заливе и в южной части сейсмоактивной зоны (Рис.7) существовали сейсмические аномалии по параметру RTL . Для характерных точек аномалий

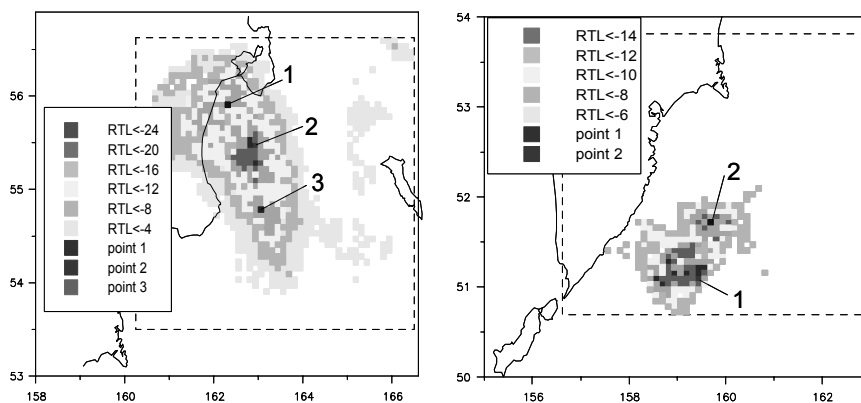


Рис. 7. Карта минимальных значений RTL в 2001-2003 гг. Слева - для северной, справа - для южной части сейсмоактивной области Камчатки.

относительная активность A_{10} наблюдалась в районе острова Беринга, на севере Камчатского залива, в восточной части Кроноцкого залива и в Авачинском заливе.

Карты нормированной вариации γ для 2005-2006 гг. по сравнению с многолетним фоном и по сравнению с 2001-2004 гг. представлены на рис. 5. Карты построены при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса R с фиксированным количеством ($N=100$) попавших в них землетрясений. Проведенное сканирование позволило выделить южнее Кроноцкого полуострова аномалию статистически значимого уменьшения γ относительно многолетнего значения. Следует также отметить наблюдающийся в Камчатском заливе процесс уменьшения γ в 2005-2006 гг. по сравнению с 2001-2004 гг.

построены графики RTL (Рис.8), согласно которым, затишья в обеих зонах завершились осенью 2003 г. Значения RTL достигали -18 и -12, длительность затишья - 1.7 года и 2 года для северной и южной аномалий, соответственно.

До настоящего времени в районе этих аномалий не произошли землетрясения с $M \geq 7$, на которые ориентирован метод RTL .

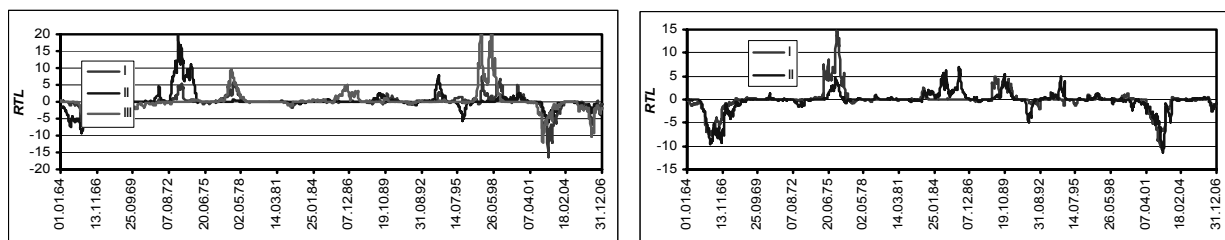


Рис.8. Временной ход RTL для характерных точек северной (слева) и южной (справа) аномалий 2001-2003 гг.

На Рис. 9 представлена карта минимальных значений параметра RTL , наблюдавшихся в сейсмоактивной области Камчатки в течение 2005-2006 гг. Штриховой линией отмечена область сканирования, за пределами которой аномалия не считается достоверной. Для характерных точек аномалии RTL , проявившейся восточнее Кроноцкого полуострова, построены временные графики параметра RTL , из которых следует, что аномалия сейсмического затишья по параметру RTL 2005-2006 гг. длилась ≈ 16 месяцев и завершилась в августе 2006 г.

