

МОНИТОРИНГ ВАРИАЦИЙ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ: МЕТОДИКА И ПРИМЕРЫ

Салтыков В.А., Коновалова А.А.

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

Введение

Величина наклона графика повторяемости γ (при использовании магнитудной шкалы – b-value) отражает распределение числа землетрясений по их энергии и широко используется для характеристики сейсмического процесса. Этот параметр является объектом пристального внимания сейсмологов и его исследованию посвящено множество работ (например, обзор в [2]). Одним из интересных для нас свойств наклона графика повторяемости является его непостоянство во времени. Более того, как отмечается в ряде работ, временные вариации (аномальное уменьшение наклона) могут являться предвестником готовящегося сильного землетрясения [2, 6]. Поэтому необходима организация мониторинга этого параметра, что позволит при наборе определенной статистики сделать вывод о применимости γ для контроля за сейсмической обстановкой на Камчатке.

Данная работа направлена на обнаружение в пространстве зон, где наблюдались аномалии наклона графика повторяемости по данным Камчатского регионального каталога 1962-2008 гг.

Методика

В предлагаемом подходе приоритетной является статистическая значимость изменения γ , а не его абсолютная величина.

Исходя из экспоненциального распределения землетрясений по энергетическому классу K (закон Гуттенберга-Рихтера [11]), величина наклона графика повторяемости рассчитывалась по методу наибольшего правдоподобия [10]:

$$\gamma = \log_{10} e \cdot \frac{I}{\sum \frac{K_i}{N} - K_0},$$

K_i – энергетический класс i -го из N землетрясений, определенный по шкале С.А. Федотова $K_s^{\Phi 68}$ [9], K_0 – минимальный энергетический класс, соответствующий нижнему уровню надежной регистрации землетрясений камчатского регионального каталога [1].

Среднеквадратичная ошибка определения γ рассчитывалась по формуле [4]:

$$y_{\gamma} = \frac{\gamma}{\sqrt{N}}.$$

Временные изменения параметра γ представлялись и анализировались в виде безразмерной величины Z_{γ} , являющейся мерой статистической значимости отклонений текущих значений параметра γ от его долговременных (фоновых) значений:

$$Z_{\gamma} = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)}{\sqrt{y_2^2 + y_1^2}},$$

γ_1 и γ_2 – значения наклонов графика повторяемости землетрясений за сравниваемые интервалы времени;

σ_1 и σ_2 – значения среднеквадратичного отклонения оценок γ_1 и γ_2 .

В работе использовались данные регионального каталога сейсмичности Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.emsd.ru>) за период 1962-2008 гг. Для исключения ошибок при оценке параметров фоновой сейсмичности, вносимых афтершоками [3], использовался очищенный от афтершоковых последовательностей каталог землетрясений (т.е. каталог независимых землетрясений, характеризующих фоновую сейсмичность). Выделение афтершоковых групп из каталога осуществлялось по методике Молчана-Дмитриевой [7] с использованием программы В.Б. Смирнова.

Предлагаемая методика мониторинга вариаций наклона графика повторяемости землетрясений предполагает сканирование сейсмоактивной области с определенным шагом в

пространстве и во времени, расчет величины Z_γ , построение карт Z_γ при различных параметрах сканирования и выявление пространственно-временных зон с аномальным поведением γ .

Пространственное сканирование проводилось цилиндрическими объемами с радиусом $R \leq 100$ км для площади $51^\circ - 57^\circ$ с.ш. и $156^\circ - 167^\circ$ в.д. Временной шаг равен 1 году, за шаг сканирования сейсмоактивной области Камчатки приняты $\Delta\varphi = 0.125^\circ$ с.ш и $\Delta\lambda = 0.25^\circ$ в.д. Глубина используемых землетрясений ограничена 100 км. Радиус R является переменным, так как фиксированным является число используемых землетрясений N . Число землетрясений, попадающих в элементарный цилиндрический объем, менялось в различных вариантах счета от 100 до 800.

Среднеквадратичная ошибка в определении наклона графика повторяемости обратно пропорциональна квадратному корню из числа используемых для его определения землетрясений, поэтому для уменьшения ошибки необходимо увеличивать объем выборки. С другой стороны, увеличение выборки требует увеличения пространственно-временного размера используемой области, т.е. к ухудшению разрешающей способности. В связи с этим, на настоящей стадии исследования проведены расчеты с вариациями исходных параметров в широком диапазоне.

Значения параметра γ рассчитывались за временной интервал T_1 длительностью 1, 2, 3, 4, 6, 8 и 11 лет. Для расчета фоновых значений использовались временные интервалы T_2 : 1) 1962-2008 гг., и 2) удвоенный интервал T_1 , предшествующий T_1 .

