



PARAMETERS OF KAMCHATKA SEISMICITY IN 2008

V. A. Saltykov, N. M. Kravchenko

*Kamchatka Branch of Geophysical Survey RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Piip blvd, 9, Russia*

Abstract: The paper describes seismicity of Kamchatka for the period of 2008 and presents 2D distribution of background seismicity parameters calculated from data published in the Regional Catalogue of Kamchatka Earthquakes. Parameters under study are total released seismic energy, seismic activity A_{10} , slope of recurrence graph γ , parameters of RTL, ΔS and Z-function methods, and clustering of earthquakes. Estimations of seismicity are obtained for a region bordered by latitude 50.5–56.5N, longitude 156E–167E, with depths to 300 km. Earthquakes of energy classes not less than 8.5 as per the Fedotov's classification are considered. The total seismic energy released in 2008 is estimated. According to a function of annual seismic energy distribution, an amount of seismic energy released in 2008 was close to the median level (Fig. 1). Over 2/3 of the total amount of seismic energy released in 2008 resulted from three largest earthquakes ($M_w \geq 5.9$). About 5 percent of the total number of seismic events are comprised of grouped earthquakes, i.e. aftershocks and swarms. A schematic map of the largest earthquakes ($M_w \geq 5.9$) and grouped seismic events which occurred in 2008 is given in Fig. 2; their parameters are listed in Table 1. Grouped earthquakes are excluded from the catalogue. A map showing epicenters of independent earthquakes is given in Fig. 3. The slope of recurrence graph γ and seismic activity A_{10} is based on the Gutenberg-Richter law stating the fundamental property of seismic process. The recurrence graph slope is calculated from continuous exponential distribution of earthquakes by energy classes. Using γ is conditioned by observations that in some cases the slope of the recurrence graph decreases prior to a large earthquake. Activity A_{10} is calculated from the number of earthquakes N and recurrence graph slope γ . Average slopes of recurrence graph γ and seismic activity A_{10} for the area under study in 2008 are calculated; our estimations give evidence that the year of 2008 was not anomalous in terms of seismicity. Based on 2D distribution of recurrence graph slope γ , it is possible to locate an area of lower values of γ in the southern part of the Kamchatka seismic zone (Fig. 4). Data on maps of normalized variation of γ for 2007–2008 and 2006–2008 (Fig. 5) confirm statistical importance of γ reduction through the last three years in the given area. Maps of 2D distribution of seismic activity A_{10} are constructed for 2008 and the period from 1962 to 2008; values of seismic activity A_{10} that are normalized to the average annual seismic activity are also mapped (Fig. 6). In 2008, increased values of A_{10} were observed at the southern part of the Avachinsky gulf and at the northern part of the Kamchatka gulf, as well as in the northern water area of Bering Island. The anomalous behavior of parameters RTL, ΔS and clustering of earthquakes may have predictive character [Sobolev, 2000]. Negative values of RTL-parameter correspond to seismic quiescence; increasing areas of seismic ruptures ΔS correspond to foreshock activation; clustering of earthquakes can evidence that activation tends to accumulate at a future main rupture location. For 2008, three zones of seismic quiescence were defined by data (Fig. 7). For estimation points with maximum modular values of RTL (marked by the Roman numerals in Fig. 7), RTL time curves are constructed for each of the above mentioned zones (Fig. 8); they provide for defining durations of anomalies and degrees of manifestation. A map of variations of seismic rupture areas ΔS (Fig. 9) shows that seismic activity of 2008 was mainly manifested at the southern part of the Kamchatka seismic zone. In 2008, most of the earthquake clusters varying in energy also occurred in the southern part of Kamchatka (Fig. 10). The northern chain of clusters is located at the border of the developing seismic anomaly, as defined by RTL parameter. Similar to RTL technique, an objective of the Z-function method is to reveal seismic quiescence periods as temporary anomalies of seismic process in specific areas [Wyss, Habermann, 1988]. The Z-function method reveals a zone wherein seismic rates decreased by a factor of 8 during 2008 (see a dashed-line contour in Fig. 11); the given zone is partially coincident with the southern anomaly defined by RTL parameter. The curve showing time dependence $Z(t)$ through 12 months confirms statistical significance of seismic quiescence in the given area (Fig. 12). It should be noted that epicenters of the three largest earthquakes of 2008 occurred at the areas of seismic quiescence that are revealed by both methods (see Fig. 7 and 11). Earthquake timing is shown by arrows on corresponding time curves (see Fig. 8 and 12). Taking into account that a number of indicators, which can potentially have predictive character, are well correlated in space and time, there are grounds to conclude that seismic danger is increased in the southern part of the Kamchatka seismic zone and the Kamchatka Gulf region.

Keywords: seismicity, monitoring, Kamchatka, earthquake.

Recommended by S.I. Sherman 31 March 2010

Saltykov V.A., Kravchenko N.M. Parameters of Kamchatka seismicity in 2008 // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1. № 2. P. 186–196.

ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ В 2008 ГОДУ

В. А. Салтыков, Н. М. Кравченко

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пишпа, 9, Россия

Аннотация: В работе представлена общая характеристика сейсмичности Камчатки в 2008 г. и построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности. В комплекс рассматриваемых характеристик входят общая выделяющаяся сейсмическая энергия, активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL -, ΔS - и Z -функция, кластеризация землетрясений. Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного координатами $\varphi=50.5^\circ$ с.ш. и 56.5° с.ш., $\lambda=156^\circ$ в.д. и 167° в.д., глубиной от 0 до 300 км. Рассматривался региональный каталог землетрясений с энергетическим классом не менее 8.5 по классификации С.А. Федотова. Оценена общая выделяющаяся сейсмическая энергия в 2008 г. Согласно функции распределения годовой сейсмической энергии, ее значение близко к медианному (рис. 1). Более 2/3 всей выделившейся в 2008 г. сейсмической энергии приходится на три наиболее сильных землетрясения этого года. Число группированных землетрясений (афтершоков и роев) в 2008 г. составило 5 % от общего количества сейсмических событий. Расположение эпицентров наиболее сильных землетрясений ($M_w \geq 5.9$) и группированных сейсмических событий, произошедших в 2008 г., показано на рис. 2. Параметры этих событий приведены в таблице. Группируемые землетрясения из каталога удалены. Карта эпицентров независимых землетрясений показана на рис. 3. Определение наклона графика повторяемости γ и сейсмической активности A_{10} основано на повторяемости землетрясений как фундаментальном свойстве сейсмического процесса. Наклон графика повторяемости рассчитывается исходя из непрерывного экспоненциального распределения землетрясений по классам. Использование γ связано с наблюдаемым иногда уменьшением наклона графика повторяемости перед сильными событиями. Активность A_{10} рассчитывается из числа землетрясений N и наклона графика повторяемости γ . Рассчитаны средние по исследуемому району значения наклона графика повторяемости γ и сейсмической активности A_{10} , согласно которым 2008 г. не является аномальным. Построено площадное распределение γ в 2008 г. (рис. 4), которое позволяет выделить в южной части Камчатской сейсмоактивной зоны область пониженных значений γ . Карты нормированной вариации γ для 2007–2008 гг. и 2006–2008 гг. (рис. 5) подтверждают статистическую значимость уменьшения γ в течение последних трех лет в этой зоне. Построены карты сейсмической активности A_{10} для 2008 г., для сравнения – 1962–2008 гг. и карты относительных значений A_{10} , полученных на каталоге 2008 г. и многолетнем каталоге (рис. 6). В 2008 г. повышенные значения A_{10} наблюдались на юге Авачинского залива и на севере Камчатского залива, в северной акватории острова Беринга. Аномальное поведение параметров RTL , ΔS и кластеризация землетрясений могут иметь предвестниковый характер [Соболев, 1999]. Отрицательные значения RTL соответствуют сейсмическому затишью, увеличение площадей сейсмогенных разрывов ΔS – форшоковой активизации, появление кластеров может свидетельствовать о стягивании активности к месту будущего макроразрыва. В 2008 г. в сейсмоактивной зоне Камчатки были выделены три зоны сейсмического затишья по параметру RTL (рис. 7). Для расчетных точек с максимальными по модулю значениями параметра RTL (отмечены римскими цифрами на рис. 7) построены временные RTL -графики (рис. 8), которые позволяют оценить длительность аномалии и степень ее проявления. Составлена карта вариаций площадей сейсмогенных разрывов ΔS (рис. 9), согласно которой сейсмическая активизация в 2008 г. проявилась в основном на юге Камчатской сейсмоактивной зоны. Большая часть кластеров различной энергии 2008 г. также зафиксирована в южной части Камчатки (рис. 10). Северная цепочка кластеров приходится на границу развивающейся сейсмической аномалии по параметру RTL . Методика Z также ориентирована на выявление сейсмических затиший как временных аномалий в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей [Wyss, Habermann, 1988]. Методом Z -функция в 2008 г. была выделена зона уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз (оконтурена штриховой линией на рис. 11), частично перекрывающаяся с южной аномалией по параметру RTL . Согласно приведенному графику $Z(t)$, построенному для этой зоны для временного окна 12 месяцев, сейсмическое затишье статистически значимо (рис. 12). Следует отметить, что эпицентры трех наиболее сильных землетрясений 2008 г. приурочены к выделенным аномалиям сейсмических затиший (см. рис. 7, 11). Моменты землетрясений отмечены стрелками на соответствующих временных графиках (см. рис. 8, 12). Учитывая хорошее пространственно-временное соответствие ряда признаков, имеющих потенциально предвестниковый характер, можно сделать заключение о повышенной сейсмической опасности южной части Камчатки и района Камчатского залива.

Ключевые слова: сейсмичность, мониторинг, Камчатка, землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Единый сейсмический процесс можно условно разделить на три составляющие: сильные землетрясения, группированные события (рои и афтершоковые последовательности) и фоновая сейсмичность. Традиционно сильным землетрясениям уделяется повышенное внимание сейсмологов. Тем не менее данные о слабых землетрясениях также представляют интерес.

В работе охарактеризован комплекс параметров сейсмичности Камчатки 2008 г. Некоторые из них являются каноническими (активность A_{10} и наклон графика повторяемости γ), другие появились при разработке различных прогностических методик (RTL , ΔS , кластеризация землетрясений, « Z -функция»). При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.emsd.ru>). Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного координатами $\varphi=50.5^\circ$

с.ш. и 56.5° с.ш., $\lambda=156.0^\circ$ в.д. и 167.0° в.д., глубиной 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 $K=8.5$ 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 (рис. 1), построенной по всему интервалу детальных наблюдений 1962–2008 гг., сейсмическая энергия, выделившаяся в течение 2008 г., близка к медианному значению, ее вероятность составляет 0.47 ± 0.07 . 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 ($M_w=6.2$), 12 сентября ($M_w=5.9$) и 18 сентября ($M_w=5.9$). Указанные магнитуды взяты на сайте Геологической службы США (U.S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov>).

Землетрясение 24 июля ($M_w=6.2$) сопровождалось небольшой афтершоковой последовательностью, состоящей из десяти землетрясений с энергетическими классами $K_S = 8.6-10.7$. Роевая активность в 2008 г. также была незначительной. Наиболее представительный рой из 18 землетрясений

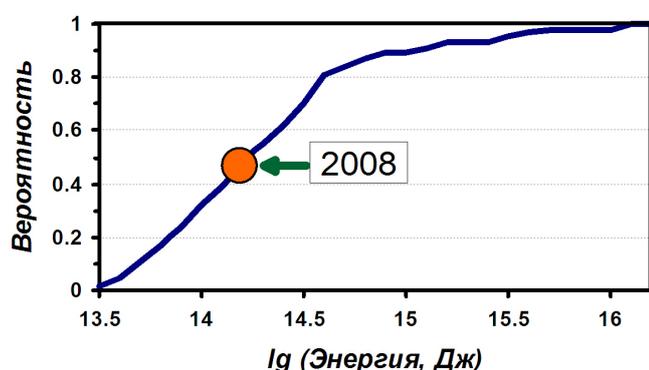


Рис. 1. Функция распределения годовой сейсмической энергии, выделившейся при камчатских землетрясениях в 1962–2008 гг. Кружком отмечено значение, соответствующее сейсмической энергии, выделившейся в течение 2008 г.

Fig. 1. Distribution of annual seismic energy released at Kamchatka from 1962 to 2008. A circle shows the value of seismic energy released during 2008.

