

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ГЛУБИНЕ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КЛАССОМ  $K_S \geq 14$  ВДОЛЬ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ ЗА ПЕРИОД 1978-2008 гг.

*Павлов А.В.*

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

*Научный руководитель: к.ф.-м.н. Богданов В.В.*

На основе вероятностного подхода к каталогу землетрясений Камчатского региона было выявлено согласованное усиление сейсмической активности за два года перед Кроноцким землетрясением (05.12.1997) в восьми областях вдоль восточного побережья Камчатки и увеличение вероятности возникновения землетрясений на малых глубинах (5-10 км). В докладе представлен анализ распределений сейсмических событий по глубине (до 70 км), вычисленных с временным окном  $\Delta T = 1$  год и скользящим шагом три месяца за период с 01.01.1978 г по 30.09.2008 г. для этих же областей. Для каждого периода были рассчитаны математические ожидания и среднеквадратические отклонения (СКО) глубины, как для отдельной области, так и для всей области, включающей рассматриваемые площади. Проанализировано поведение полученных статистических параметров в периоды, предшествующие землетрясениям с классом  $K_S \geq 14$ . Получено, что возникновению большинства сейсмических событий с данным классом, произошедших в рассматриваемых областях, предшествует резкое изменение математического ожидания их глубины и, кроме этого, глубины этих землетрясений лежат в пределах одного СКО от их математического ожидания.

Будем полагать, что сейсмическое событие – некоторый нелинейный процесс, который развивается в среде, находящейся далеко от равновесия. По мере возрастания степени неустойчивости такой системы и приближения ее к критическому состоянию, возрастают как интенсивность флуктуаций параметров, так и время, и длина корреляций [1]. Рост длины и амплитуды корреляций в неравновесной системе указывают на связи процессов в некоторой локальной выбранной области с другими ее частями. Исходя из этого, можно предположить, что при подготовке на некоторой глубине крупного события в сейсмическом регионе, находящемся в неустойчивом далеком от равновесия состоянии, происходит согласованное, коррелированное усиление сейсмической активности, которая охватывает далекие от эпицентра будущего события области. Землетрясения происходят на больших пространственных масштабах и концентрируются на уровне глубины готовящегося основного события. Масштабы, определяющие временную  $\tau$  и пространственную  $L$  корреляцию при формировании этих землетрясений, зависят от величины готовящегося основного толчка и составляют для  $\tau$  несколько лет и для  $L$  первые сотни километров.

Для проверки этого предположения было решено посмотреть, есть ли увеличение проявления пространственных масштабов корреляции, например, на подготовительной стадии Кроноцкого землетрясения (05.12.1997). Для исследования каталога были применены методы теории вероятностей.

При вероятностном рассмотрении каталога сейсмических событий каждое землетрясение рассматривается как элементарное событие  $\omega_i$  в пространстве элементарных событий  $\Omega$ . Каждое единичное событие  $\omega_i$  характеризуется системой случайных непрерывных величин: энергетическим классом  $k$ , широтой  $\varphi$ , долготой  $\lambda$ , глубиной  $h$ , временем  $t$ . Время единичного землетрясения из системы случайных величин исключается. Сейсмичность всего региона или его выбранной части за данный период времени рассматривается как полная группа событий и описывается в виде распределений условных и безусловных вероятностей  $P$ , имеющих частотное представление. Случайные события определяются как комбинации системы случайных величин  $k, \varphi, \lambda, h$  в множестве  $\tilde{F}$ . Это позволяет представить каталог сейсмических событий за период наблюдений как вероятностное пространство трех объектов  $\{\Omega, \tilde{F}, P\}$  и дает возможность вычислять распределения вероятностей для различных случайных событий [2]. Если закон распределения системы случайных величин задан в аналитической форме посредством функции распределения  $F(\varphi, \lambda, h, k)$  или ее плотности  $f(\varphi, \lambda, h, k)$ , то по стандартным формулам можно найти законы распределения отдельных величин. Для непрерывных величин вероятности попадания случайных событий в заданные интервалы по широте  $\Delta\varphi_i$ , долготе  $\Delta\lambda_j$ , глубине  $\Delta h_m$  и по классу  $\Delta k_n$  вычисляются по формуле:

$$P(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m, \Delta k_n) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \int_{h_1}^{h_2} dh \int_{k_1}^{k_2} f(k, \varphi, \lambda, h) dk =$$

$$F(\varphi_i, \lambda_j, h_m, k_n) - F(\varphi_{i-1}, \lambda_{j-1}, h_{m-1}, k_{n-1}) =$$

$$= P(\Delta\varphi_i)P(\Delta\lambda_j | \Delta\varphi_i)P(\Delta h_m | \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i)P(\Delta k_n | \Delta h_m, \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i),$$

где  $i, j, m$  и  $n$  – индексы, соответствующих интервалов случайных величин. В этом выражении приняты обозначения:  $f(\varphi)$  – безусловная плотность распределения событий в зависимости от  $\varphi$ ;  $f(\lambda|\varphi)$  – плотность распределения событий по  $\lambda$  при условии, что широта равна  $\varphi$ ;  $f(h|\varphi, \lambda)$  – плотность распределения по  $h$  при условии, что широта и долгота соответственно равны  $\varphi$  и  $\lambda$ ;  $f(k|\lambda, \varphi, h)$  – плотность распределения по  $k$  при условии, что долгота, широта и глубина соответственно равны  $\lambda, \varphi$  и  $h$ . Обработка каталога по приведенной формуле дает возможность вычислить частоты возникновения сейсмических событий в том или ином заданном интервале изменения случайных величин  $\Delta$  и получить значения функции распределения  $F(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta k)$ .

На основе данного подхода вычислены распределения вероятностей  $P(\Delta h)$ , характеризующих попадание сейсмических событий в заданные интервалы глубин с шагом  $\Delta h=1$  км до  $H=70$  км и в заданные сектора, определяемые соответствующими интервалами широты и долготы (таблица 1).

Таблица 1

S <sub>1</sub>	$\Delta\varphi=51^\circ - 52^\circ$ с.ш., $\lambda=157^\circ - 158,5^\circ$ в.д	S <sub>5</sub>	$\Delta\varphi=53^\circ - 54^\circ$ с.ш., $\lambda=160^\circ - 161,5^\circ$ в.д.
S <sub>2</sub>	$\Delta\varphi=51^\circ - 52^\circ$ с.ш., $\lambda=158,5^\circ - 160^\circ$ в.д	S <sub>6</sub>	$\Delta\varphi=53^\circ - 54^\circ$ с.ш., $\lambda=161,5^\circ - 163^\circ$ в.д.
S <sub>3</sub>	$\Delta\varphi=52^\circ - 53^\circ$ с.ш., $\lambda=158,5^\circ - 160^\circ$ в.д	S <sub>7</sub>	$\Delta\varphi=54^\circ - 55^\circ$ с.ш., $\lambda=161,5^\circ - 163^\circ$ в.д.
S <sub>4</sub>	$\Delta\varphi=52^\circ - 53^\circ$ с.ш., $\lambda=160^\circ - 161,5^\circ$ в.д.	S <sub>8</sub>	$\Delta\varphi=54^\circ - 55^\circ$ с.ш., $\lambda=163^\circ - 164,5^\circ$ в.д.

Рассмотрены сейсмические события с энергетическим классом  $K_S \geq 9$  за четыре временных периода с 01 января по 31 декабря за 1994, 1995, 1996 и с 01 января по 04 декабря 1997 г., исключая Кроноцкое землетрясение (05.12.1997 г.) и последующие за ним события. Затем полученные ряды распределения вероятностей сейсмических событий по глубине были представлены в виде непрерывного вейвлет-разложения:

$$(W_\Psi f)(b, a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \text{ где } \Psi\text{-базисный вейвлет, } f(x) \text{ – исследуемый чис-}$$