Наиболее очевидным вариантом является сравнение текущих значений наклона графика повторяемости со средними значениями за все время наблюдений в данной пространственной области (1962-2008 гг.). Однако, возможен вариант, что резкое уменьшение γ начинается с больших значений. При этом значение наклона еще не упало ниже фонового уровня, и тогда сравнение с фоном не будет результативным. Для выявления таких случаев, сравниваются текущие значения наклона графика повторяемости со значениями в предшествующий, относительно непродолжительный временной интервал (в нашем случае используется удвоенный временной интервал).

Статистически значимые изменения параметра γ относительно фонового значения считаем аномалиями, а область, в которой они наблюдаются, аномальной областью. Представляют интерес аномалии при $Z_\gamma \leq -3$, поскольку при таких значениях Z_γ можно ожидать статистической значимости уменьшения γ не хуже $\alpha = 0.01$.

Первые результаты

В настоящее время организован мониторинг изменения величины наклона графика повторяемости землетрясений во времени для сейсмоактивной области Камчатки.

Ретроспективно выявлены аномальные значения γ , которые могут быть связаны с подготовкой сильных землетрясений.

Статистически значимое уменьшение наклона графика повторяемости проявляется в течение ограниченного времени и имеет пространственную локальность. Выявленные статистически значимые аномалии ($\alpha \leq 0.01$) хорошо согласуются по времени и распределению в пространстве с сильными региональными землетрясениями. При ретроспективном анализе обнаружено, что после этих событий интенсивность аномалий заметно ослабевает, спустя некоторое время в этой области значения γ становятся сопоставимы с фоновыми для исследуемого района.

На рисунке приведен пример таких карт параметра Z_γ , где расчетные временные интервалы демонстрируют аномалии перед землетрясениями 1990-х годов, включая сильнейшее землетрясение 05.12.1997 Mw(HRV) = 7.8. Окружностями выделены области, землетрясения которой сформировали максимальные отклонения параметра γ от фоновых значений. Следует отметить, что аномалии занимают большую часть этих областей, а значения параметра Z_γ достигают -5, что свидетельствует об интенсивности проявления этой особенности в сейсмическом режиме.

В частности, перед землетрясением 05.12.1997 Mw(HRV) = 7.8 ($\varphi = 54.64^\circ$ с.ш.; $\lambda = 162.55^\circ$ в.д.) [5] наблюдалась зона аномально низких значений наклона графика повторяемости на протяжении более 10 лет (рис.). Следует отметить, что аномалия пространственно расположена в пределах очаговой области землетрясения, а ее размер сопоставим с очагом.

Надо отметить, что землетрясение 01.01.1996 с Mw(HRV) = 6.6, перед которым аномалии не выделено, является проявлением коровой сейсмичности на полуострове, где сейсмическая активность в рассматриваемом нами диапазоне невелика, поэтому разрешающая способность методики для этого района неудовлетворительна.

Полученные к настоящему времени результаты не отрицают перспектив использования методики. Ближайшей задачей ставится: на основе полного ретроспективного анализа по данным

1962-2008 гг. оценить эффективность данной методики, на основании чего будет сделан вывод о ее применимости в режиме реального времени.

