

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЕ СТАТИСТИКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МИКРОСЕЙСМ

Любушин А.А.

Институт физики Земли РАН, г. Москва, lyubushin@yandex.ru

Введение

Низкочастотные микросейсмические колебания являются важным источником информации о процессах в земной коре, несмотря на то, что основная энергия этих колебаний обусловлена процессами в атмосфере и океане: вариациями атмосферного давления и воздействием океанических волн на берег и шельф [7-11]. Фактически земная кора является средой распространения энергии от атмосферных и океанических процессов и, поскольку передаточные свойства коры зависят от ее состояния, то и статистические свойства микросейсм отражают изменения свойств литосферы. Следовательно, если исследовать изменение характеристик сейсмического шума во времени, то есть надежда на то, что такое исследование даст важную информацию об изменениях в земной коре, в том числе и связанных с сейсмическим процессом и подготовкой сильных землетрясений.

Важным направлением в анализе сейсмического шума является исследование эффектов увеличения синхронизации поля микросейсм. Очевидно, что такой подход нуждается в использовании синхронных данных от сети сейсмических станций. В работах [1-3] для этой цели были использованы многомерные спектральные и вейвлетные меры когерентности, оцененные в скользящих временных окнах [4]. Ниже в качестве преобразования исходных данных к последовательности информативных безразмерных статистик, определенных на последовательных малых интервалах времени, использована оценка одного из параметров мульти-фрактального спектра сингулярности [5] – ширины его носителя $\Delta\alpha$. Переход к исследованию вариаций параметров спектров сингулярности позволяет обнаружить скрытые эффекты синхронизации, выделение которых было невозможно при анализе исходных данных [1-4]. Величина $\Delta\alpha$ отражает разнообразие случайного поведения сигнала и является своего рода мерой числа скрытых степеней свободы стохастической системы.

Ниже приведены результаты анализа эволюции параметра $\Delta\alpha$ сейсмических записей широкополосных сетей F-net (Япония, 1997-2009 гг., 77 станций) и сети IRIS (весь мир, 2004-2005 гг., 123 станции) с целью выделения долгосрочных трендов и эффектов синхронизации статистических свойств шумов поля микросейсмических колебаний и сопоставления выделенных особенностей с сейсмическим режимом. Исходные данные – вертикальные компоненты с шагом по времени 1 сек. Спектры сингулярности оценивались методом анализа флуктуаций после устранения масштабно-зависимых трендов [2, 6]. Для 1-секундных записей оценки $\Delta\alpha$ производились в последовательных непересекающихся временных окнах длиной 30 минут с устранением локальных трендов полиномами 4-го порядка. Исследовались также сейсмические записи после перехода к шагу по времени 1 минута путем вычисления последовательных средних по 60 значениям – для них параметр $\Delta\alpha$ оценивался в окнах длиной 1 сутки с устранением локальных трендов полиномами 8-го порядка.

Результаты анализа данных сети F-net, 1997-2009.

Для анализа использовались данные японской широкополосной сейсмической сети F-net за период наблюдения с начала 1997 года по октябрь 2009 года включительно (более 12.5 лет). Анализируемые данные – вертикальные компоненты с шагом по времени 1 сек, содержат интервалы пропусков, а также неправильных данных (типа постоянных нулевых значений) по причине сбоя в измерительной и регистрирующей аппаратуре. Рассматривались лишь станции, расположенные выше 30° СШ, что исключает из анализа данные 6 уединенных станций, расположенных на удаленных небольших островах. Положения остальных 77 станций представлено на рис.1 цифрами от 1 до 5, которые являются метками принадлежности станций 5 пространственным кластерам, вместе с числом станций в каждом кластере. Разбиение станций на пространственные кластеры преследует 2 цели: пространственное усреднение параметров микросейсм (усреднение осуществлялось посредством взятия медианы по станциям) и обеспечения непрерывности усредненного по кластеру значений в силу достаточно большого числа станций (то есть всегда работали несколько станций внутри кластеров). Гипоцентр землетрясения 25.09.2003, $M = 8.3$, отмечен звездой.

Для данных, приведенных к шагу по времени 1 минута длина интервалов времени, внутри которых оценивался параметр $\Delta\alpha$, составляет 1 сутки (1440 отсчетов). Поскольку данные регистрации микросейсмических колебаний содержат пропуски и сбойные участки различной длины, то, для получения непрерывного временных рядов вариаций $\Delta\alpha$ с шагом 1 сутки, вычислялась их медиана по станциям, обеспечивающим нормальную регистрацию в течение текущих суток. Таким образом, получалось 5 временных рядов с равномерным шагом по времени 1 сутки от 5 кластеров станций.

