

УДК 550.334

## АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНОСТИ ГЛОБАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА, 1997–2012

© 2014 г. А. А. Любушин

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 12.07.2013 г.

Исследуются эффекты когерентного поведения 4-х параметров глобального поля низкочастотных (периоды от 2 до 500 минут) сейсмических шумов: логарифма дисперсии, коэффициента эксцесса, ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности и минимальной нормализованной энтропии распределения квадратов ортогональных вейвлет-коэффициентов. Использовались данные от 229 широкополосных станций сейсмических сетей GSN, GEOSCOPE и GEOFON за 16 лет наблюдений, с начала 1997 г. по конец 2012 г. Совокупность всех станций была разбита на 8 групп, вместе покрывающих весь земной шар, и от каждой группы вычислялись ежесуточные значения медиан рассматриваемых параметров шумов. Таким образом, получилось четыре 8-мерных временных ряда с шагом по времени 1 сутки длиной 5844 отсчетов в каждой скалярной компоненте. Для каждого из четырех 8-мерных временных рядов строилась частотно-временная диаграмма эволюции спектральной меры когерентности (на основе использования канонических когерентностей) в скользящем временном окне длиной 365 суток. Кроме того, в качестве меры синхронизации, зависящей только от времени, для каждого параметра вычислялись максимальные по частотам значения меры когерентности и их среднее значение по 4-м анализируемым параметрам шума. В результате проведенного анализа был сделан вывод, что увеличение интенсивности сильнейших ( $M \geq 8.5$ ) землетрясений после мега-землетрясения на Суматре 26 декабря 2004 г. предвещало увеличение синхронизации параметров глобальных сейсмических шумов за весь промежуток наблюдений с начала 1997 г. Эта синхронизация продолжает свой рост по конец 2012 г., что может быть предвестником дальнейшего увеличения интенсивности сильнейших землетрясений во всем мире.

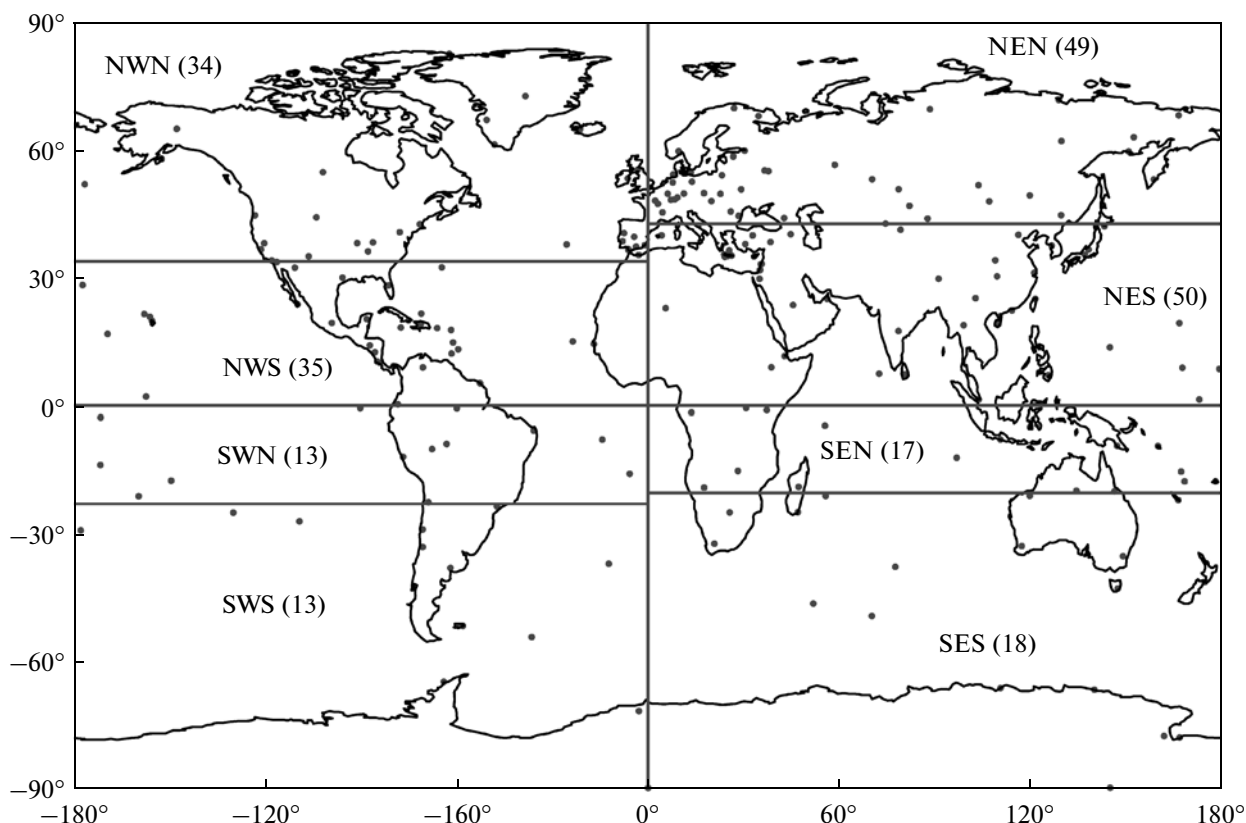
DOI: 10.7868/S0002333714030065

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование характеристик шумов в сложных, в том числе и нелинейных, системах, является одним из наиболее перспективных направлений научных исследований. Подобного рода исследования находятся на стыке различных дисциплин, поскольку в этой области больше общих признаков, чем различий, обусловленных конкретными особенностями изучаемых объектов. В этом смысле изучение такой сложной системы как планета Земля не является исключением. Низкочастотный сейсмический шум, образующийся в результате взаимодействия литосферы, атмосферы и океана, обладает сложной статистической структурой, которая включает в себе информацию о подготовке геокатастроф, в том числе и крупных землетрясений. Связь низкочастотных микросейсм с интенсивностью океанических волн подробно исследована в работах [Berger et al., 2004; Kobayashi, Nishida, 1998; Rhie, Romanowicz, 2004; Tanimoto, 2005]. 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. В работах [Собо-

