

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОИСКА ИЗМЕНЕНИЙ В
СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ С
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КЛАССОМ $K \geq 14$**

Павлов А.В.

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН с. Паратунка,
pavlov@ikir.ru*

При теоретико-вероятностном подходе каталог землетрясений можно представить в виде вероятностного пространства трех математических объектов, а именно: Ω – пространство элементарных событий, \mathcal{F} – множество подмножеств случайных событий, P – вероятности этих событий [1]. При этом каждое землетрясение рассматривается как единичный исход ω_i в пространстве Ω , мощность которого за рассматриваемый период задается числом событий каталога. В свою очередь, каждый исход ω_i определяется системой случайных непрерывных величин: широтой φ_i , долготой λ_i , глубиной h_i , энергетическим классом $K_i = \lg E$ и временем t_i . Время единичного события как случайная величина из дальнейшего анализа в предлагаемой модели будет исключено. Составляя комбинации из случайных величин и фиксируя в заданных пределах другие, можно построить подмножества случайных событий в \mathcal{F} . Так как случайные величины φ_i , λ_i , h_i и K_i заключены в соответствующие интервалы между минимальными и максимальными значениями, то для пространства элементарных событий справедливо

$$\Omega = \{ \omega : \varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}; \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}; h_{min} \leq h \leq h_{max}; K_{min} \leq K \leq K_{max} \} \quad (1).$$

Максимальные и минимальные значения входящих в (1) случайных величин задаются геометрией реального сейсмического региона, а также его внутренними свойствами, определяющими энергетику события. Причем, в зависимости от поставленной задачи, в (1) можно варьировать пределы рассматриваемых интервалов Δ_j , уменьшая или увеличивая их границы, изменяя общее число событий множества, образующих полную группу. Чтобы перейти от идеализированного вероятностного пространства к реальному эксперименту, необходимо границы пространства элементарных событий Ω и сами вероятности P определять из каталога землетрясений на основе его статистической обработки. Для непрерывных величин, определяющих сейсмическое событие, плотность распределения можно представить и как многомерную производную от $F(\varphi, \lambda, h, k)$, и как произведение условных и безусловных функций f следующим соотношением

$$f(\varphi, \lambda, h, k) = \partial^4 F(\varphi, \lambda, h, k) / \partial \varphi \partial \lambda \partial h \partial k = f(\varphi) \cdot f(\lambda | \varphi) \cdot f(h | \varphi, \lambda) \cdot f(k | \varphi, \lambda, h) \quad (2).$$

В (2) приняты обозначения: $f(\varphi)$ – безусловная плотность распределения сейсмических событий в зависимости от широты φ ; $f(\lambda | \varphi)$ – плотность распределения сейсмических событий по λ при условии, что их широта равна φ ; $f(h | \varphi, \lambda)$ – плотность распределения сейсмических событий по h при условии, что их широта и долгота соответственно равны φ и λ ; $f(k | \varphi, \lambda, h)$ – плотность распределения сейсмических событий по K при условии, что их долгота, широта и глубина соответственно равны λ , φ и h . Зная аналитический вид плотности распределения (2), можно вычислить вероятность того, что сейсмическое событие попадет в заданные интервалы: по широте $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$, долготе $\Delta\lambda_j = \lambda_j - \lambda_{j-1}$, глубине $\Delta h_m = h_m - h_{m-1}$ и по энергетическому классу $\Delta K = K_n - K_{n-1}$

$$P(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m, \Delta K_n) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \int_{h_1}^{h_2} dh \int_{k_1}^{k_2} f(k, \varphi, \lambda, h) dK = F(\varphi_i, \lambda_j, h_m, K_n) - F(\varphi_{i-1}, \lambda_{j-1}, h_{m-1}, K_{n-1}) =$$

$$P(\Delta\varphi_i) \times P(\Delta\lambda_j | \Delta\varphi_i) \times P(\Delta h_m | \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i) \times P(\Delta K_n | \Delta h_m, \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i) \quad (3),$$

где i, j, m и n – индексы, соответствующих интервалов случайных величин. Подобным образом вычисляются и безусловные законы распределения для всех случайных величин k, φ, λ, h , а также различные комбинации для условных законов распределения от этих переменных. Статистическая обработка каталога по формуле (3) дает возможность не только ответить на вопрос о вероятности возникновения сейсмического события в том или ином заданном интервале географических координат, глубины и энергетического класса, но и получить численные значения ступенчатой функции распределения $F(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta k)$. Экспериментально установлено, что с ростом числа событий n и уменьшением интервала относительная частота стремится к своему математическому аналогу P , а $F(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta k)$ – к устойчивому непрерывному распределению $F(\varphi, \lambda, h, k)$. Таким образом, функция F определяет потенциальные возможности сейсмического режима произвольной области в терминах