словой ряд, коэффициенты  $a, b \in \mathbb{R}$ ,  $a \neq 0$ . В процессе преобразования использовались ортонормальные вейвлеты Добеши 3-го порядка. Разложение производилось до 32-го масштабного уровня [3]. В качестве примера на рис.1а показан исходный ряд распределения вероятностей за 1996 г. для сектора 3, ограниченной интервалами координат  $\Delta\varphi = 52^\circ - 53^\circ$  с.ш. и  $\Delta\lambda = 158,5^\circ - 160^\circ$  в.д. На рис.1б представлены результаты его вейвлет-разложения. Поскольку коэффициенты вейвлет-преобразования пропорциональны квадратам вероятностей и, следовательно, дают распределение интенсивности («энергии») процесса по масштабам, то был выполнен расчет суммы вейвлет-коэффициентов по всем масштабным уровням, которая характеризует распределение энергии исследуемого сейсмического процесса по глубине в заданном секторе.

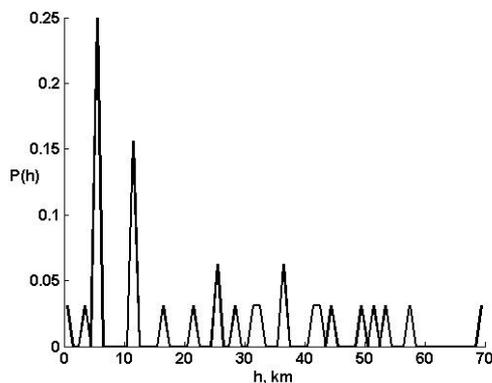


Рис.1а. Распределение вероятностей сейсмических по глубине.

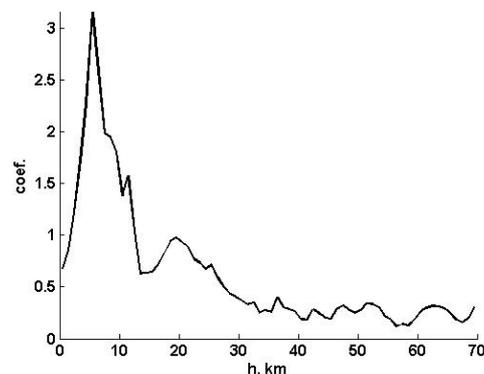


Рис.1б. Вейвлет-коэффициенты для распределения вероятностей событий по глубине.

На рис 2. представлены результаты вейвлет-разложений за 1994 и 1995 годы для всех исследуемых секторов. 05 декабря 1997 г. в секторе № 2 ( $\varphi=54.95^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=163.23^{\circ}$  в.д.,  $h=5$  км) произошло Кроноцкое землетрясение с энергетическим классом  $k=14.9$ . В этом секторе за 1994 г. произошло 14 событий с их концентрацией на глубине в районе 40 км. В 1995 г. число событий уменьшилось, и их интенсивность сместилась на глубины в районе 30 км. Соответствующие изменения произошли и в каждом исследуемом секторе, причем характерным для всех секторов является смещение в той или иной мере интенсивности землетрясений в сторону меньших глубин. В 1996 году резко возросла интенсивность событий на глубине в районе 5 км для всех секторов за исключением сектора 3, для которого максимальная интенсивность приходится на район глубин в 40 км (см. рис.3). В секторе 2 максимальная интенсивность приходится на глубину  $\sim 10$  км. Следует отметить, что суммарная интенсивность в секторах № 9, 10 превысила значение 10 при резком увеличении числа событий по сравнению с 1995 г.