лев, 2004; Соболев и др., 2005; 2008; Соболев, Любушин, 2006; 2007; Любушин, Соболев, 2006; Соболев, 2008; 2011; Любушин, 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013а; Lyubushin, 2012; 2013а; 2013б] рассматривались различные прогностические свойства низкочастотных сейсмических шумов перед сильнейшими землетрясениями, в том числе перед мега-землетрясениями на Суматре 26 декабря 2004 г. и в Японии 11 марта 2011 г. В этих работах анализировались данные либо от небольшого числа (не более 10) выбранных станций из глобальной сети сейсмических наблюдений, либо от национальной сети широкополосных станций F-net в Японии.

В данной статье совместно анализируются данные от большого числа широкополосных сейсмических станций, покрывающих весь земной шар. Ранее такой анализ был выполнен в работе [Любушин, 2013б] с целью определения областей наибольшей линейной синхронизации параметров сейсмического шума. Целью настоящего исследования является выделение глобальных эффектов синхронизации параметров сейсмического шума в скользящем временном окне для интервала наблюдений 1997–2012 гг. Известно, что начиная с мега-землетрясения на Суматре



**Рис. 1.** Положения 229 широкополосных станций объединения 3-х глобальных сейсмических сетей и их разбиение на 8 групп. В скобках после имени группы указано число станций в группе.

26 декабря 2004 года, на Земле произошла серия сильнейших землетрясений ( $M \geq 8.5$ ), которых не было с начала 1965 г. Таким образом, за последние 10 лет наблюдается значительная активизация сейсмичности. Целью настоящей статьи является выяснение вопроса о том, как эта активизация отражается в синхронизации временных изменений параметров глобального поля сейсмических шумов и в том, наблюдалась ли эта синхронизация до конца 2004 года, то есть можно ли эффекты синхронизации шумов рассматривать как предвестник наблюдаемой вспышки сейсмической активности Земли.

### ДААННЫЕ

Развитие наблюдательной сейсмологии привело к возникновению в конце 1990-х годов уникального инструмента получения информации о процессах в Земле – глобальной сети сейсмических станций IRIS. Данные непрерывных наблюдений на стандартной аппаратуре от различных национальных сетей собираются в одну базу данных и могут быть заказаны и скачены по Интернету любым желающим. Анализировались цифровые записи волновых форм сейсмического шума, которые могут быть заказаны из базы данных

IRIS по адресу: <http://www.iris.edu/forms/webrequest/>. Бралась информация от широкополосных сейсмических станций из объединения 3-х глобальных сейсмических сетей:

Global Seismographic Network: [http://www.iris.edu/mda/\\_GSN](http://www.iris.edu/mda/_GSN)

GEOSCOPE: <http://www.iris.edu/mda/G>

GEOFON: <http://www.iris.edu/mda/GE>

Скачивались данные вертикальных компонент с частотой дискретизации 1 Гц (LHZ-записи) за 16 лет наблюдений, с 01 января 1997 г. по 31 декабря 2012 г. Далее сейсмические записи приводились к шагу по времени 1 мин путем вычисления средних значений в последовательных временных интервалах длиной 60 значений.

На рис. 1 представлены положения 229 широкополосных станций, информация от которых использовалась для анализа свойств сейсмического шума. Совокупность всех станций разбита на 8 групп, которые также представлены на рис. 1 с указанием числа станций в каждой группе. Имена групп станций состоят из 3-х букв, которые имеют следующую мнемонику: “N” – север, “S” – юг, “W” – запад, “E” – восток. Например, группа станций NES означает станции из Северного полушария (первая буква “N”), имеющие восточ-

ные долготы (вторая буква “E”) и их южная часть (третья буква “S”). Принцип разбиения станций на группы был следующий: сначала станции были разбиты по принципу их географического положения на Северное и Южное полушария, которые потом делились на западную и восточную части (по знаку долготы). Таким образом, были получены 4 группы NW, NE, SW, SE. Далее каждая из полученных 4-х групп была разбита на 2 части, северную и южную, граница по широте между которыми выбиралась из условия примерного равенства числа станций в каждой подгруппе.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СТАТИСТИКИ ВОЛНОВЫХ ФОРМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

### Логарифм дисперсии и эксцесс

Наиболее простыми анализируемыми статистиками сейсмического шума являются дисперсия  $Var$  и коэффициент эксцесса  $\kappa$ :

$$Var = \langle (\Delta x)^2 \rangle, \quad \kappa = \frac{\langle (\Delta x)^4 \rangle}{\langle (\Delta x)^2 \rangle^2} - 3. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta x$  – отклонения волновых форм сейсмического шума от тренда,  $\langle \dots \rangle$  – символ вычисления среднего значения по времени. Вычисления величин (1) производились в последовательных временных окнах (без перекрытия), состоящих из фиксированного числа 1440 соседних минутных отсчетов, что составляет одни сутки. Перед вычислением статистик (1) независимо в каждом суточном временном окне производилась операция устранения тренда полиномом 8-го порядка, чтобы избавиться от детерминированных трендов, вызванных влиянием приливных и термических деформаций земной коры и перейти к исследованию характеристик шума. Таким образом, для каждой станции получался временной ряд значений  $Var$  и  $\kappa$  с шагом по времени 1 сутки. На рис. 2а представлены графики ежесуточных медиан значений логарифма дисперсии  $\lg(Var)$ , вычисленных для каждой из 8 групп станций, представленных на рис. 1. Медиана является способом усреднения по всем станциям в группе, устойчивая по отношению к выбросам, которые характерны для значений дисперсии. По этой причине далее анализировались медианы логарифмов дисперсий.