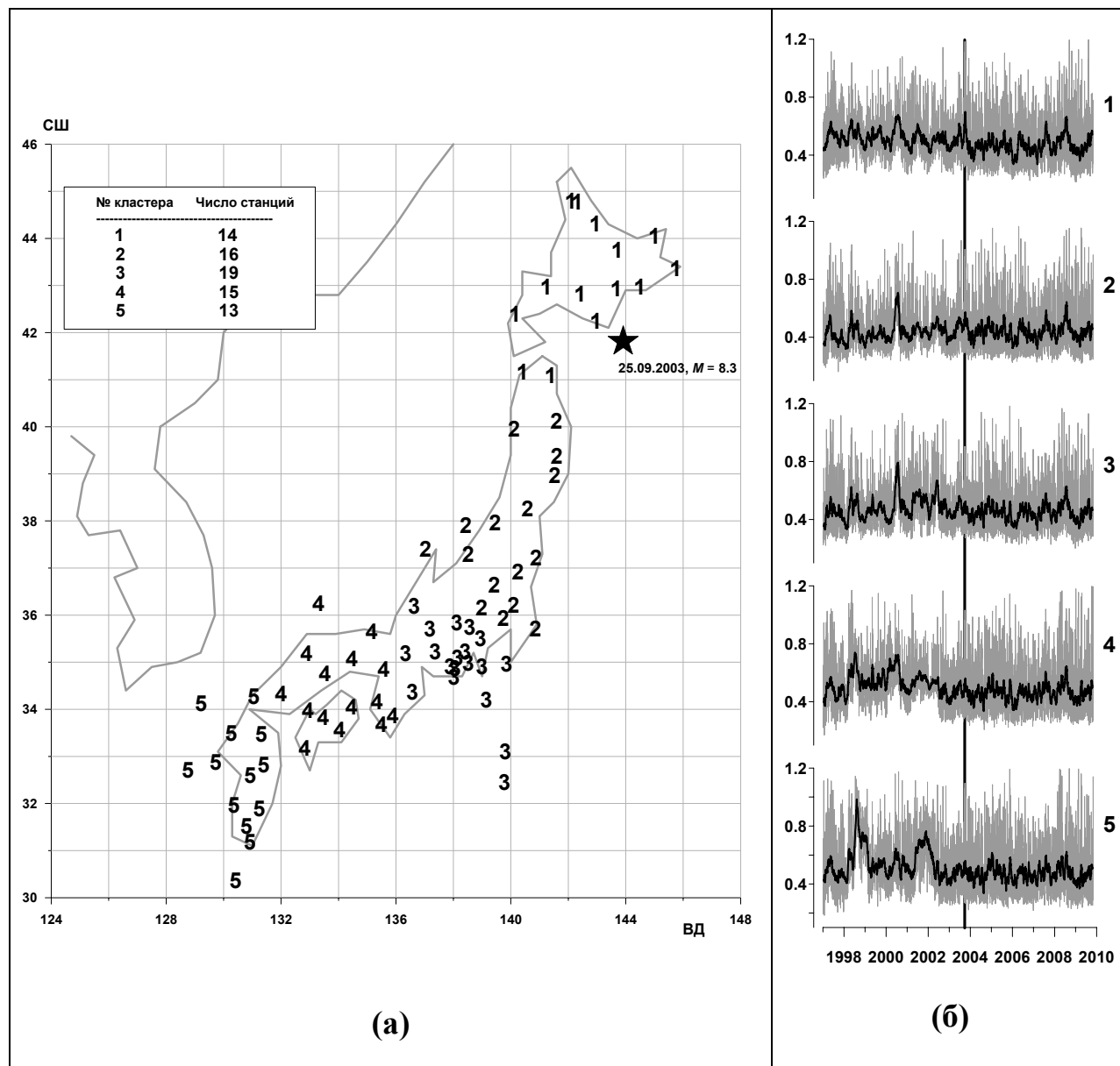


Рис.1(а) – положения 77 широкополосных сейсмических станций сети F-net и их разбиение на 5 пространственных кластеров с указанием числа станций в каждом кластере. Гипоцентр землетрясения 25.09.2003, $M = 8.3$, отмечен звездой. Рис.1(б) – серыми линиями представлены графики поведения медиан $\Delta\alpha$, вычисленных для станций внутри 5-ти кластеров; толстые черные линии – их усреднения в скользящем временном окне радиуса 14 суток. Спектры сингулярности вычислялись внутри последовательных временных окон длиной 1440 отсчетов (1 сутки). Вертикальные линии соответствуют моменту землетрясения 25.09.2003.