вероятности. При таком подходе каталог землетрясений, представленный в виде математического объекта трех элементов, является опорной моделью, на фоне которой можно отслеживать изменения в сейсмической активности, т.е. регистрировать вариации в распределении вероятностей в локальных областях сейсмического региона за различные интервалы времени [2]. В данной работе исследовались следующие случайные события: «попадание эпицентров сейсмических событий, произошедших в выбранном в сейсмоактивном объёме V , в заданные интервалы широты $\Delta\varphi$ » и «попадание эпицентров сейсмических событий, произошедших в выбранном в сейсмоактивном объёме V , в заданные интервалы глубины Δh_i ».

Для статистической обработки использовался каталог сейсмических событий Камчатского региона, составленный КС ГС РАН. Рассматривались только землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 9$ и глубиной гипоцентров $h \leq 100$ км. Распределение вероятностей сейсмических событий по интервалам широты $\Delta\varphi_i$ вычислялось для диапазона $48^\circ - 59^\circ$ с.ш. для временного окна $\Delta T = 1$ год, проходящего скользящим шагом $\Delta t = 5$ суток временной интервал 01.01.1990 – 01.09.2013 гг. На основе полученных распределений были вычислены временные ряды математического ожидания и среднеквадратического отклонения широты сейсмических событий (рис.1), а также временной ряд их наиболее вероятной широты (рис.2). На рис.1. видно, что широты большинства землетрясений с энергетическим классом $K_s \geq 14$ располагаются в пределах одного среднеквадратического отклонения от математического ожидания. Кроме того, их широты находятся в непосредственной близости к кривой наиболее вероятной широты сейсмических событий (рис.2). Также, на основе рис.1 и рис.2 можно отметить, что в период 1990 – 2008 гг. наибольшая сейсмическая активность была более характерна для северной части сейсмофокальной зоны Камчатки, но в 2009 – 2012 гг. происходит смещение активности в южную часть сейсмофокальной зоны, где в период февраль-май 2013 г. происходит серия крупных сейсмических событий с $K_s \geq 14$.

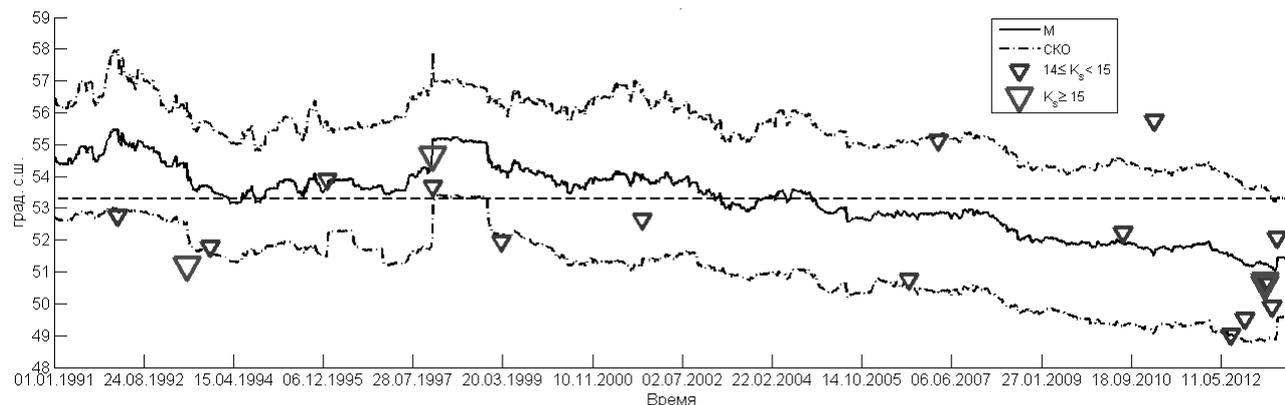


Рис.1. Временные ряды математического ожидания и среднеквадратического отклонения широты сейсмических событий, произошедших за 01.01.1990 – 01.09.2013 гг. Треугольниками отмечено время и широта землетрясений с $K_s \geq 14$.