Коэффициент эксцесса  $\kappa$  является мерой отклонения распределения величины  $\Delta x$  от гауссовского, для которого  $\kappa = 0$  [Вадзинский, 2001]. Формально могут быть значения  $\kappa < 0$ , однако для анализируемых данных низкочастотного сейсмического шума в подавляющем числе случаев  $\kappa > 0$ , причем значения эксцесса часто были много больше 1. Поэтому на рис. 2б для большей наглядности представлены медианы по группам станций для коэффициента эксцесса в логариф-

мическом масштабе (отрицательные значения  $\kappa$  опускались).

### Минимальная нормализованная энтропия вейвлет-коэффициентов $En$

Нормализованная энтропия вейвлет-коэффициентов конечной выборки определяется формулой:

$$En = - \sum_{k=1}^N p_k \lg(p_k) / \lg(N), \quad (2)$$

$$p_k = c_k^2 / \sum_{j=1}^N c_j^2, \quad 0 \leq En \leq 1.$$

Здесь  $c_k$ ,  $k = 1, N$  – коэффициенты ортогонального вейвлет-разложения с некоторым базисом. Ниже использовались 17 ортогональных вейвлетов Добеши: 10 обычных базисов с минимальным носителем с числом обнуляемых от 1 до 10 и 7 так называемых симлетов Добеши [Mallat, 1998], с числом обнуляемых моментов от 4 до 10. Для каждого из базисов вычислялась нормализованная энтропия распределения квадратов коэффициентов (2) и находился базис, обеспечивающий минимум величине (2). Первоначально минимальная величина (2) рассматривалась как побочный продукт поиска наилучшего оптимального базиса ортогональных вейвлетов, однако потом было замечено, что эта величина обладает прогностическими свойствами и ее повышенные значения позволяют выделить сейсмоопасные области [Любушин, 2013а; 2013б; Lyubushin, 2012; 2013].

Заметим, что в силу ортогональности вейвлет-преобразования сумма квадратов коэффициентов равна дисперсии (энергии) сигнала  $X(t)$ . Таким образом, величина (2) вычисляет энтропию распределения энергии колебаний на различных пространственных и временных масштабах.

Аналогично величинами (1), оценка  $En$  производилась в последовательных суточных временных окнах с предварительным устранением трендов полиномом 8-го порядка. Таким образом, для каждой станции получался временной ряд значений минимальной нормализованной энтропии  $En$ ,  $0 \leq En \leq 1$ , с шагом по времени 1 сутки.

### Ширина носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$

Рассмотрим некоторое случайное колебание  $X(t)$  на интервале времени  $[t - \delta/2, t + \delta/2]$  длиной  $\delta$  с центром во временной точке  $t$ . Рассмотрим размах  $\mu(t, \delta)$  случайного колебания на этом интервале, то есть разницу между максимальным и минимальным значениям:

$$\mu(t, \delta) = \max_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} X(s) - \min_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} X(s). \quad (3)$$