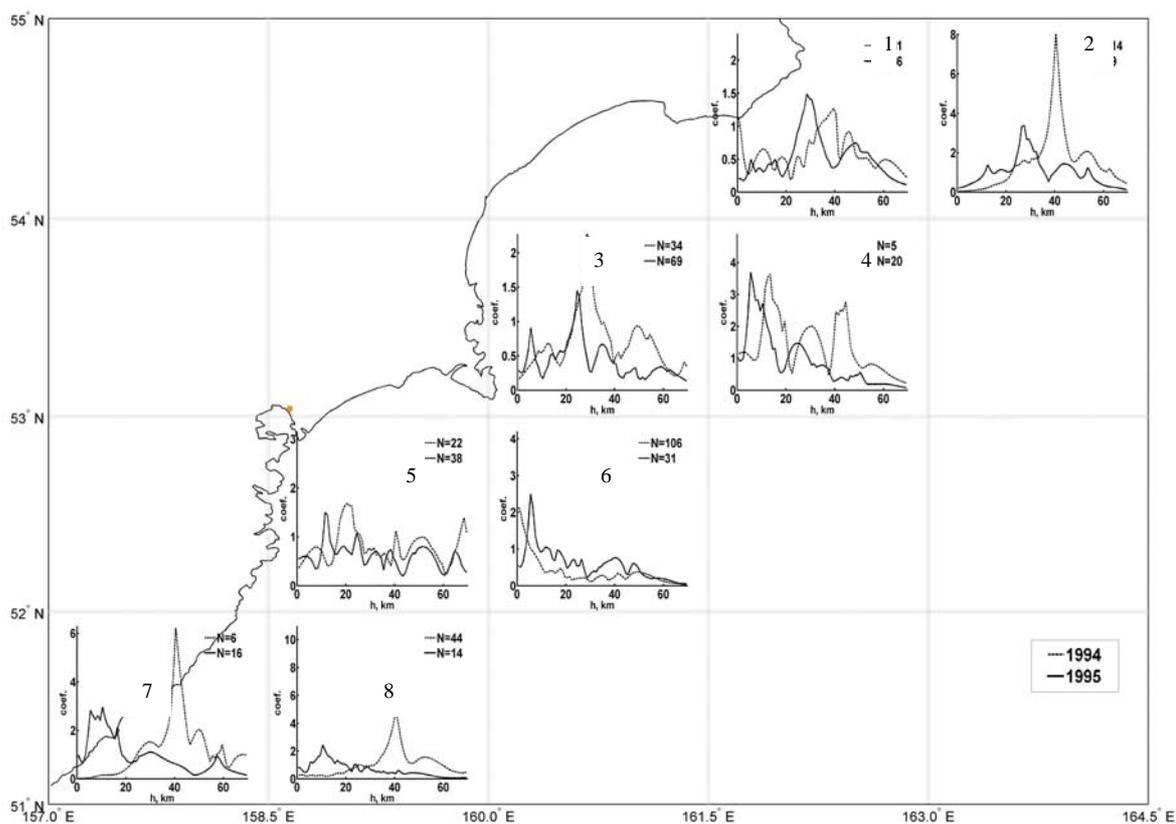


Рис 2. Вейвлет-коэффициенты, вычисленные на основе распределений вероятностей по глубине для 1994 и 1995 годов.

В 1997 в секторах № 9, 10 число землетрясений резко сократилось, но их концентрация в районе глубины 5 км сохранилась. Характерным для 1996 и 1997 г.г. является формирование событий на глубине около 5 км для секторов, расположенных в да-

ли от 2. Причем во всех рассматриваемых секторах число событий в 1997 г. уменьшилось.