Рис.2 представляет график изменений робастной множественной меры корреляции κ для 5-мерного временного ряда медиан $\Delta\alpha$ (рис.1(б)). Мера κ [2, 4] представляет собой произведение абсолютных значений так называемых канонических корреляций, описывающих силу связи каждой из компонент анализируемого временного ряда с многомерным рядом всех прочих компонент. По

построению $0 \leq \kappa \leq 1$, причем очевидно, что всплески значений κ означают увеличение синхронности вариаций скалярных компонент анализируемого многомерного временного ряда. На рис.2 мера κ вычислена для 2-х временных окон – 91 день и 365 дней. Заметим, что использование годового окна для вычисления меры корреляции эквивалентно усреднению сезонных воздействий циклонов, штормов и ураганов как основных генераторов низкочастотных микросейсм и делает оценку весьма гладкой и устойчивой – это заметно при сравнении серых и черных линий на рис.2. Главная же особенность графиков на рис.2 – это рост степени множественного коэффициента корреляции перед событием 25.09.2003 и его стабилизация на новом более высоком уровне.

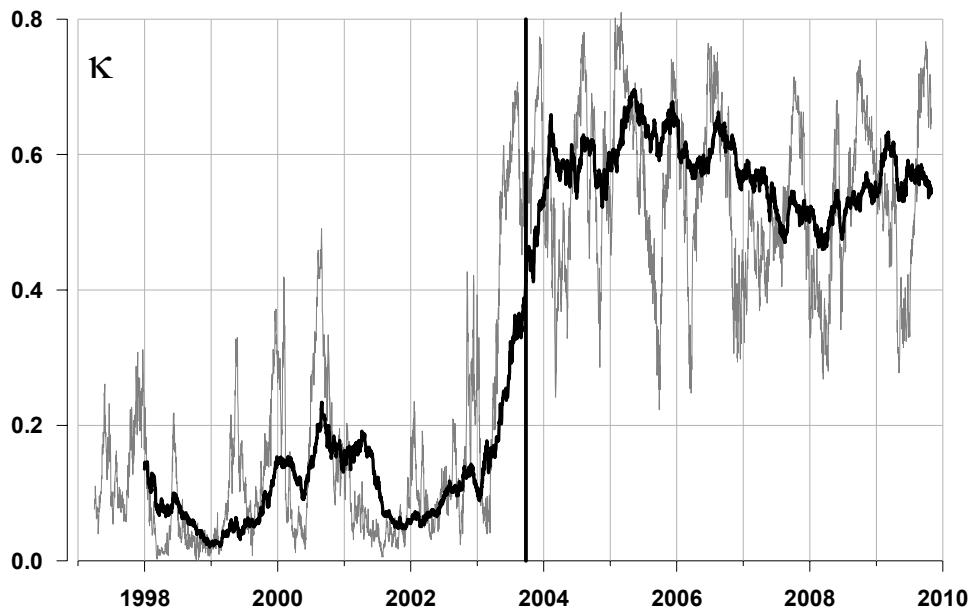


Рис.2. Графики робастной множественной меры корреляции κ , оцененной для медиан значений $\Delta\alpha$, вычисленных для сейсмических станций внутри 5-ти пространственных кластеров для 1-минутных данных в последовательных сутках. Значения κ даны в зависимости от положения правого конца временных окон. Серые линии соответствуют оценкам κ в окне длиной 0.25 года (91 отсчет), а черные линии – в окне длиной 1 год (365 отсчетов). Вертикальная толстая линия соответствует моменту землетрясения 25.09.2003.

Результаты анализа данных сети IRIS, 2004-2005.

На рис.3 представлены положения 123 широкополосных сейсмических станций глобальной сети IRIS, работавших в течение 2-х лет, 2005-2005 гг. Этот интервал времени был выбран для анализа, поскольку он включает в себя катастрофическое землетрясение на Суматре 26.12.2004, $M = 9.1$. Станции разбиты на 7 кластеров, указанных своими номерами на рис.3. Число станций в каждом кластере равно 15, 29, 19, 12, 23, 12 и 13 соответственно. Разбиение на кластеры осуществлялось по «географическому» принципу и несет в себе, разумеется, элементы произвола.