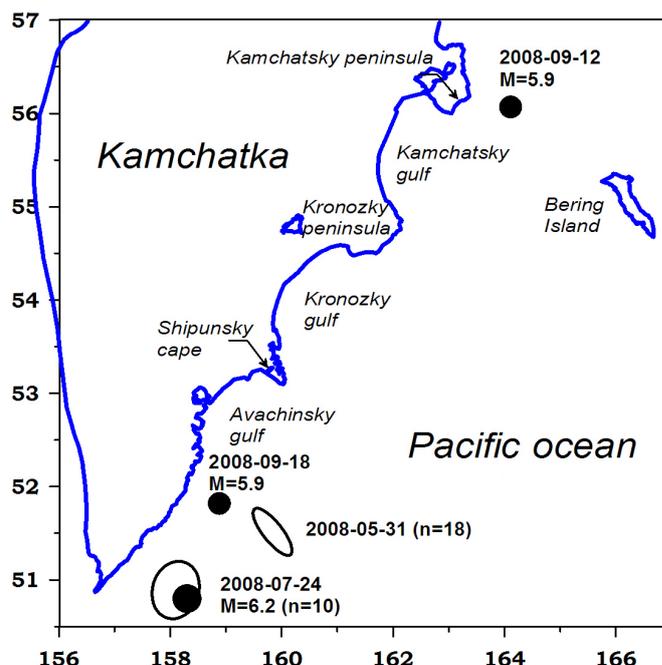


Рис. 2. Схема расположения эпицентров наиболее сильных землетрясений, афтершоковой последовательности и роя, произошедших в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2008 г. Показаны 2σ -эллипсы группированных событий, даты наиболее сильных землетрясений и количество землетрясений в группе.

Fig. 2. Large ($M \geq 5.9$) earthquakes, aftershocks and swarm at Kamchatka in 2008. 2σ -ellipses of grouped seismic events, dates of the strongest earthquakes, and quantities of earthquakes in groups are shown on the map.

с энергетическими классами $K_S = 8.5-11.8$ произошел в мае – июле на юге сейсмоактивной зоны Камчатки.

Эпицентры наиболее сильных землетрясений 2008 г., 2σ -эллипсы афтершоковой последовательности и роя отмечены на рис. 2. Параметры этих сейсмических событий представлены также в таблице.

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. 3.

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ является параметром, характеризующим распределение землетрясений по магнитуде M (или энергетическому классу K) (закон Гутенберга-Рихтера). Его использование связано, в частности, с наблюдаемым ино-

Сильные землетрясения с магнитудой $M \geq 5.9$, афтершоковые последовательности и рои, произошедшие в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2008 г.

Strong earthquakes ($M \geq 5.9$), aftershocks and swarm which occurred at the Kamchatka seismic zone in 2008

дата	Параметры главного события					lg (E, Дж)	Δt , дни	Тип группы
	K_s	M_w	φ , °N	λ , °E	h , км			
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	-	-

Примечание: K_s – энергетический класс землетрясения по классификации С.А. Федотова; lg (E, Дж) – логарифм суммарной выделившейся энергии; Δt – время, в течение которого произошло 75 % землетрясений группы.

Note: K_s – energy class of earthquake as per the Fedotov's classification; lg (E, J) – logarithm of the total released energy; Δt – total duration of the period within which 75 percent of earthquakes occurred in the given group.

гда уменьшением наклона графика повторяемости перед сильными событиями [Завьялов, 1984; Моги, 1988].

Наклон графика повторяемости γ вычисляется 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:

$$\sigma_\gamma = \frac{\gamma}{\sqrt{N}} \text{ [Куллдорф, 1966].}$$

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 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. Тем не менее интерес представляют карты значений наклона графика повторяемости γ , демонстрирующие пространственные особенности его поведения. Карты γ построены при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км (рис. 4). Отмечается региональная особенность в распределении γ : его повышенные значения соответствуют продолжению Императорского хребта, уходящему под Камчатку в районе Кроноцкого полуострова. 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 .

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

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

где γ_i – значения наклона графика повторяемости для двух временных отрезков, σ_i – среднеквадратичные отклонения γ на этих же отрезках.

На рис. 5 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 среднемноголетнего значения на юге сейсмоактивной зоны Камчатки.

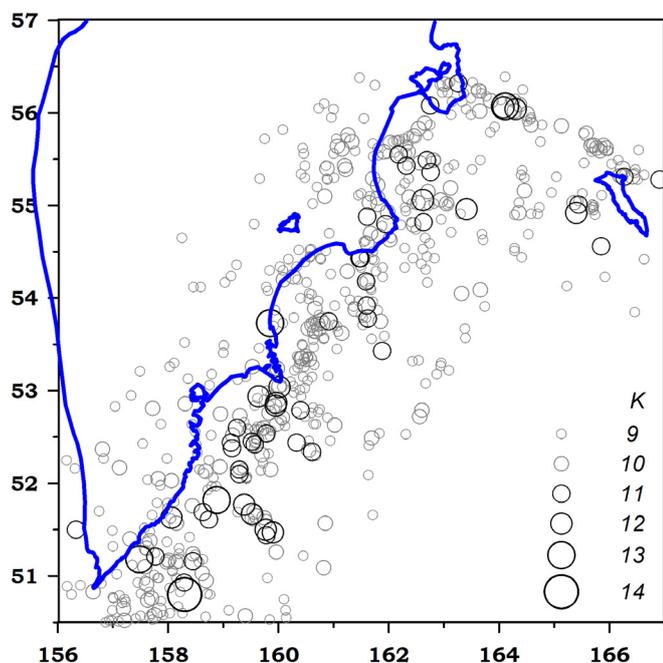


Рис. 3. Карта эпицентров независимых землетрясений 2008 г. 9–14-го энергетических классов.

Fig. 3. Background seismicity of Kamchatka in 2008. Earthquakes of energy classes from 9 to 14 are shown on the map.