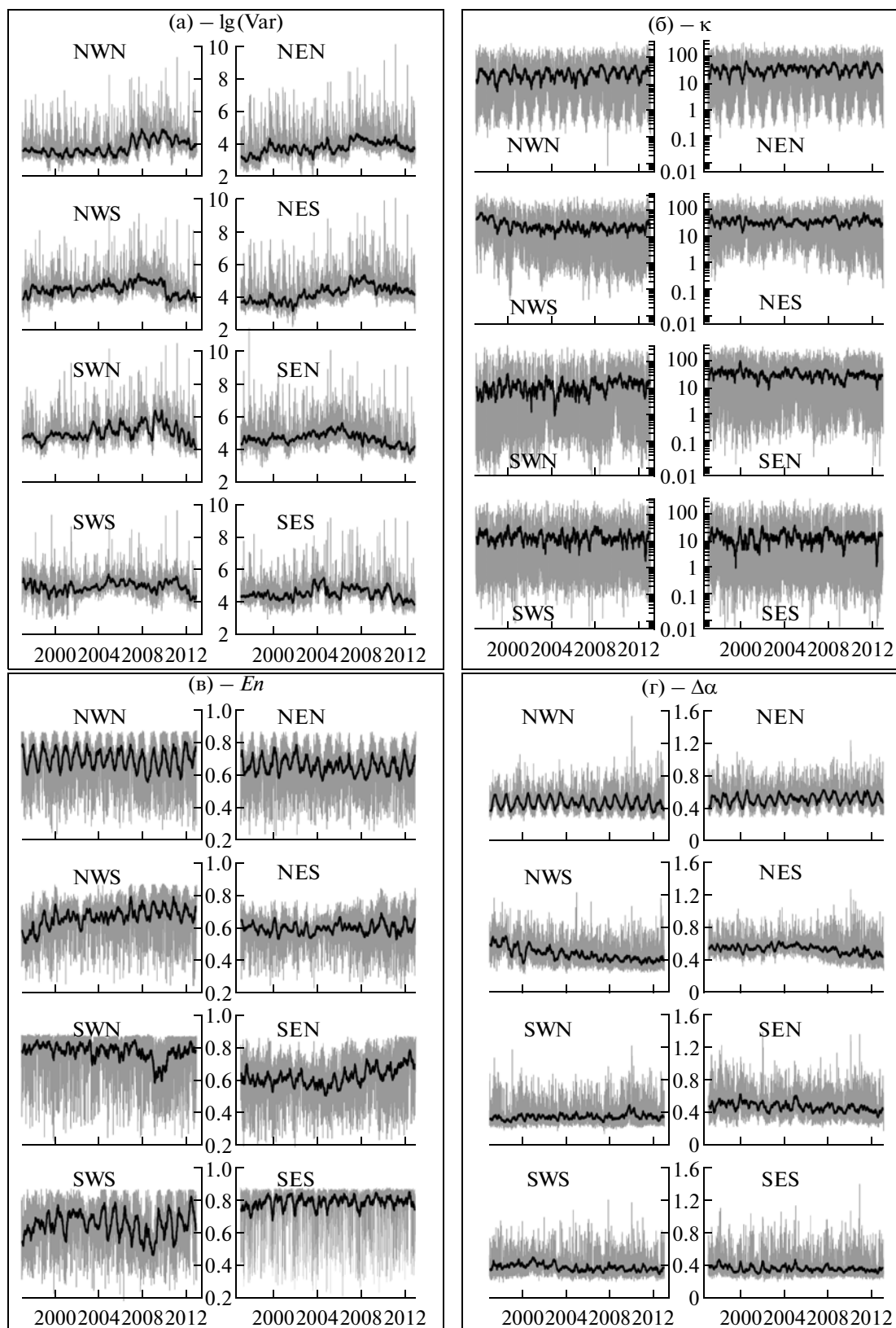


Рис. 2. Серые линии – графики ежесуточных медиан 4-х свойств сейсмического фона, вычисленных для 8 групп станций (рис. 1). Толстые черные линии – средние значения в скользящем временном окне длиной 57 суток.

Если устремить  $\delta \rightarrow 0$ , то  $\mu(t, \delta)$  будет также стремиться к нулю, но здесь важна скорость этого убывания. Если скорость определяется законом  $\delta^{h(t)}$ :  $\mu(t, \delta) \sim \delta^{h(t)}$  или если существует предел  $h(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg(\mu(t, \delta))}{\lg(\delta)}$ , то величина  $h(t)$  называется экспонентой Гельдера–Липшица. Если величина  $h(t)$  не зависит от момента времени  $t$ :  $h(t) = \text{const} = H$ , то случайное колебание  $X(t)$  называется моно-фрактальным, а величина  $H$  – экспонентой Херста. Если же экспоненты Гельдера–Липшица  $h(t)$  существенно различаются для разных моментов времени  $t$ , то случайное колебание называется мульти-фракталом и для него можно определить понятие спектра сингулярности  $F(\alpha)$  [Feder, 1991]. Для этого мысленно выделим множество  $C(\alpha)$  таких моментов времени  $t$ , которые имеют одно и то же значение  $\alpha$  экспоненты Гельдера–Липшица:  $h(t) = \alpha$ . Множества  $C(\alpha)$  существуют (то есть содержат какие-то элементы, не являющиеся пустыми множествами) не для всех значений  $\alpha$ , то есть существуют некоторые минимальное  $\alpha_{\min}$  и максимальное  $\alpha_{\max}$ , такие, что лишь для  $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$  множества  $C(\alpha)$  непустые. Мульти-фрактальный спектр сингулярности  $F(\alpha)$  – это фрактальная размерность множества точек  $C(\alpha)$ . Параметр  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , называемый шириной носителя спектра сингулярности, представляется наиболее важной мульти-фрактальной характеристикой и является мерой разнообразия случайного поведения сигнала.

Кроме того, значительный интерес представляет аргумент  $\alpha^*$ , доставляющего максимум спектру сингулярности:  $F(\alpha^*) = \max_{\alpha_{\max} \leq \alpha \leq \alpha_{\min}} F(\alpha)$ , называемый обобщенным показателем Херста. Максимум спектра сингулярности не может превосходить 1 – размерности вмещающего множества или оси времени,  $0 < F(\alpha^*) \leq 1$ , обычно  $F(\alpha^*) = 1$ . Для моно-фрактального сигнала  $\Delta\alpha = 0$ ,  $\alpha^* = H$ . В работах [Любушин, Соболев, 2006; Любушин, 2008] вариации величины  $\alpha^*$  при оценке в скользящем временном окне использовались для поиска эффектов синхронизации параметров сейсмического шума перед сильными землетрясениями. В данной статье  $\alpha^*$  не будет использоваться, так как результаты его анализа качественно очень похожи на результаты анализа параметра  $\Delta\alpha$ .

Области минимальных значений величины  $\Delta\alpha$  позволяют выделить сейсмически опасные регионы, а статистически значимое уменьшение среднего уровня  $\Delta\alpha$  дало возможность сделать вывод о приближении Великого Японского землетрясения 11 марта 2011 года за 2.5 года до события [Любушин, 2009–2012]. Статистики  $\Delta\alpha$  и  $En$  являются антиподами и взаимно дополняют друг друга при динамической оценке сейсмической опасности по

свойствам шума [Любушин, 2013а; 2013б; Lyubushin, 2012; 2013].

Оценки мульти-фрактальных характеристик сейсмического шума осуществлялась для одно-минутных данных в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки. Использовался метод, основанный на анализе флуктуаций после устранения масштабно-зависимых трендов [Kantelhardt et al., 2002]. Для удаления трендов использовались локальные полиномы 8-го порядка. Детали вычисления мульти-фрактальных статистик шума подробно изложены в работах [Любушин, 2007–2011] и ниже будут опущены.

Таким образом, точно так же как и для значений  $\lg(\text{Var})$ ,  $k$  и  $En$ , от каждой станции получались временные ряды значений  $\Delta\alpha$  с шагом по времени 1 сутки.

На рис. 2 представлены графики ежесуточных медиан статистик  $\lg(\text{Var})$ ,  $k$ ,  $En$  и  $\Delta\alpha$  для каждой из 8 групп станций на рис. 1 вместе с графиками их скользящих средних во временном окне длиной 57 суток. На графиках усредненных значений заметны сезонные вариации для некоторых групп станций, особенно для групп станций NEN и NWN. Далее нас будут интересовать эффекты когерентного поведения компонент четырех 8-мерных временных рядов, представленных на рис. 2а–2г.