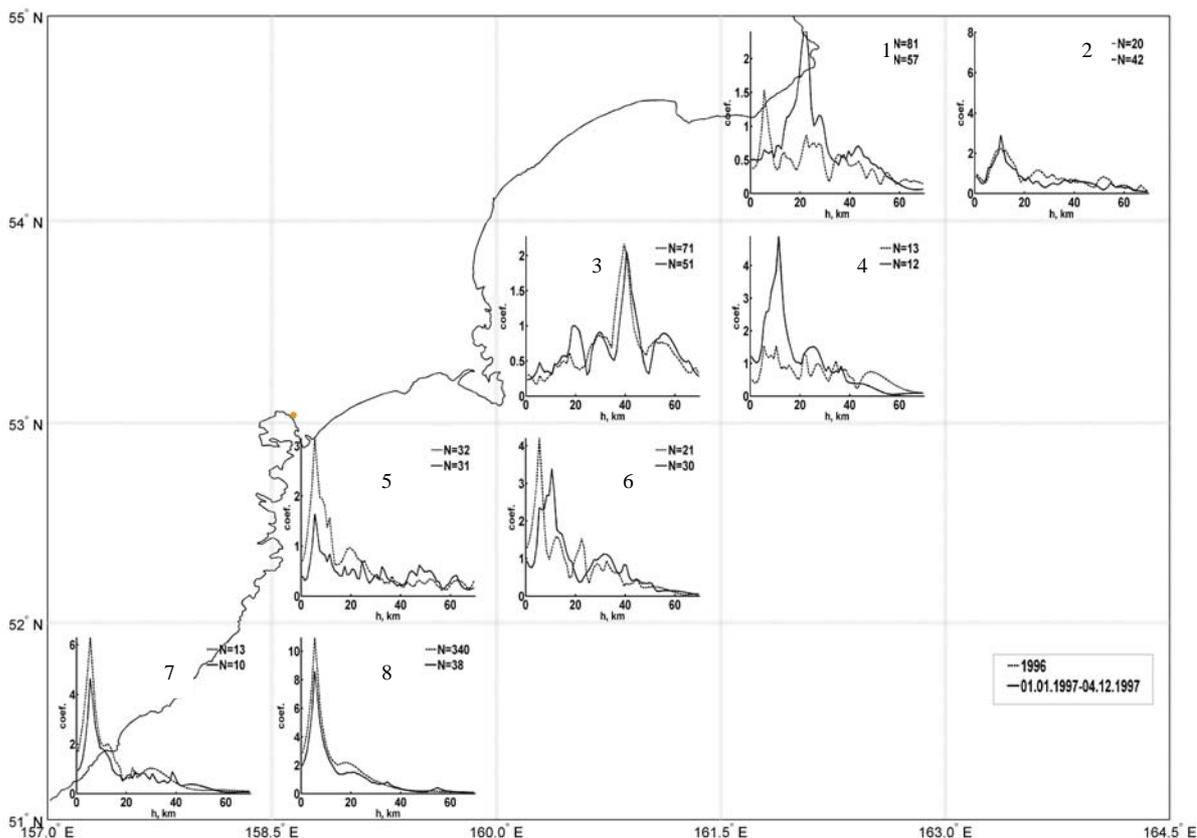


Рис. 3. Вейвлет-коэффициенты, вычисленные на основе распределений вероятностей по глубине для 1996 года и периода 01.01.1997 – 04.12.1997 гг.

За три года до Кроноцкого землетрясения началась перестройка в распределении сейсмических событий по глубине: интенсивность событий в каждом из рассматриваемых секторов стала смещаться в сторону меньших глубин.

Для исследования распределений сейсмических событий за период 1978 – 2008 гг. для рассматриваемых областей были вычислены распределения вероятностей по глубине (до 70 км) с временным окном  $\Delta T=1$  год и скользящим шагом три месяца. Для каждого периода были рассчитаны математические ожидания и среднеквадратические отклонения (СКО) глубины, как для отдельной области (рис.4), так и для всей области, включающей рассматриваемые площади (рис.5). В результате получены распределения соответствующих математических ожиданий и соответствующих СКО во времени. Распределение математического ожидания глубин было сопоставлено с глубинами землетрясений, имеющих энергетический класс  $K_S \geq 14$ . На рис.4 и рис.5 линией обозначено математическое ожидание глубины, по обе стороны от него отложено СКО и закрашено цветом, глубины землетрясений с энергетическим классом  $K_S \geq 14$  отмечены треугольниками, кроме того, на рис.5 глубины землетрясений, чей энергетический класс принадлежит интервалу от 13,5 до 14, отмечены ромбами. Среднее значение математиче-

ского ожидания глубины для всей рассматриваемой области отмечено на рис.5 пунктирной линией. Из рис.4 видно, что в секторах № 2, 4, 5, 6, 7, 8 резкое изменение