$K \geq 8.5$ $H < 100$ km clear (by Smirnov) $R = 150$ km
Gamma 2008 **Gamma 1962-2008**

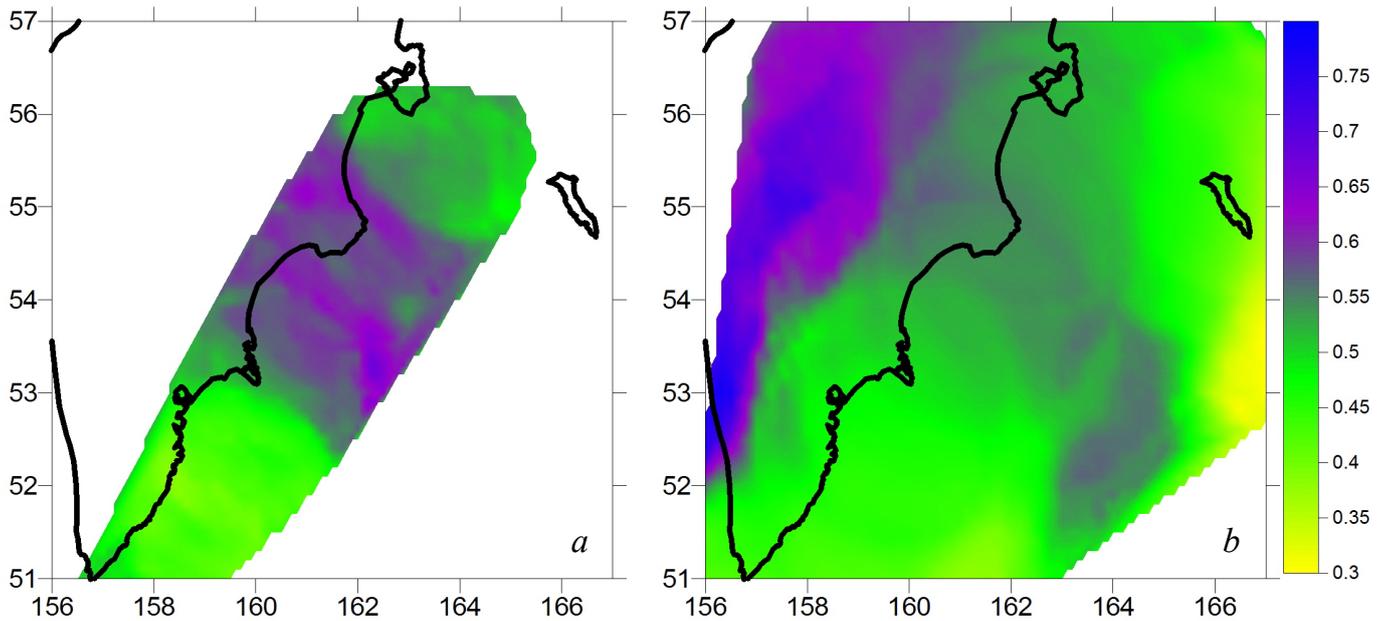
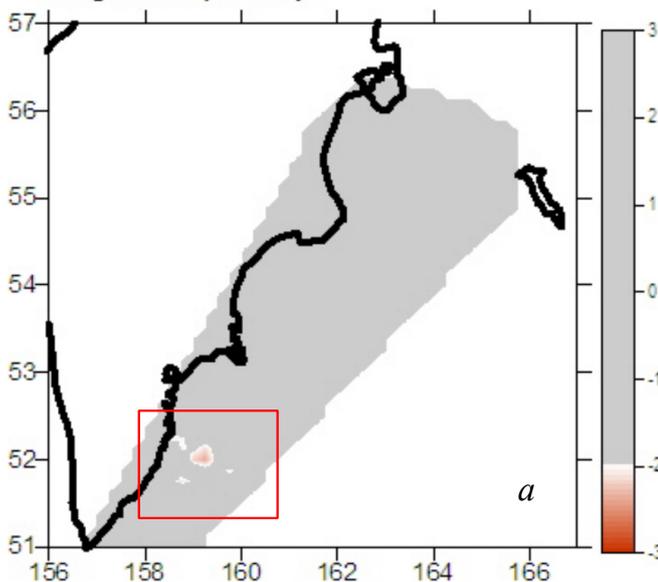


Рис. 4. Средние значения наклона графика повторяемости γ в 2008 г. (a) и 1962–2008 гг. (b). Карты построены при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км.

Fig. 4. Mean slopes of recurrence curves γ for 2008 (a) and 1962–2008 (b). The maps are constructed by scanning the area under study in cylindrical elementary volumes to depths up to 100 km, radiuses of 150 km.

(Gamma 2007-2008 - Gamma 1962-2008) / std
Z-gamma (N=100)



(Gamma 2006-2008 - Gamma 1962-2008) / std
Z-gamma (N=100)

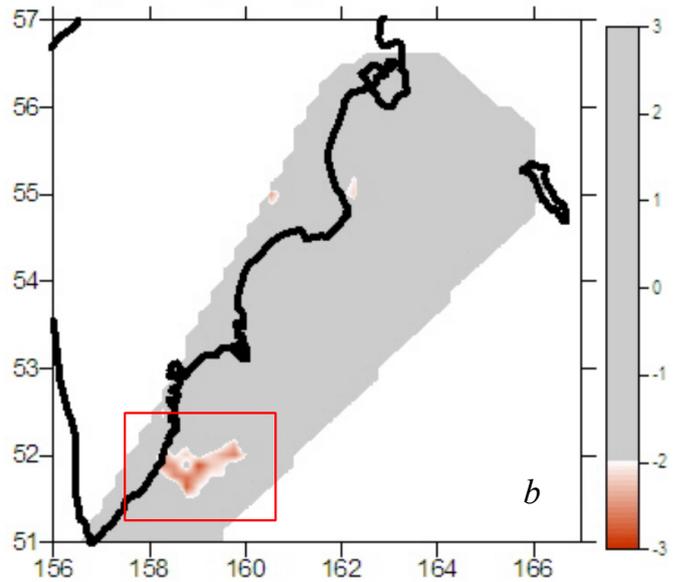


Рис. 5. Значения нормированной вариации γ относительно среднееголетнего уровня в 2007–2008 гг. (a) и 2006–2008 гг. (b). Карты построены при сканировании района элементарными ячейками переменного радиуса с фиксированным количеством попавших в них землетрясений ($N = 100$).

