

УДК 550.334

## АНАЛИЗ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ДАЛ ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНИТЬ МАГНИТУДУ, ВРЕМЯ И МЕСТО СЕЙСМИЧЕСКОЙ КАТАСТРОФЫ В ЯПОНИИ 11 марта 2011 г.

© 2011 г. А.А. Любушин

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

Анализ данных микросейсмического шума широкополосной сети F-net позволил еще в 2008 г. выдвинуть гипотезу о приближении Японских островов к крупной сейсмической катастрофе, признаком которой является статистически значимое уменьшение ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности. По мере поступления данных были получены новые результаты, свидетельствующие о все большей синхронизации параметров микросейсмического фона и, таким образом, о постоянном повышении сейсмической опасности. Анализ свойств кластеризации параметров фона позволил сделать вывод, что именно с середины 2010 г. Японские острова вступают в опасную фазу развития сейсмического процесса. Оценка пространственного распределения ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности дает оценку места будущей катастрофы.

**Ключевые слова:** синхронизация, микросейсмический фон, предвестники землетрясений.

### Введение

11 марта 2011 г. в Японии произошло катастрофическое землетрясение магнитудой  $M_w = 9.0$ , сопровождавшееся цунами. В результате этого стихийного бедствия погибли и пропали без вести в общей сложности около 30 тыс. человек, стране нанесен огромный материальный ущерб, исчисляемый сотнями миллионов долларов США.

Землетрясение стало знаменательным событием и в научном плане, поскольку в данном случае был сделан заблаговременный научный прогноз времени и силы ожидаемой сейсмической катастрофы. Он базировался на результатах анализа данных регистрации микросейсмических шумов широкополосной сейсмической сетью F-net в Японии, которые позволили автору еще в середине 2008 г. сделать вывод о подготовке сейсмической катастрофы в районе Японских островов, при этом магнитуда будущего землетрясения оценивалась как  $M \geq 8.3$ . По мере обработки вновь поступающих данных оценки становились более определенными, и в конце 2009 г. появилась возможность оценить время возникновения сильнейшего землетрясения. В итоге был дан уточненный прогноз, обозначивший середину 2010 г. как начало периода ожидания сейсмической катастрофы магнитудой  $M = 8.5-9.0$ .

Важно подчеркнуть, что этот прогноз задолго до возникновения предсказанного события был опубликован в нескольких статьях и тезисах международных конференций [Любушин, 2009, 2010, 2011; Lyubushin, 2008, 2010], причем рукопись статьи [Любушин, 2011] была сдана в редакцию журнала почти за год до катастрофы – в конце апреля 2010 г. Сделанный прогноз был также зафиксирован в заявке, поданной в Российский экспертный совет по прогнозу землетрясений и сейсмической опасности 26 апреля 2010 г.

В настоящей статье излагаются основные идеи и этапы анализа данных регистрации микросейсмических шумов широкополосной сейсмической сетью F-net в Японии. Приводятся основные результаты обработки и представления данных, которые позволили сначала сформулировать прогноз о подготовке катастрофы, а потом дать оценку времени сильнейшего землетрясения. Отличительная особенность настоящей статьи

состоит в том, что в ней впервые представлены ранее не публиковавшиеся данные о сделанном авторе ретроспективном прогнозе места возникновения катастрофического землетрясения. Этот результат, несмотря на его ретроспективный характер, представляется автору весьма важным, поскольку убедительно демонстрирует широкие возможности описанного в работе метода при его применении для предсказания всех трех необходимых составляющих важного для практических целей прогноза разрушительных землетрясений – места, силы и времени.

### Использованные данные и метод их анализа

Для мониторинга состояния среды в районе Японии использовались низкочастотные микросейсмические колебания, содержащие важную информацию о процессах в земной коре, несмотря на то, что их основная энергия обусловлена процессами в атмосфере и океане – вариациями атмосферного давления и воздействием океанических волн на берег и шельф. Фактически земная кора является средой распространения энергии от атмосферных и океанических процессов. Поскольку передаточные свойства коры зависят от ее состояния, можно ожидать, что статистические свойства микросейсмических колебаний отражают изменения свойств литосферы.

Данные широкополосной сейсмической сети F-net свободно доступны в интернете по адресу <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en>. Общее число станций равно 83. Наблюдения ведутся с 1997 года по настоящее время. Анализируемые данные – вертикальные компоненты с шагом по времени 1 с. Далее рассматривались лишь станции, расположенные выше 30° с.ш., что исключает из анализа данные 6 уединенных станций, расположенных на удаленных небольших островах. Данные остальных 77 станций анализируются либо в совокупности, либо после разбиения их на 5 групп, содержащих примерно одинаковое число станций [Любушин, 2010, 2011].