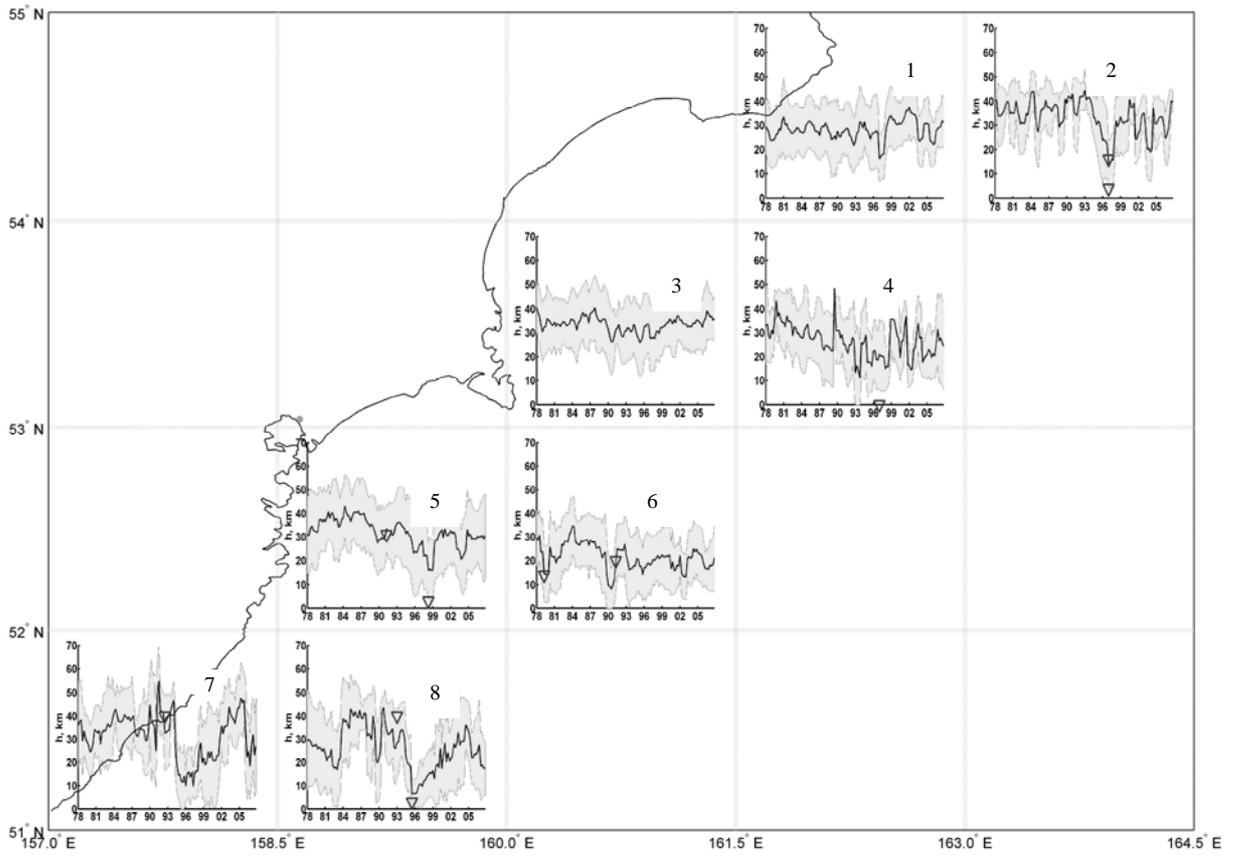


Рис. 4. Временные распределения математического ожидания и СКО глубины, рассчитанные для каждой сейсмоактивной области.