## СПЕКТРАЛЬНАЯ МЕРА КОГЕРЕНТНОСТИ

Для выделения эффектов синхронного поведения средних значений параметров сейсмического фона от различных групп станций (рис. 1, рис. 2) глобальной сейсмической сети, используется спектральная мера когерентности, предложенная в работе [Любушин, 1998]. Многочисленные примеры приложения этой меры не только в физике твердой Земли, но и в гидрологии, метеорологии и климатических исследованиях имеются в [Любушин и др., 2003; 2004; Любушин, 2007; Любушин, Соболев, 2006; Соболев, Любушин, 2007; Любушин, 2008; Lyubushin, Klyashtorin, 2012]. В работах [Любушин, 1998; 2007] изложены все технические детали вычислений, которые здесь опущены. Спектральная мера когерентности  $v(\tau, \omega)$  строится как модуль произведения покомпонентных канонических когерентностей

$$v(\tau, \omega) = \prod_{j=1}^m |\mu_j(\tau, \omega)|. \quad (4)$$

Здесь  $m \geq 2$  – общее число совместно анализируемых временных рядов (размерность многомерного временного ряда),  $\omega$  – частота,  $\tau$  – временная координата правого конца скользящего временного окна, состоящего из определенного числа смежных отсчетов,  $\mu_j(\tau, \omega)$  – каноническая когерентность  $j$ -го скалярного временного ряда,

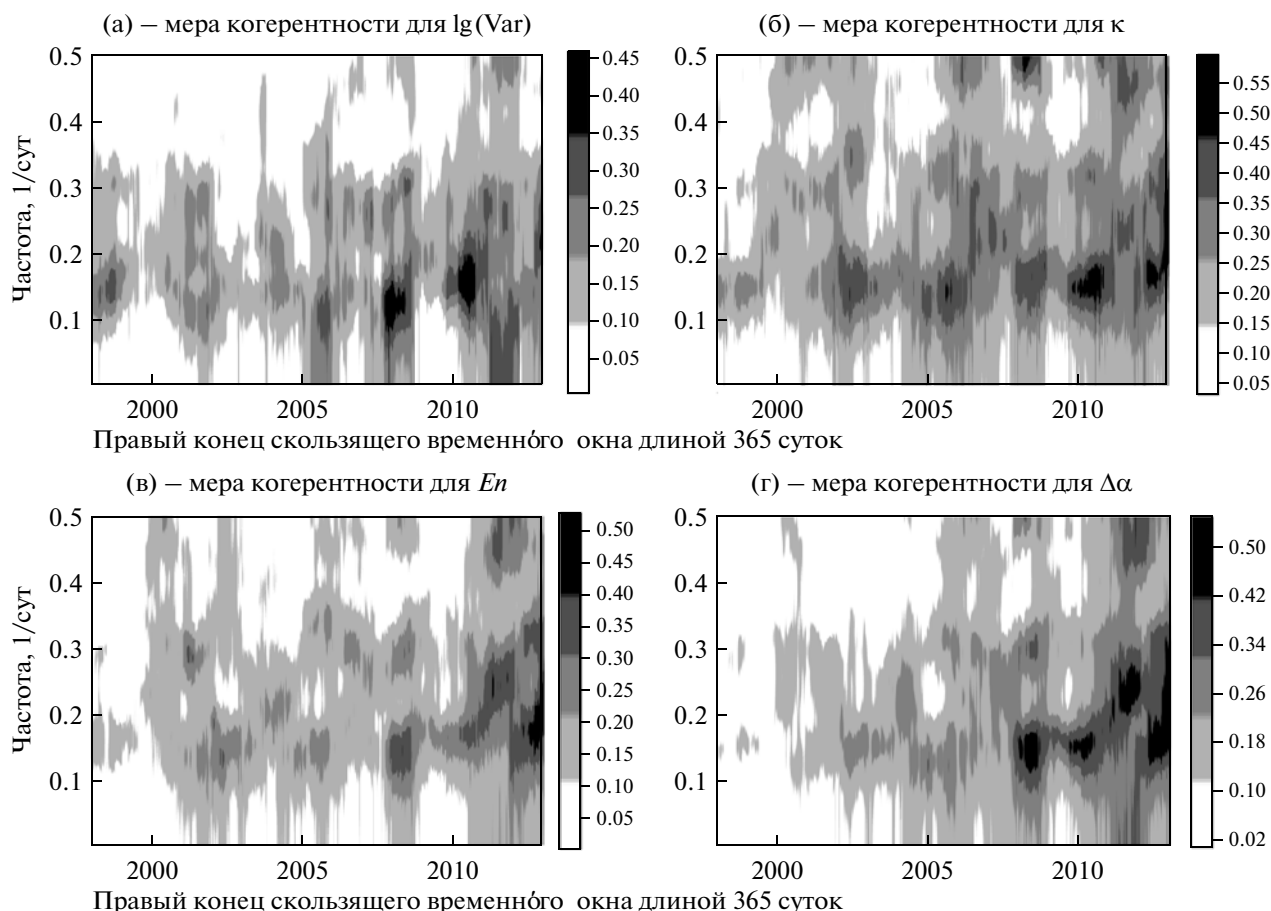
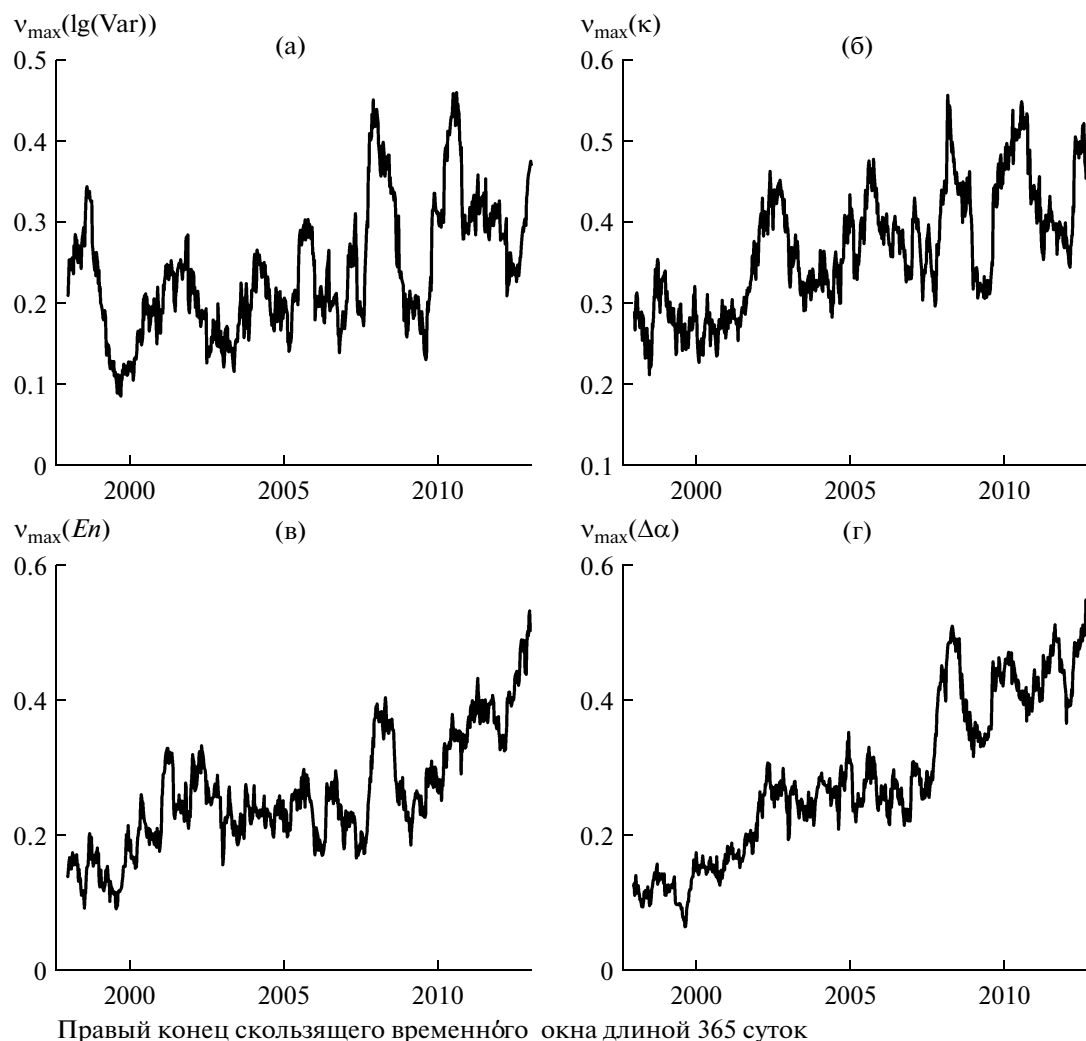