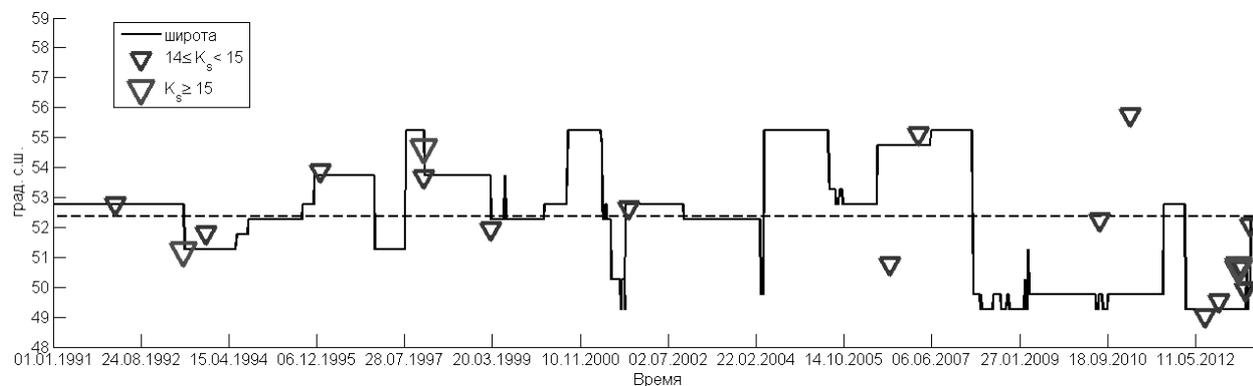


Рис.2. Временной ряд значений наиболее вероятной широты сейсмических событий, произошедших за 01.01.1990 – 01.09.2013 гг. Треугольниками отмечено время и широта землетрясений с $K_s \geq 14$.

При анализе изменений в распределении сейсмических событий по глубине рассматривались только землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 9$, глубиной гипоцентров $h \leq 100$ км и ошибкой их определения не больше 10 км. Исследование проводилось для четырёх прямоугольных областей с размерами по широте $\Delta\varphi = 1,5^\circ$ и по долготе $\Delta\lambda = 5^\circ$, расположенных вдоль восточного побережья Кам-

чатки. Для каждой области, проходя временной период 01.01.1990 – 01.07.2008 гг. окном $\Delta T=1$ год с шагом $\Delta t=5$ суток, были вычислены математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение глубины сейсмических событий (рис.3–6). В целом для всех областей можно отметить, что математическое ожидание глубины, произошедших в них землетрясений, изменяется в диапазоне 20 – 50 км, а среднее квадратическое отклонение глубины в диапазоне 5 – 20 км. Глубины большинства крупных землетрясений с $K_s \geq 14$ лежат вблизи математического ожидания глубины или в одном интервале среднее квадратическое отклонения от него. Для областей S_1 , S_3 и S_4 можно отметить, что после ряда произошедших в них сильных землетрясений, происходило резкое изменение математического ожидания глубины сейсмических событий.