Анализ данных производился аналогично тому, как это было описано для сети F-net, за исключением одного отличия: параметр $\Delta\alpha$ оценивался не для 1-минутных данных в окнах длиной 1 сутки, а для исходных 1-секундных записей в окнах длиной 30 минут. Затем, для перехода к шагу по времени 1 сутки сначала вычислялись медианы $\Delta\alpha$ по 7 кластерам, а потом они усреднялись для последовательных 48 значений, что соответствует переходу к шагу по времени 1 сутки. Это отличие обусловлено худшим качеством данных сети IRIS по сравнению с F-net и увеличением и так большого числа разрывов в регистрации при попытке сразу перейти к 1-минутным данным. Результирующие суточные данные представлены своими графиками на рис.4 для каждого из кластеров.

Рис.5 представляет зависимость κ для временных рядов на рис.4 при оценке в скользящем временном окне длиной 112 суток, то есть 4 лунных месяца (по 28 суток). Видно, что моменту сейсмической катастрофы на Суматре 26.12.2004 предшествовала глобальная синхронизация микросейсм, начавшаяся примерно за 160 дней.

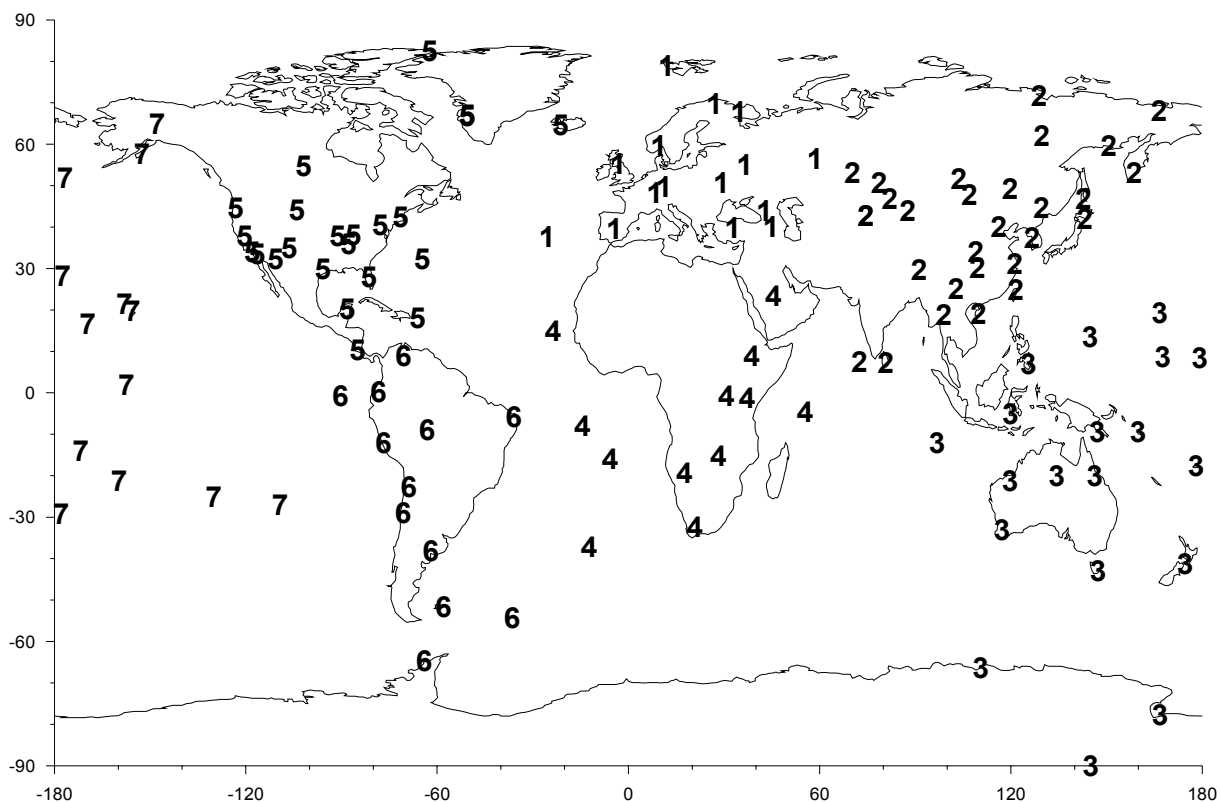


Рис.3 – положения 123 широкополосных сейсмических станций сети IRIS, функционировавших в 2004-2005 гг. и их разбиение на 7 пространственных кластеров с указанием номера принадлежности станции в каждом кластере.