Fig. 5. Maps of normalized variation of γ for 2007–2008 (a) and 2006–2008 (b). Variations are given relative to mean long-term levels. The maps are constructed by scanning the area under study in elementary space cells of variable radiuses with a fixed number of earthquakes in such cells ($N = 100$).

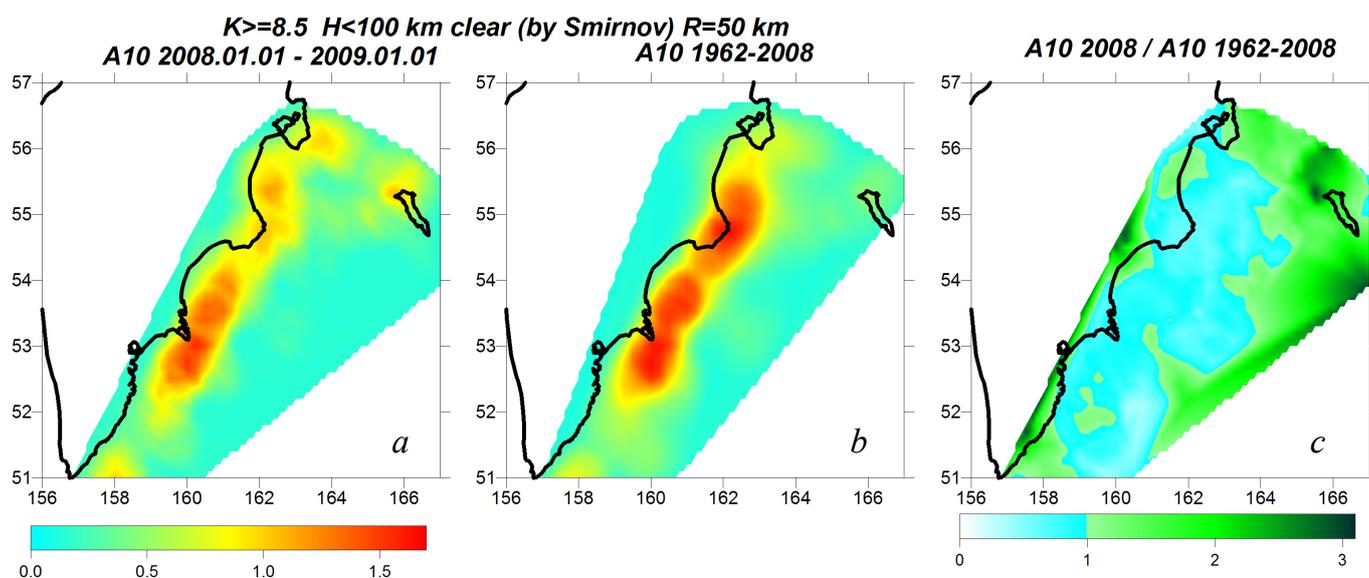


Рис. 6. Средние значения сейсмической активности A_{10} в 2008 г. (а) и 1962–2008 гг. (б). Относительная сейсмическая активность A_{10} в 2008 г. по сравнению со средней многолетней активностью (с). Карты построены при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 50 км.

Fig. 6. Mean values of seismic activity A_{10} in 2008 (a) and 1962–2008 (b). Relative seismic activity of 2008 is compared with the average long-term activity (c). The maps are constructed by scanning the area under study in cylindrical elementary volumes to depths up to 100 km, radiuses of 50 km.

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 2008 г. составила 0.262 ± 0.008 при среднемноголетнем значении 0.282 ± 0.001 , т.е. 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.

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. 6. Как следует из сравнения карт, построенных для 2008 г. и 1962–2008 гг., распределение активности A_{10} в 2008 г. в основном соответствует среднемноголетнему распределению. Визуально область повышенной сейсмической активности проявляется в северной акватории острова Беринга. Существование этой области подтверждается построением карты относительных значений A_{10} , полученных на каталоге за 2008 г. и многолетнем (47 лет) каталоге. Повышенные относительные значения активности A_{10} наблюдались также в районе Камчатского полуост-

рова, 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.

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 [Соболев, Пономарев, 2003]. Согласно модели авторов этой методики [Sobolev, Tyurkin, 1997; Sobolev, 2000], 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 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: эпицентральной R , временной T и учитывающей размер очага землетрясения L :

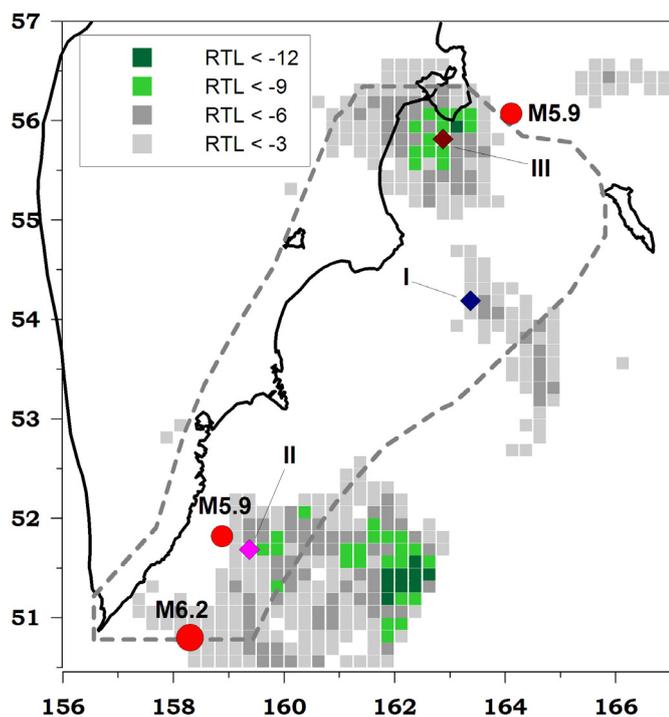


Рис. 7. Минимальные значения RTL -параметра в 2008 г. Римскими цифрами отмечены реперные точки, пунктиром – область надежного определения параметра RTL .

Fig. 7. Minimum values of RTL parameter for 2008. Roman numerals show reference points of seismic anomalies. A dashed line shows the area of reliable definition of RTL parameter.