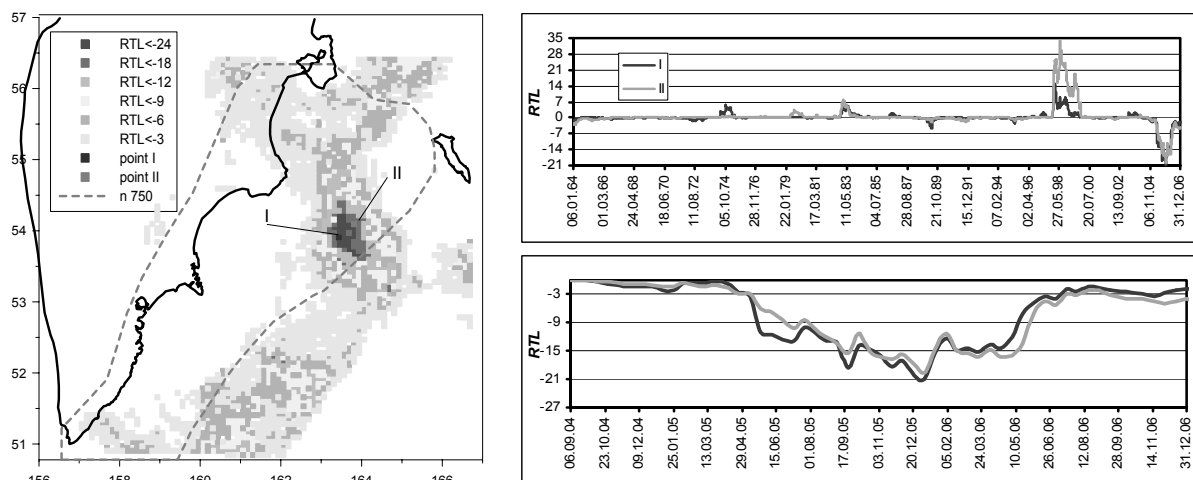


Рис.9. Слева: карта минимальных значений RTL в 2005-2006 гг. Справа: временной ход параметра RTL для точек I и II за весь период детальных наблюдений (вверху) и за последние 2.5 года (внизу).

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 и среднегодовым значением. Согласно картам максимальных вариаций площадей сейсмогенных разрывов ΔS в 2005-2006 гг. (Рис. 10), сейсмическая активизация происходила в непосредственной близости к аномалиям сейсмического затишья по параметру RTL 2001-2003 гг. (Рис. 7), что может означать переход подготовки сильного землетрясения в стадию форшоковой активизации.

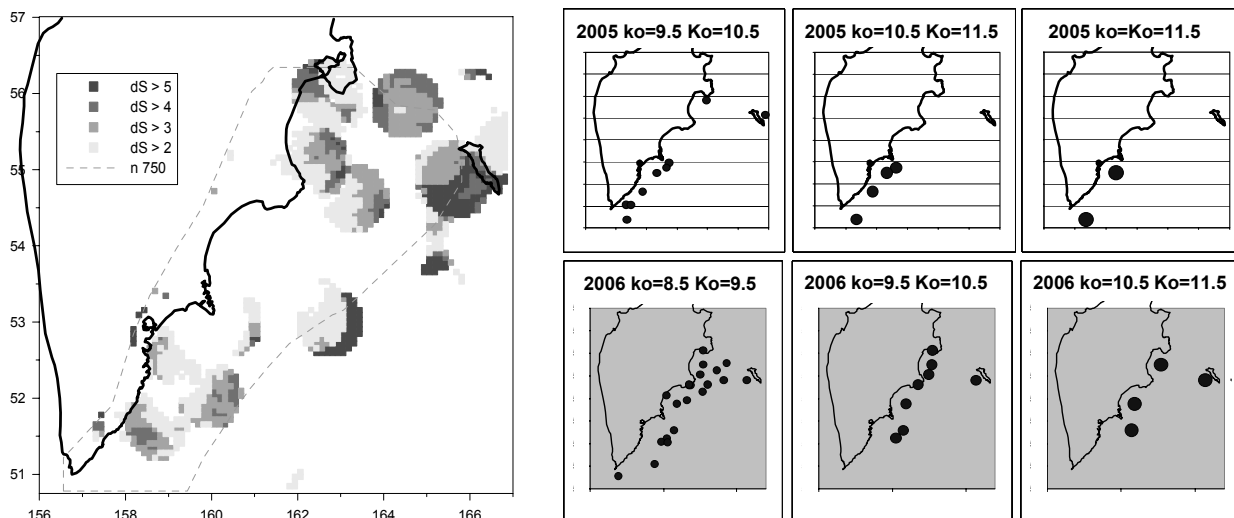


Рис.10. Карта максимальных значений ΔS в 2005 - 2006 гг.