Рис. 3. Частотно-временная диаграмма изменения спектральной меры когерентности (формула (4)) для медиан 4-х свойств сейсмического шума из 8 групп станций (рис. 2).

которая описывает силу связанности этого ряда со всеми прочими рядами. Величина  $|\mu_j(\tau, \omega)|^2$  является обобщением обычного квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами на случай, когда второй сигнал является не скалярным, а векторным. Выполняется неравенство  $0 \leq |\mu_j(\tau, \omega)| \leq 1$  и чем ближе значение  $|\mu_j(\tau, \omega)|$  к единице, тем сильнее линейно связаны вариации на частоте  $\omega$  во временном окне с координатой  $\tau$   $j$ -ого ряда с аналогичными вариациями во всех прочих рядах. Соответственно величина  $0 \leq v(\tau, \omega) \leq 1$  в силу своего построения описывает эффект совокупного когерентного (синхронного, коллективного) поведения всех сигналов. Заметим, что, в силу построения, значение величины  $v(\tau, \omega)$  принадлежат интервалу  $[0, 1]$  и чем ближе соответствующее значение к единице, тем сильнее связь между вариациями компонент многомерного временного ряда на частоте  $\omega$  для временного окна с координатой  $\tau$ . Следует подчеркнуть, что сравнение абсолютных значений статистики  $v(\tau, \omega)$  возможно лишь для одного и того же числа  $m$  одновременно обрабатываемых

временных рядов — поскольку, в силу формулы (4), при росте  $m$  величина  $v$  убывает, как произведение  $m$  величин, меньших единицы. Если рассматриваются лишь 2 временных ряда,  $m = 2$ , то функция (4) становится обычным квадратичным спектром когерентности (частотно зависимым квадратом коэффициента корреляции).

В нашем случае число одновременно анализируемых временных рядов  $m = 8$ . Для оценки спектральной матрицы многомерных временных рядов использовалась векторная авторегрессионная модель 5-го порядка [Marple, 1987]. Оценки производились в скользящем временном окне длиной 365 суток со взаимным смещением 7 суток. Выбор годового временного окна связан с необходимостью усреднять влияние сезонных вариаций параметров шума, которые особенно ярко видны на рис. 2 для групп станций NEN и NWN. Важно отметить, что перед вычислением спектральной матрицы в каждом временном окне независимо производится следующая последовательность предваряющих операций для каждой скалярной компоненты многомерного временного ряда. Прежде всего, устранялся общий линейный тренд



**Рис. 4.** Максимальные по частоте значения спектральной меры когерентности (формула (5)), вычисленные для диаграмм на рис. 3.

и производился переход к приращениям. Далее осуществлялась винзоризация [Huber, 1981]: итеративно вычислялись выборочные значения среднего и стандартного отклонения  $\sigma$ , из выборки среднее значение вычиталось, после чего отсчеты делились на  $\sigma$  и все значения, выходящие за пороги  $\pm 3\sigma$ , заменялись на эти пороговые значения. Итерации повторялись до тех пор, пока  $\sigma$  не переставала меняться. Эти операции обеспечивают устойчивость оценки меры когерентности по отношению к выбросам.