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

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

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

где r_i , t_i – соответственно, эпицентральные расстояния и время 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, 1985]; $r_0 = 50$ 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. Параметр RTL представляет собой произведение R -, T - и L -функций, предварительно нормированных на соответствующие среднеквадратичные отклонения. В расчете параметра RTL участвуют сейсмические события, удаленные во времени не более чем на 2 года от расчетной даты, для которых расстояние от эпицентра до расчетной точки не превышает 100 км, глубины гипоцентров соответствуют диапазону 30–100 км.

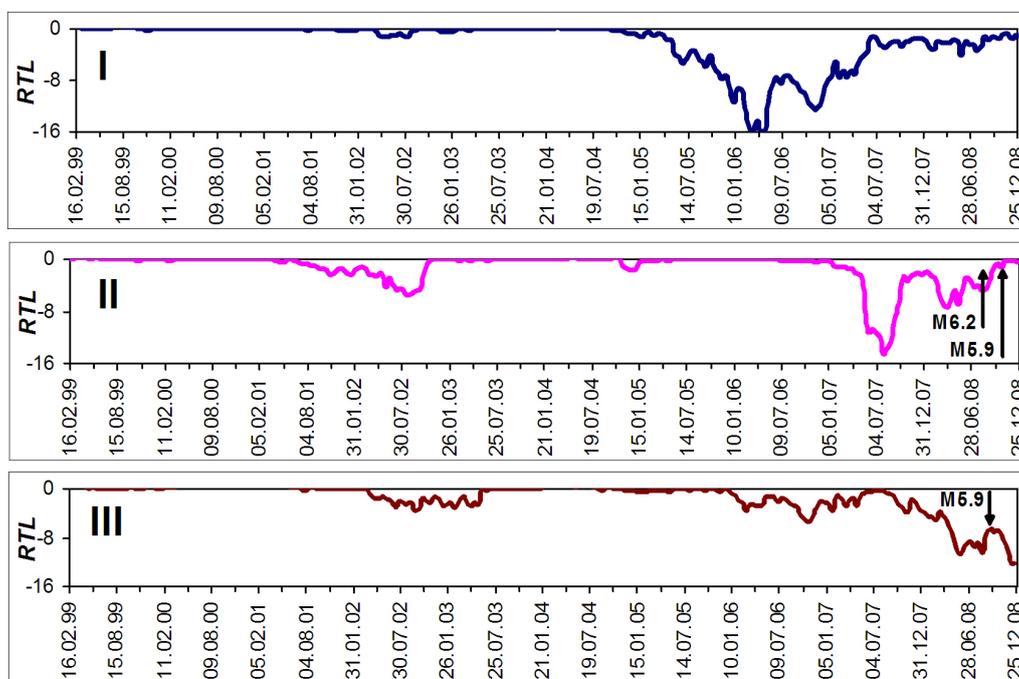


Рис. 8. Временной ход RTL -параметра в реперных точках (рис. 7) в течение последних 10 лет. Стрелками отмечены моменты землетрясений, приходящихся на границы соответствующих аномальных зон.

Fig. 8. RTL parameter versus time at reference points (see Fig. 7) during the last decade. Arrows show timing of earthquakes which occurred at boundaries of corresponding anomalous zones.

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. 7 представлена карта минимальных значений параметра RTL , наблюдававшихся в сейсмоактивной области Камчатки в течение 2008 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.

Как следует из рис. 7, 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 на рис. 7) каждой из этих зон построены временные RTL -графики (рис. 8), 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 2 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 г. На границу этой аномальной области в 2008 г. приходятся эпицентры землетрясений с магнитудами $M_w=6.2$ и $M_w=5.9$ (см. рис. 7). Моменты возникновения землетрясений отмечены стрелками на графике временного хода параметра RTL (рис. 8, II). Северная аномалия, расположенная в Камчатском заливе, нарастала в течение всего 2008 г. На границу этой зоны приходится эпицентр землетрясения с $M_w=5.9$. Землетрясение произошло при выходе параметра RTL из локального минимума (рис. 8, III).

На следующем за RTL -аномалией этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии должна проявиться форшоковая активизация согласно методике [Sobolev, 2000]. 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 среднееголетним 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

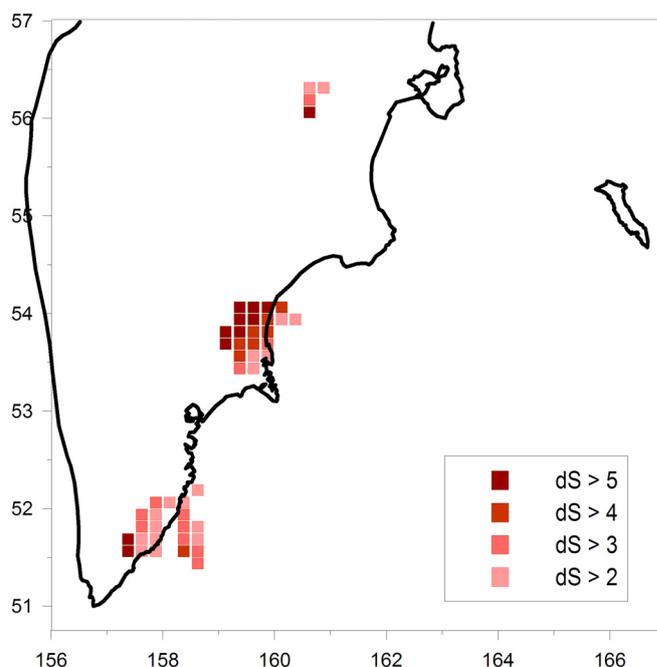


Рис. 9. Значения ΔS -параметра, рассчитанные на декабрь 2008 г.

Fig. 9. Values of parameter ΔS calculated as of December 2008.

наблюдений в данной пространственной области.