Рис.11. Карта эпицентров главных событий кластеров 2005 г. и 2006 г. при различных значениях параметров k_0 и K_0 .

Контроль кластеризации землетрясений

Образование кластеров может свидетельствовать о стягивании сейсмической активности к месту будущего макроразрыва [3]. Параметрами кластеров являются минимальный класс землетрясений в кластере k_0 и минимальный класс основного события в кластере K_0 .

На Рис. 11 отмечены кластеры, выделенные в 2005 г. и 2006 г. в исследуемой области Камчатки. Основная часть кластеров 2005 г. произошла на юге Камчатки, в полосе широт от $50^\circ N$ до $53^\circ N$. Причем эта особенность наблюдается для кластеров с различной энергией и соответствует южной области сейсмической активизации 2005-2006 гг. (Рис.10). Кластеры 2006 г. распределены более равномерно. Следует отметить, что кластеры с наибольшей энергией смещены на север сейсмоактивной зоны Камчатки, их положение также соответствует зонам сейсмической активизации по параметру ΔS

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-тест»

Метод «Z-тест» опирается на работу [4] 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 Δt 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.

В 2005-2006 гг. интерес представляли 5 пространственных областей (зон), в которых наблюдалось уменьшение скорости сейсмического потока не менее, чем в 8 раз, по сравнению с фоновой, в течение не менее года (Рис. 9).

Каждое сейсмическое затишье характеризовалось большими значениями Z ($LTA > 7$). В зонах 1 и 2 скорость сейсмического потока была в 8 раз меньше фоновой в течение 2004 г. В зоне 3 затишье длительностью 13 месяцев закончилось в апреле 2005 г. В зоне 4 отмечено уменьшение скорости сейсмичности в 8 раз с июля 2004 г. по сентябрь 2005 г., в зоне 5 – с сентября 2005 г. по декабрь 2006 г.

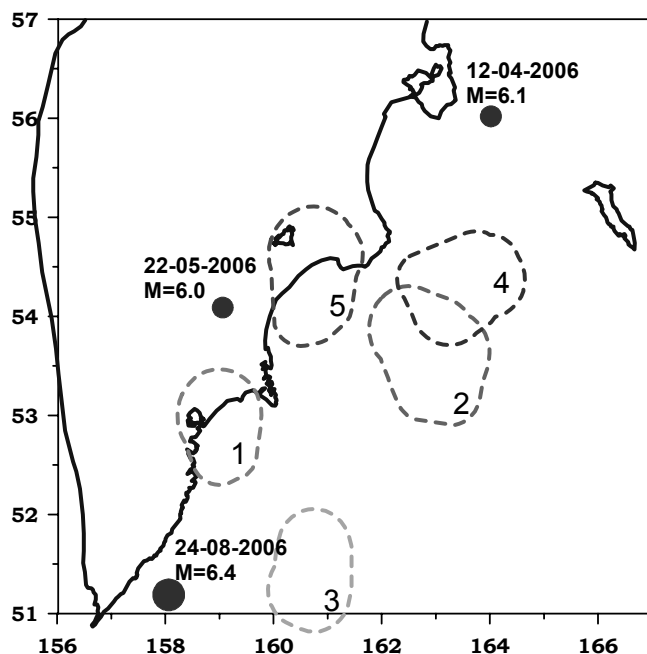


Рис.12. Карта зон сейсмических аномалий, выделяемых Z-тестом. Отмечены эпицентры землетрясений с $M \geq 6$, произошедших в 2005-2006 гг.

На рис. 9 отмечены также эпицентры землетрясений 2005-2006 гг. с магнитудой не менее 6, на которые ориентирован метод Z-тест. Пространственно-временной связи между этими землетрясениями и выделенными аномалиями выявлено не было.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 6-27.
2. 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.
3. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
4. Wyss M., Habermann R.E. Precursory quiescence // Pageoph. 1988. Vol.126. P.319-332