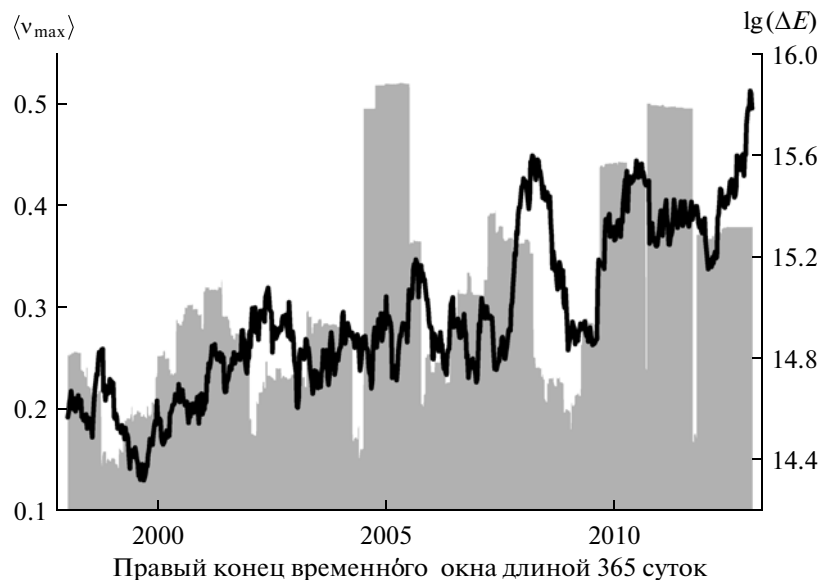
Помимо частотно-временной зависимости  $v(\tau, \omega)$  ниже используется чисто временная мера максимальной по всем частотам меры когерентности в текущем временном окне с координатой  $\tau$ :

$$v_{\max}(\tau) = \max_{\omega} v(\tau, \omega). \quad (5)$$

Заметим, что величина (5) является своего рода аналогом множественного коэффициента корреляции, вычисляемого в скользящем временном окне. Однако, в силу того, что максимум в (5) берется по частотам, этот коэффициент учитывает временные сдвиги между скалярными компонентами многомерного временного ряда внутри текущего временного окна. Таким образом, получаются 4 максимальные меры когерентности как функции от временной координаты правого конца скользящего временного окна:  $v_{\max}(\tau | \lg(Var))$ ,  $v_{\max}(\tau | \kappa)$ ,  $v_{\max}(\tau | En)$  и  $v_{\max}(\tau | \Delta\alpha)$ , графики которых представлены на рис. 4.

Рассмотрим также среднее от максимальных по частоте значений мер когерентности:

$$\langle v_{\max}(\tau) \rangle = (v_{\max}(\tau | \lg(Var)) + v_{\max}(\tau | \kappa) + v_{\max}(\tau | En) + v_{\max}(\tau | \Delta\alpha)) / 4. \quad (6)$$



**Рис. 5.** Среднее значение максимальных по частоте спектральных мер когерентности (формула (6), черная линия) на фоне графика значений  $\lg(\Delta E)$  – логарифма среднего значения выделившейся сейсмической энергии (джоули) в скользящем временном окне длиной 365 суток (серый заштрихованный график).

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

На рис. 3 представлены частотно-временные диаграммы спектральной меры когерентности (4) для вариаций исследуемых параметров сейсмического шума (рис. 2). Видно, что они характеризуются всплесками когерентности с нарастающей амплитудой, причем максимумы всплесков когерентности приходятся на диапазон периодов от 5 до 10 суток. На рис. 4 представлены максимумы по частоте (формула (5)) и там заметно постепенное увеличение среднего уровня синхронизации, особенно для мульти-фрактального параметра  $\Delta\alpha$ .

Рис. 5 представляет график изменения средней величины по всем анализируемым параметрам максимальных по частотам мер когерентности (формула (6)). Этот график построен на фоне изменения логарифма среднего значения выделившейся сейсмической энергии  $\lg(\Delta E)$  в скользящем временном окне длиной 365 суток. График выделения сейсмической энергии построен на основе информации в глобальном каталоге сейсмических событий по адресу: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>.

Сопоставление графиков  $\langle v_{\max}(\tau) \rangle$  и  $\lg(\Delta E)$  на рис. 5 дает возможность сделать вывод, что связь между уровнем синхронизации параметров сейсмического шума и выделением сейсмической энергии не является линейной и однозначной: всплеск выделившейся сейсмической энергии  $\lg(\Delta E)$  не влечет за собой автоматически увеличение средней синхронизации, иногда даже наоборот. График изменения усредненной меры син-

хронизации  $\langle v_{\max}(\tau) \rangle$  подтверждает наличие глобального эффекта увеличения синхронизации сейсмического шума вплоть до конца 2012 г.

Изменение средних мер синхронизации на рис. 4 и рис. 5 не носит монотонного характера и содержит ряд локальных минимумов и максимумов. Возникает вопрос, в какой мере эти осцилляции являются естественными, а не возникшими в результате техногенных причин, таких как временное прекращение и возобновление функционирования отдельных станций, а также введение в строй новых станций. Здесь следует подчеркнуть, что именно для минимизации влияния техногенных причин в статье рассматривались медианы характеристик шума от каждой из 8 групп, то есть наиболее типичные значения статистик от каждой группы станций, устойчивые к выбросам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В таблице приведена информация о 17 сильнейших землетрясениях с начала 20-го века. Из этих 17 сейсмических событий 6 произошло на менее чем 10 лет, начиная с конца 2004 г. В промежутки времени с февраля 1965 г. по конец 2004 г., почти за 40 лет, таких землетрясений не было вовсе.