На рис. 9 представлена карта максимальных вариаций площади сейсмогенных разрывов ΔS в течение 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 [Sobolev, Tyupkin, 1997]. 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 [Sobolev, 2000], является возникновение кластеров землетрясений. Кластером считается появление двух или более землетрясений, если расстояние между их гипоцентрами меньше критического $R_{cr} = 3l_i + \varepsilon$, где l_i – размер сейсмогенного разрыва в км ($\lg l_i = 0.244K_i - 2.266$), 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 по-

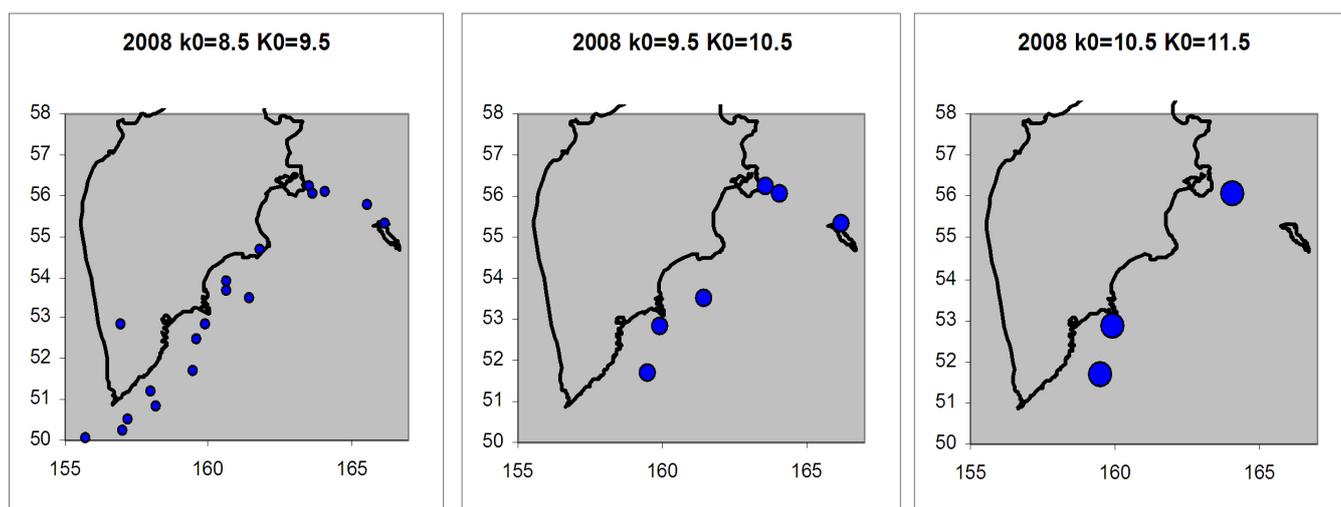


Рис. 10. Эпицентры главных событий кластеров 2008 г. при различных значениях параметров k_0 и K_0 . k_0 – минимальный класс землетрясений в кластере (первое землетрясение), K_0 – минимальный класс основного события в кластере (последнее землетрясение).

Fig. 10. Epicentres of major events in clusters which occurred in 2008 with various parameters k_0 (minimum energy class of earthquakes in the cluster; first earthquake) and K_0 (maximum energy class of the major earthquake in the cluster; last earthquake).

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

На рис. 10 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 от 50° с.ш. до 54° с.ш., 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 .

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 М. Висса и Р. Хабермана [Habermann, 1988; Wiemer, Wyss, 1994; Wyss, Habermann, 1988].

Выделение в пространстве объема с аномально низким уровнем сейсмичности осуществляется следующим образом. Исследуемый район покрывается сеткой с фиксированным шагом. Для каждого узла сетки в заданный момент времени вычисляется функция

$$Z = \frac{(R_2 - R_1)}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}},$$

где R_1 , R_2 – средние величины скорости потока землетрясений (количество землетрясений во временном окне 30 дней) на двух временных участках (один – длительностью не менее года и привязан-

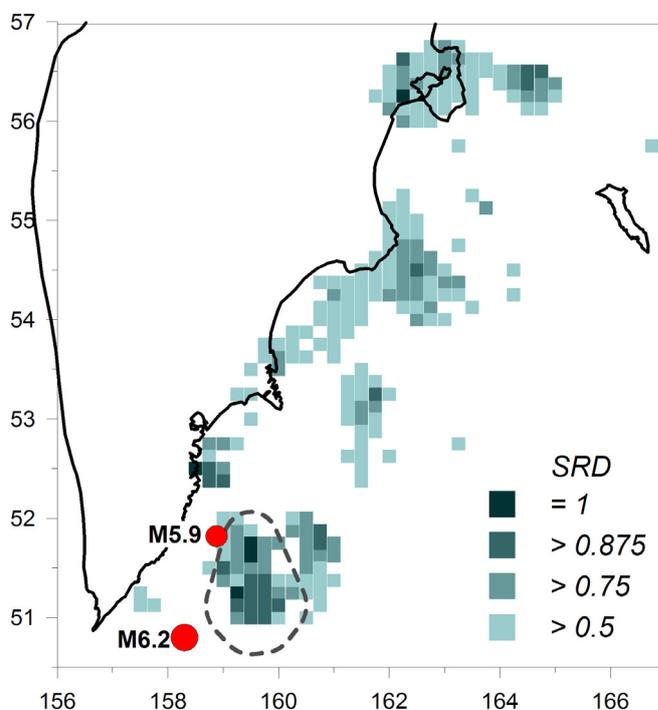


Рис. 11. Максимальные значения SRD , рассчитанные в 2008 г. Область уменьшения интенсивности сейсмического потока в восемь раз околнурена штриховой линией.

Fig. 11. Largest values of SRD parameter for 2008. A dashed line shows the area wherein seismicity rates decreased by a factor of 8.

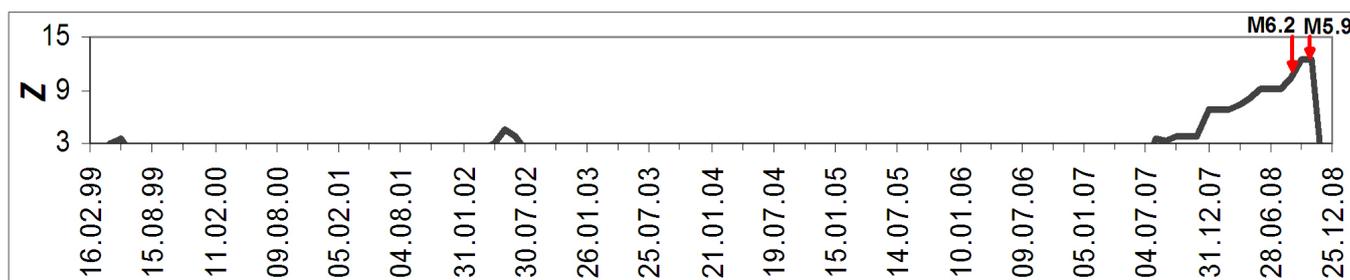


Рис. 12. Зависимость $Z(t)$, рассчитанная для области уменьшения интенсивности сейсмического потока в восемь раз (рис. 11) в скользящем окне шириной 12 месяцев. Стрелками отмечены моменты землетрясений, приходящихся на границу аномалии.