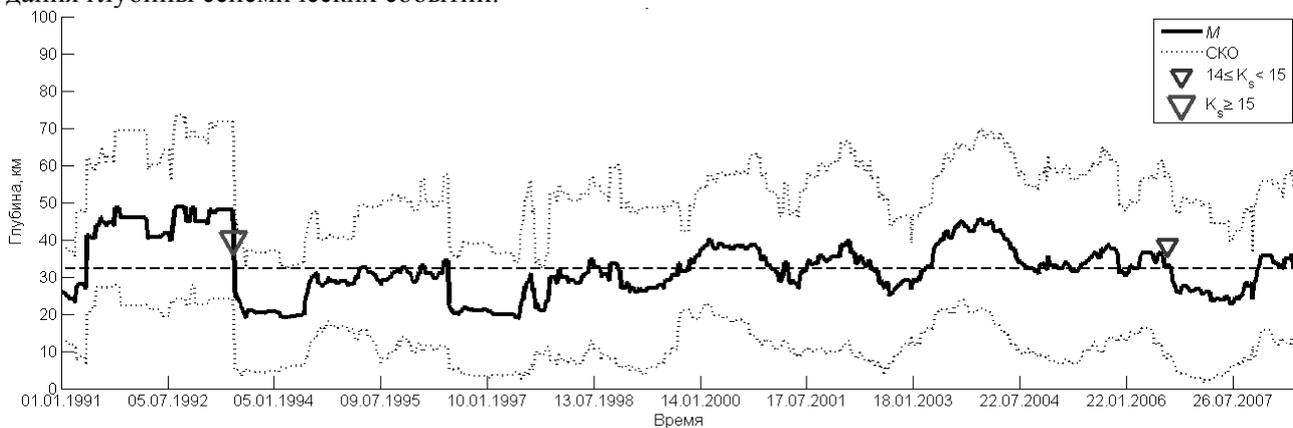


Рис.3. Временные ряды математического ожидания и среднее квадратическое отклонение глубины сейсмических событий, произошедших за 01.01.1990 – 01.07.2008 гг. в области S_1 с координатами $\Delta\varphi=50^\circ - 51,5^\circ$ с.ш. и $\Delta\lambda=156^\circ - 161^\circ$ в.д. Треугольниками отмечено время и глубина землетрясений с $K_s \geq 14$.

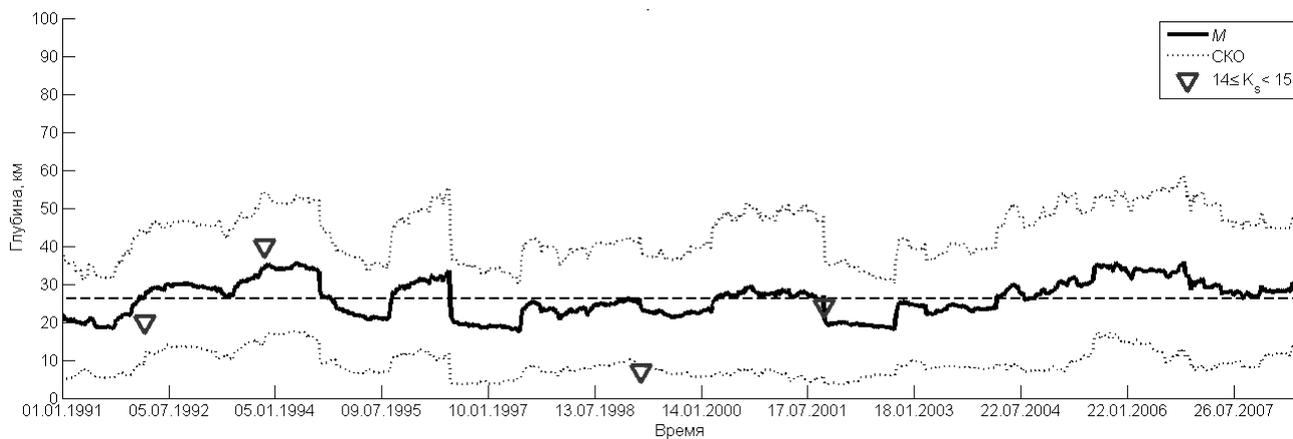


Рис.4. Временные ряды математического ожидания и среднее квадратическое отклонение глубины сейсмических событий, произошедших за 01.01.1990 – 01.07.2008 гг. в области S_2 с координатами $\Delta\varphi=51,5^\circ - 53^\circ$ с.ш. и $\Delta\lambda=157^\circ - 162^\circ$ в.д. Треугольниками отмечено время и глубина землетрясений с $K_s \geq 14$.