Таким образом, можно выдвинуть гипотезу, что нарастание среднего уровня синхронизации параметров глобального поля сейсмических шумов за всю историю сейсмического мониторинга с начала 1997 г. предвещало всплеск сейсмической активности с конца 2004 г. по текущее время. Следует также отметить, что рост среднего уровня



Сильнейшие землетрясения,  $M \geq 8.5$ , с начала 20-го века

Источник: [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10\\_largest\\_world.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10_largest_world.php)

Дата	Магнитуда	Широта	Долгота	Дата	Магнитуда	Широта	Долгота
1906.01.31	8.8	1	-81.5	1964.03.28	9.2	61.02	-147.65
1922.11.11	8.5	-28.55	-70.5	1965.02.04	8.7	51.21	178.5
1923.02.03	8.5	54	161	2004.12.26	9.1	3.3	95.78
1938.02.01	8.5	-5.05	131.62	2005.03.28	8.6	2.08	97.01
1950.08.15	8.6	28.5	96.5	2007.09.12	8.5	-4.438	101.367
1952.11.04	9.0	52.76	160.06	2010.02.27	8.8	-35.846	-72.719
1957.03.09	8.6	51.56	-175.39	2011.03.11	9.0	38.322	142.369
1960.05.22	9.5	-38.29	-73.05	2012.04.11	8.6	2.311	93.063
1963.10.13	8.5	44.9	149.6				

синхронизации наблюдается за весь анализируемый период наблюдений, причем к концу 2012 г. средняя мера синхронизации достигла максимума. Последнее может быть предвестником дальнейшего роста интенсивности сильнейших сейсмических событий, подобно тому, как это произошло в 1950–1965 гг.

Работа выполнена при поддержке Миннауки РФ, проект ГК № 11.519.11.5024, Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-05-00146 и гранта программы государственной поддержки ведущих научных школ России НШ-5583.2012.5 “Физика и прогноз землетрясений”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вадзинский Р.Н.* Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука. 2001. 295 с.
- Любушин А.А.* Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга // *Физика Земли*. 1998. № 1. С. 59–66.
- Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Болгов М.В., Рукавишников Т.А.* Исследование общих эффектов вариаций стока рек // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 7. С. 76–88.
- Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Болгов М.В., Родкин М.В., Рукавишников Т.А.* Синхронные вариации уровня Каспийского моря по береговым наблюдениям, 1977–1991 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40. № 6. С. 821–831.
- Любушин А.А., Соболев Г.А.* Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 18–28.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука. 2007. 228 с.
- Любушин А.А.* Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // *Физика Земли*. 2008. № 4. С. 17–34.
- Любушин А.А.* Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // *Физика Земли*. 2009. № 5. С. 15–28.
- Любушин А.А.* Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // *Физика Земли*. 2010. № 6. С. 86–96.
- Любушин А.А.* Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // *Физика Земли*. 2011а. № 6. С. 26–34.
- Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011б. Т. 10. № 1. С. 9–35.
- Любушин А.А.* Прогноз Великого Японского землетрясения // *Природа*. 2012. № 8. С. 23–33.
- Любушин А.А.* Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // *Физика Земли*. 2013а. № 1. С. 11–20.
- Любушин А.А.* Карты линейной синхронизации свойств глобального поля низкочастотных сейсмических шумов // *Геофизические исследования*. 2013б. Т. 14. № 1. С. 41–53.
- Соболев Г.А.* Вариации микросейсм перед сильными землетрясениями // *Физика Земли*. 2004. № 6. С. 3–13.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2005. № 8. С. 3–27.
- Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 5–17.
- Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 года на Суматре // *Физика Земли*. 2007. № 5. С. 3–16.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Асимметричные импульсы, периодичности и синхронизация низкочастотных микросейсм // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 2. С. 135–152.
- Соболев Г.А.* Серии асимметричных импульсов в минутном диапазоне микросейсм как индикаторы метастабильного состояния сейсмоактивных зон // *Физика Земли*. 2008. № 4. С. 3–16.

- Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН. 2011. 56 с.
- Соболев Г.А.* Низкочастотный сейсмический шум перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. с магнитудой 9 // Физика Земли. 2011. № 12. С. 11–22.
- Berger J., Davis P., Ekstrom G.* Ambient Earth Noise: a survey of the Global Seismographic Network // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. B11307.
- Feder J.* *Fractals*. Plenum Press, New York, London. 1988 (Русский перевод: *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир. 1991. 254 с.)
- Huber P.J.* Robust statistics. John Wiley and Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto. 1981. (Русский перевод: Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир. 1984. 303 с.)
- Kantelhardt J.W., Zschiegner S.A., Konsciency-Bunde E., Havlin S., Bunde A., Stanley H.E.* // Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. Physica A. 2002. V. 316. P. 87–114.
- Kobayashi N., Nishida K.* Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances // Nature. 1998. V. 395. P. 357–360.
- Lyubushin A.A., Klyashtorin L.B.* Short term global  $dT$  prediction using (60–70)-years periodicity // Energy & Environment. 2012. V. 23. № 1. P. 75–85.
- Lyubushin A.* Prognostic properties of low-frequency seismic noise // Natural Science. 2012. V. 4. № 8A. P. 659–666. doi: 10.4236/ns.2012.428087.  
<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=21656>
- Lyubushin A.A.* Spots of Seismic Danger Extracted by Properties of Low-Frequency Seismic Noise. European Geosciences Union General Assembly 2013. Vienna. 07–12 of April, 2013. Geophysical Research Abstracts. V. 15. EGU2013-1614. 2013.  
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-1614-1.pdf>
- Mallat S.* A wavelet tour of signal processing. Academic Press. San Diego, London, Boston, N.Y., Sydney, Tokyo, Toronto. 1998. 577 p. (Русский перевод: Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир. 2005. 671 с.)
- Marple S.L.(Jr.)* (1987) Digital spectral analysis with applications. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (Русский перевод: *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. 1990. 584 с.)
- Rhie J., Romanowicz B.* Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // Nature. 2004. V. 431. P. 552–554.
- Tanimoto T.* The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth // Geophys. J. Int. 2005. V. 160. P. 276–288.