Fig. 12. Z function versus time for the Z anomaly (see Fig. 11) in a moving window of 12 months. Arrows show timing of earthquakes which occurred at the boundary of the anomalous area.

ный к расчетной дате, другой включает в себя все остальное время), σ – стандартные отклонения R на этих участках. Для каждого узла сетки рассматриваются землетрясения с глубиной до 70 км в объеме цилиндра переменного радиуса (от 30 до 55 км). Для всех точек с $Z > 3$ (что соответствует не менее чем 99 % надежности выделения сейсмического затишья) вычисляется величина уменьшения скорости потока землетрясений $SRD = 1 - \frac{R_1}{R_2}$.

$$SRD = 1 - \frac{R_1}{R_2}$$

Абсолютному сейсмическому затишью соответствует $SRD = 1$, уменьшению уровня сейсмичности в 8 раз – $SRD = 0.875$, уменьшению в 4 раза – $SRD = 0.75$, уменьшению в 2 раза – $SRD = 0.5$. «Элементарные» цилиндрические объемы с $SRD = 1$ или $SRD \geq 0.875$ объединяются по принципу «соседства» и определяют область сейсмического затишья.

Количественно аномалия сейсмического затишья характеризуется значениями Z и SRD , рассчитанными для каталога землетрясений, приходящихся на выделенную область, и длительностью затишья, определяемого величиной временного окна dT . Z и SRD в этом случае вычисляются по формулам:

$$Z = \frac{(R_{all} - R_{dT})}{\sqrt{\sigma_{all}^2 + \sigma_{dT}^2}} \quad \text{и} \quad SRD = 1 - \frac{R_{dT}}{R_{all}}$$

где R_{all} – средняя скорость потока землетрясений для данной аномальной области за все время наблюдений, R_{dT} – средняя скорость во временном окне dT , σ_{all} и σ_{dT} – стандартные отклонения.

Подробное описание этой методики и результаты ее применения к анализу камчатской сейсмичности опубликованы в работах [Салтыков и др., 1998; Saltykov, Kugaenko, 2000].

На рис. 11 показана карта максимальных значений SRD , рассчитанных в 2008 г. Штриховой линией отмечена область уменьшения скорости сейсмического потока в восемь раз по сравнению с фоновой. На рис. 12 приведен график $Z(t)$, построенный для выделенной зоны для временного окна $dT = 12$ месяцев, согласно которому сейсмическое затишье статистически значимо. Положение сейсмического

затишья, определенного 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. 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе регионального каталога камчатских землетрясений построены площадные распределения параметров фоновой сейсмичности в 2008 г. В комплекс рассматриваемых характеристик входят активность A_{10} , наклон графика повторяемости γ , параметры методик RTL (вместе с ΔS и кластеризацией) 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 г.).

Несмотря на различие методик мониторинга, получены результаты, 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 [Fedotov et al., 2007]. Представленные материалы могут быть полезными при рассмотрении и оценке развития сейсмической обстановки на Камчатке Российским экспертным советом по прогнозу землетрясений и другими организациями.

ЛИТЕРАТУРА

- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Сейсмологические наблюдения на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27.
- Завьялов А.Д. Наклоны графика повторяемости как предвестник сильных землетрясений на Камчатке // Прогноз землетрясений. Вып. 5. – Душанбе–Москва: Дониш, 1984. – С. 173–184.
- Кулльдорф Г. Вопросы теории оценивания. – М.: Наука, 1966. – 176 с.
- Моги К. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
- 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.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М. Сейсмические затишья и активизации, предшествовавшие Кроноцкому землетрясению // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. – Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. – С. 55–67.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 116 с.
- Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1965. – V. 43. – P. 237–239.
- Fedotov S.A., Solomatin A.V., Chernyshev S.D. A long-term earthquake forecast for the Kuril-Kamchatka Island Arc for the period 2006–2011 and a successful forecast of the $M_s=8.2$ Middle Kuril Earthquake on November 15, 2006 // Journal of Volcanology and Seismology. – 2007. – V. 1, № 3. – P. 143–163.
- Habermann R.E. Precursory seismic quiescence: past, present and future // Pure and Applied Geophysics. – 1988. – V. 126. – P. 279–318.
- Saltykov V.A., Kugaenko Yu.A. Seismic quiescences before two strong earthquakes on Kamchatka, 1996 // Journal of Volcanology and Seismology. – 2000. – V. 22, № 1. – P. 87–98.
- Sobolev G.A. Precursory phases of large Kamchatkan Earthquakes // Journal of Volcanology and Seismology. – 2000. – V. 21, № 4–5. – P. 497–509.
- Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S. Low-seismicity Precursors of Large Earthquakes in Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. – 1997. – V. 18, № 4. – P. 433–446.
- Wiemer S., Wyss M. Seismic quiescence before the Landers ($M=7.5$) and Big Bear ($M=6.5$) 1992 earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – V. 84, № 3. – P. 900–916.
- Wyss M., Habermann R.E. Precursory quiescence // Pure and Applied Geophysics. – 1988. – V. 126. – P. 319–332.



Салтыков Вадим Александрович, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией Камчатский филиал Геофизической службы РАН
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9
Тел. (415-2) 431813; e-mail: salt@emsd.ru



Saltykov, Vadim A., Candidate of Physics and Mathematics, Head of Laboratory Kamchatka Branch of Geophysical Survey RAS
683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd, 9, Russia
Tel. +7(415-2)431813; e-mail: salt@emsd.ru



Кравченко Надежда Михайловна, н. с. Камчатский филиал Геофизической службы РАН
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9
Тел. (415-2) 431827; e-mail: hope_k@emsd.ru

Kravchenko, Nadezhda M., Researcher Kamchatka Branch of Geophysical Survey, RAS
683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd, 9, Russia
Tel. +7(415-2)431827; e-mail: hope_k@emsd.ru