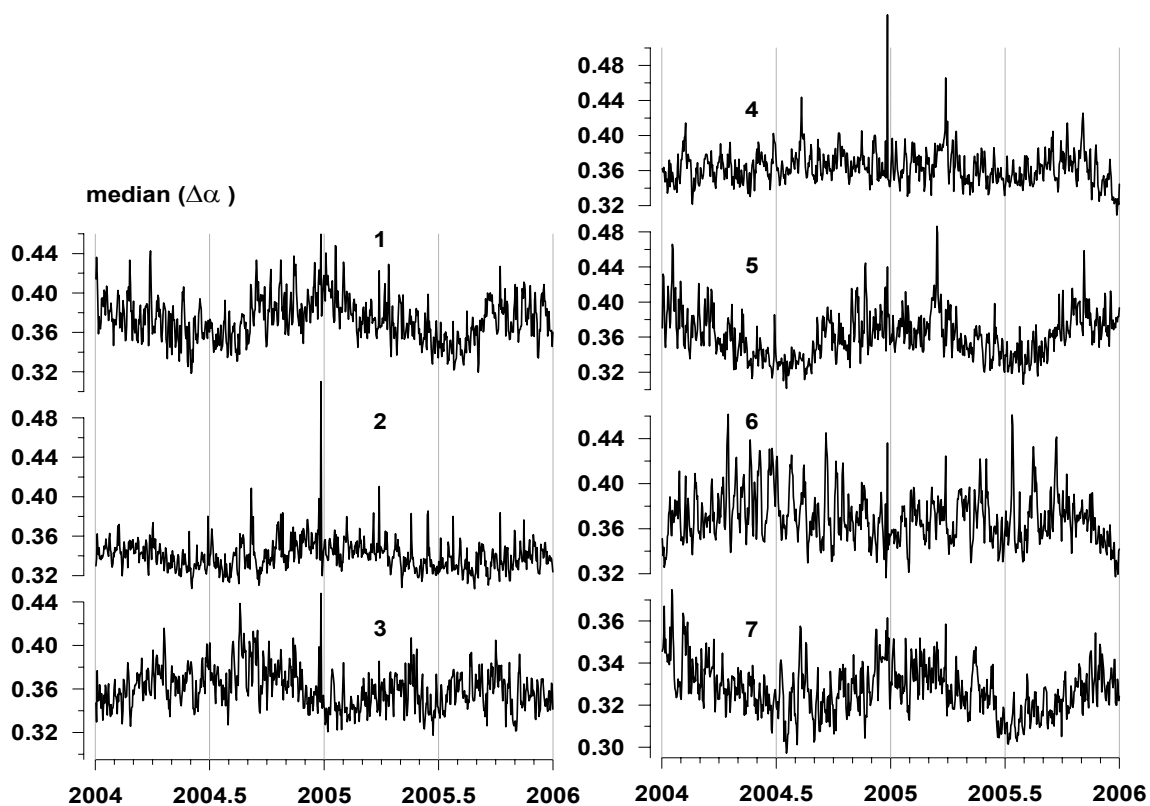


Рис.4 – графики вариаций медиан $\Delta\alpha$ сначала оцененных для 1-секундных данных в последовательных интервалах времени длиной 30 минут, а потом приведенных к шагу 1 сутки путем вычисления средних по последовательным 48 значениям. Номера кластеров (рис.3) проставлены рядом с каждым графиком.