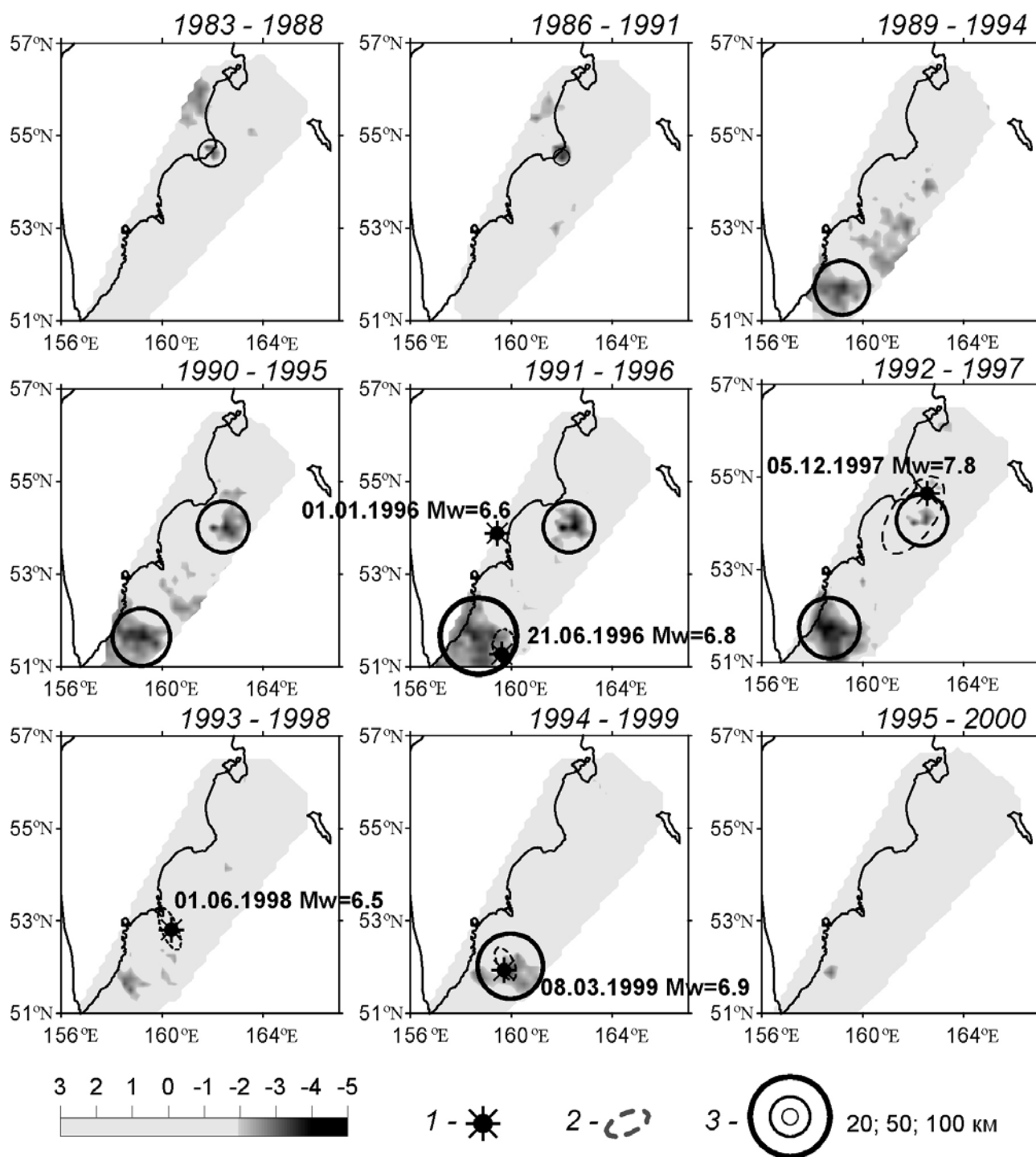


Рис. Карты аномалий, рассчитанные в скользящем временном окне шириной 6 лет при $N = 200$. Фоновые значения рассчитывались за 12 предыдущих лет. Цветовой шкале соответствуют значения Z_γ , характеризующие статистическую значимость и глубину аномалии.

- 1 – эпицентры землетрясений;
- 2 – области их афтершоковых последовательностей;
- 3 – территории, землетрясения которых сформировали максимальные отклонения параметра γ от фоновых значений.

Заключение

Организован мониторинг изменения величины наклона графика повторяемости землетрясений во времени для сейсмоактивной области Камчатки.

Данная методика позволяет проследивать локальные временные вариации наклона графика повторяемости относительно фоновых значений в местах подготовки сильных землетрясений Камчатки.

Методика достаточно инерционна, поэтому расчеты целесообразно проводить ежегодно, в крайнем случае, раз в полгода. В случае снижения уровня надежной регистрации землетрясений оперативность метода может улучшиться.

Методика внедрена в деятельность лаборатории сейсмического мониторинга КФ ГС РАН и используется при комплексном анализе сейсмичности Камчатки на основе регионального каталога [8]. Заключение передается Камчатскому филиалу экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 11-42.
2. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 2006. 254 с.
3. Коновалова А.А., Салтыков В.А. Различия в наклоне графика повторяемости независимых землетрясений и афтершоковых последовательностей // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2008 №1. Вып. №11. С. 74-81.
4. Куллдорф Г. Вопросы теории оценивания. М.: Наука, 1966. 176 с.
5. Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Левин В.Е., Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М., Гусева Е.М., Салтыков В.А., Зобин В.М. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w = 7.8$, $I_0 = 8$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 251-271.
6. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
7. 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.
8. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Комплексный анализ сейсмичности Камчатки 2005-2007 гг. на основе регионального каталога // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 53-63.
9. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
10. Aki K. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits // Bull. Earthquake Res. Ins. 1965. Vol.43. Pp.237-23.
11. Gutenberg B., Richter C. F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton, 1954. 310 p.