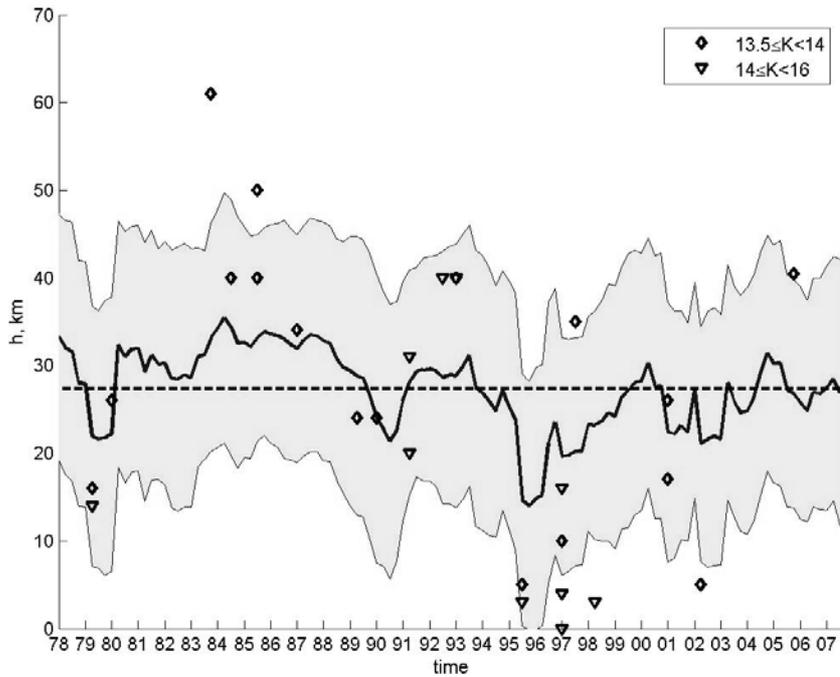


Рис. 5. Временные распределения математического ожидания и СКО глубины, рассчитанные для всей сейсмоактивной области.

математического ожидания глубины предшествует землетрясениям с  $K_S \geq 14$ , произошедшим в данных областях и их глубины лежат в пределах одного интервала СКО от математического ожидания. Аналогичный вывод можно сделать и по рис.5, где также заметны изменения математического ожидания глубины перед наступлением землетрясений с  $K_S \geq 14$ .

### Выводы

Согласно общим выводам теории нелинейных динамических систем – по мере возрастания степени неустойчивости произвольной системы, находящейся далеко от равновесия, и приближения ее к критическому состоянию, возрастают как интенсивность флуктуаций параметров, так и время, и длина корреляций. Из результатов, полученных в работе, следует, что землетрясениям с энергетическим классом  $K_S \geq 14$  предшествует коррелированное изменение сейсмического режима, захватывающее большие пространственные области, в которых интенсивность слабых землетрясений ( $K_S < 14$ ) усиливается и они концентрируются в области глубин, близких к глубинам последующих крупных событий.

### Литература

1. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Едиториал УРСС. 2003. 344с.
2. Богданов В.В. Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // Докл. АН СССР. 2006. Т.408. №3. С.393-397.
3. Богданов В.В., Геппенер В.В., Мандрикова О.В. Моделирование временных рядов геофизических параметров на основе вейвлет-преобразования. Новосибирск: СпбГЭТУ «ЛЭТИ». 2006. 108с.

### RESEARCH OF DISTRIBUTIONS OF SEISMIC EVENTS ON DEPTH BEFORE STRONG EARTHQUAKES WITH ENERGY CLASS $K_S \geq 14$ ALONG EAST COAST OF KAMCHATKA FOR THE PERIOD 1978-2008

*Pavlov A.V.*

The coordinated amplification of seismic activity for two years before Kronotskoe earthquake (05.12.1997) in eight areas along east coast of Kamchatka and increase of probability of occurrence of earthquakes at small depths (5-10 km) was revealed on the basis of the probability-theoretic approach to the catalogue of earthquakes of the Kamchatka region. The analysis of distributions of seismic events on depth (up to 70km), calculated with a time window  $\Delta T=1$  year and sliding step three months for the period from 01.01.1978 up to 30.09.2008 for the same areas is submitted in the report. Mathematical expectation value and mean square deviation of depth, both for the separate area, and all area including the considered areas were calculated for each period. The behavior of the received statistical parameters in the periods previous to earthquakes with energy class  $K_S \geq 14$  is analyzed. It is received, that to occurrence of the majority of seismic events with the given energy class, occurred in considered areas, precedes sharp change a mathematical expectation of their depth and, except for it, depths of these earthquakes lay within the limits of one mean square deviation from their mathematical expectation.