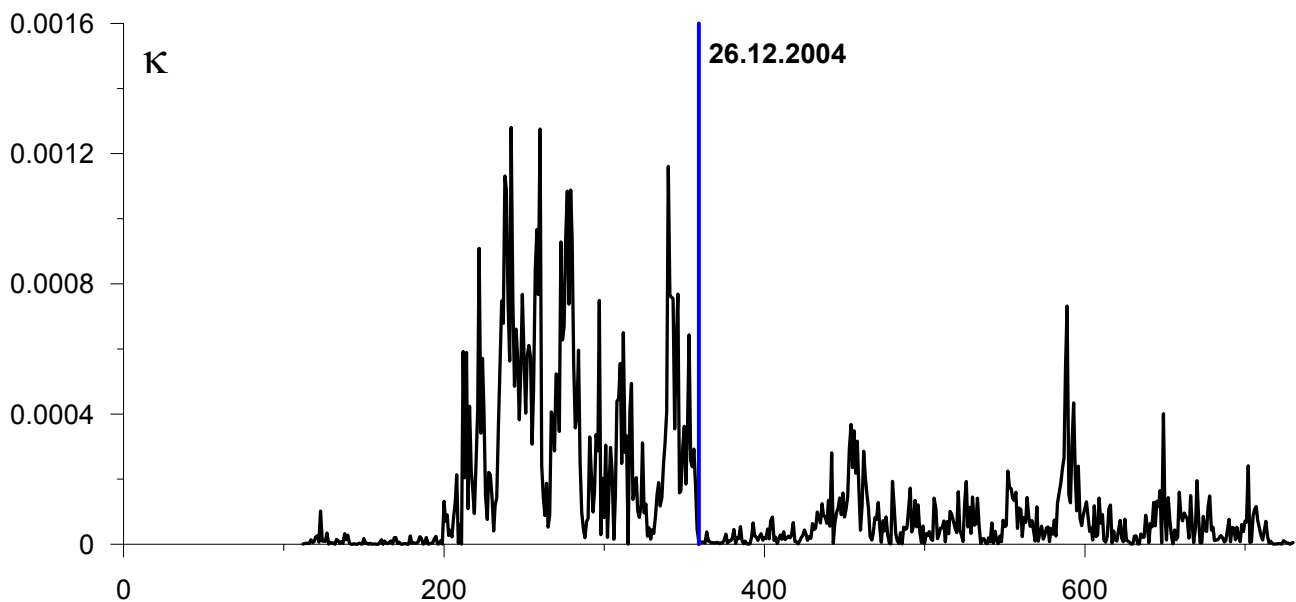


Рис.5. График робастной множественной меры корреляции K , оцененной для медиан значений $\Delta\alpha$, вычисленных для сейсмических станций внутри 7 пространственных кластеров (рисю4). Значения K даны в зависимости от положения правого конца временного окна длиной 112 суток, отсчитываемого в числе дней от начала 2004 года. Вертикальная толстая линия соответствует моменту землетрясения на Суматре 26.12.2004.

Заключение

Анализ данных сети F-net, 1997-2009 гг., показал, что после землетрясения на Хоккайдо 25.09.2003, $M=8.3$ произошла значительная синхронизация изменений мультифрактальных параметров низкочастотного микросейсмического поля, которая сохраняется до сих пор. Таким образом, землетрясение на Хоккайдо 2003 года является своего рода переломной точкой в поведении микросейсм и этот факт может свидетельствовать в пользу гипотезы о том, что это событие может быть форшоком еще более сильного землетрясения.

Выделен эффект глобальной синхронизации вариаций медиан параметра $\Delta\alpha$ записей от 7 кластеров сейсмических станций, покрывающих весь мир, при его оценке в скользящем временном окне длиной 112 суток (4 лунных месяца), начавшийся за 160 суток до момента катастрофического землетрясения на Суматре 26.12.2004.

Список литературы

1. Любушин А.А., Соболев Г.А. Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли, 2006, №9, с.18-28.
2. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007, 228с.
3. Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки. // Физика Земли, 2008, № 4, с.17-34.
4. Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм. // Физика Земли, 2009, № 5, с.15-28.
5. Федер Е. Фракталы. М., Мир. 1991. 254с.
6. Kantelhardt J. W., Zschiegner S. A., Koncsienly-Bunde E., Havlin S., Bunde A., and Stanley H. E. // Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series, Physica A, 316, P. 87-114, 2002.
7. Kobayashi N., and K.Nishida. Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances // Nature, 1998, 395, P. 357-360.
8. Rhie, J., and B. Romanowicz. Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // Nature, 2004, 431, P. 552-554.
9. Tanimoto T., J.Um, K.Nishida, and N.Kobayashi. Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days // Geophys.Res.Lett. 1998, 25, P. 1553-1556.
10. Tanimoto T, Um J. Cause of continuous oscillations of the Earth // J. Geophys. Res., 1999, 104:28, P. 723-739
11. Tanimoto, T. The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth // Geophys. J. Int., 2005, 160, P. 276-288.