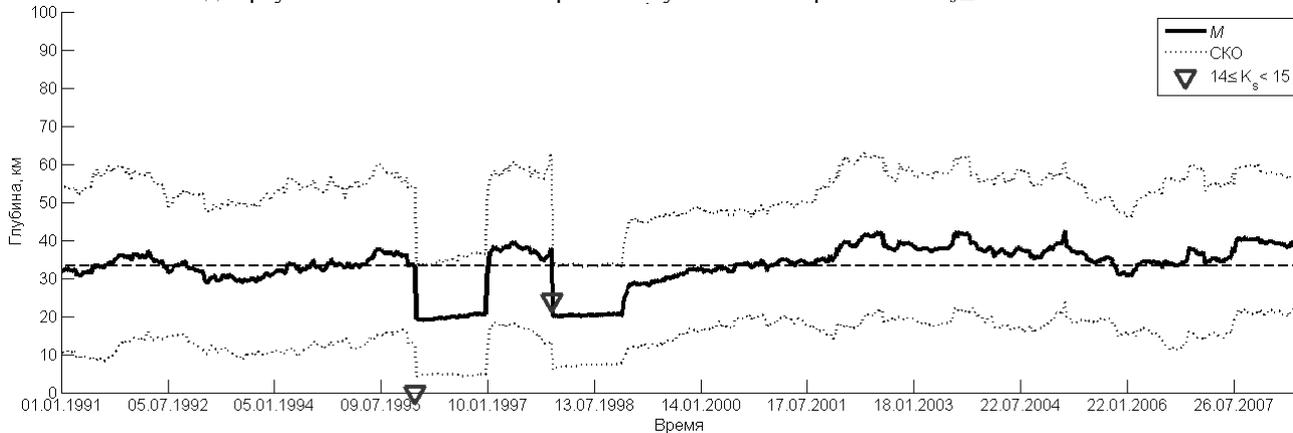


Рис.5. Временные ряды математического ожидания и среднее квадратическое отклонение глубины сейсмических событий, произошедших за 01.01.1990 – 01.07.2008 гг. в области S_3 с координатами $\Delta\varphi=53^\circ - 54,5^\circ$ с.ш. и $\Delta\lambda=158^\circ - 163^\circ$ в.д. Треугольниками отмечено время и глубина землетрясений с $K_s \geq 14$.

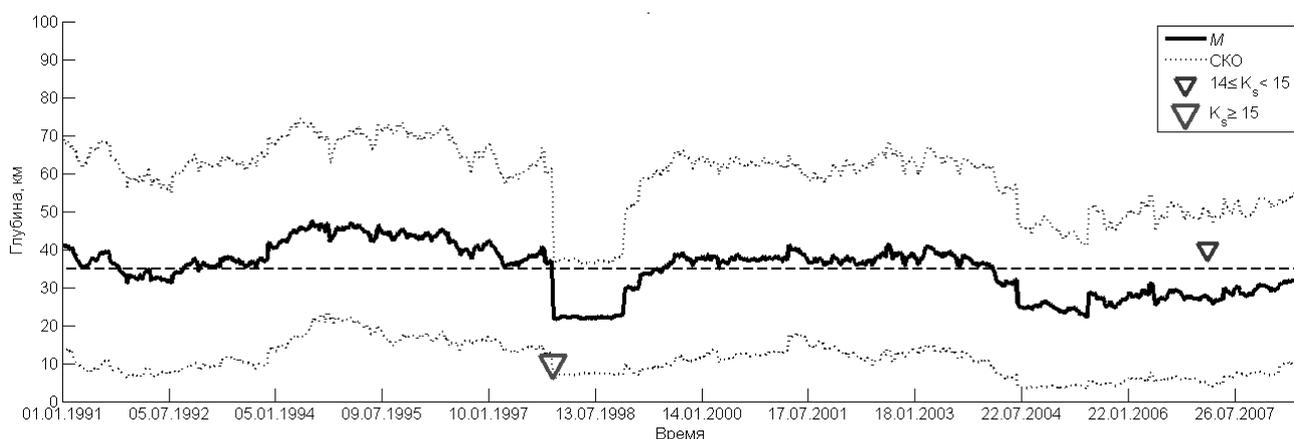


Рис.6. Временные ряды математического ожидания и среднеквадратического отклонения глубины сейсмических событий, произошедших за 01.01.1990 – 01.07.2008 гг. в области S_4 с координатами $\Delta\varphi=54,5^\circ - 56^\circ$ с.ш. и $\Delta\lambda=159^\circ - 164^\circ$ в.д. Треугольниками отмечено время и глубина землетрясений с $K_s \geq 14$.

Заключение

На основе вероятностного подхода к каталогу камчатских землетрясений проведено исследование сейсмического режима Камчатского региона за 1990 – 2013 гг. Рассматривая глубину и широту сейсмических событий, произошедших в сейсмоактивных областях Камчатского региона, как случайные величины, были вычислены их временные ряды математического ожидания и среднеквадратическое отклонения. Анализ временных рядов полученных статистических характеристик показал, что вблизи их математического ожидания или в одном интервале среднеквадратического отклонения от него, лежат координаты большинства землетрясений с $K_s \geq 14$. Также показано, что землетрясениям с $K_s \geq 14$ произошедшим в 2013 г. в южной части сейсмофокальной зоны Камчатки, предшествовало смещение в эту зону сейсмической активности в 2009 – 2012 гг.

Список литературы

1. Богданов В.В. Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // ДАН, 2006, том 3, с.393–397.
2. Богданов В.В., Павлов А.В., Полохова А.Л. Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология, 2010, № 6, с.52–64.