Далее, при описании прогноза японской катастрофы, будут использованы следующие термины: 1) параметр  $\Delta\alpha$  – ширина носителя мультифрактального спектра сингулярности; 2) параметр  $\alpha^*$  – обобщенный показатель Херста; 3) параметр  $\rho$  – индекс линейной предсказуемости; 4) параметр  $\kappa$  – множественный коэффициент корреляции; 5) параметр  $\mu$  – кластерная экспонента.

Подробное изложение их определений и способов их вычислений по данным мониторинга можно найти в работах [Любушин, 2007, 2009, 2010, 2011], здесь лишь поясним их смысл. Параметры  $\Delta\alpha$  и  $\alpha^*$  характеризуют различные качества случайных сейсмических колебаний на сети станций в Японии. Обобщенный показатель Херста описывает закон убывания размаха случайных колебаний на временном интервале при уменьшении длины этого интервала. Величина  $\Delta\alpha$  отражает степень разнообразия случайного поведения сигнала и поэтому, косвенно, уменьшение  $\Delta\alpha$  является признаком подавления определенных степеней свободы среды, уменьшения их числа.

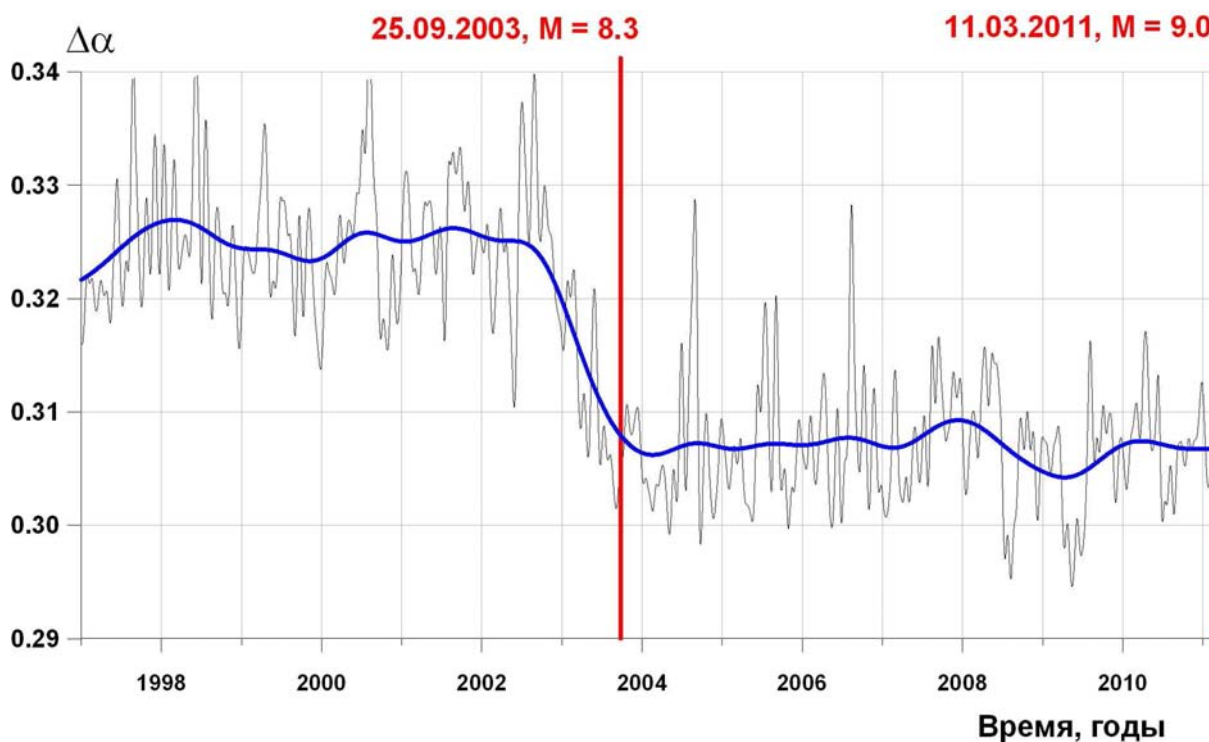
Индекс линейной предсказуемости  $\rho$  дает меру того, насколько легко можно предсказать случайные сейсмические колебания на 1 шаг вперед: если  $\rho > 0$ , то колебания сравнительно просто предсказуемы и чем больше величина  $\rho$ , тем лучше можно предсказать следующее значение сейсмических колебания по некоторому числу предыдущих значений. Таким образом, величина  $\rho$  описывает сложность случайных колебаний: чем больше  $\rho$ , тем колебания проще устроены.

Коэффициент множественной корреляции  $\kappa$ ,  $0 \leq \kappa \leq 1$ , представляет собой обобщение обычного коэффициента корреляции между двумя наборами данных на случай, когда таких наборов больше 2. Наконец, кластерная экспонента  $\mu$  возникает при рассмотрении того, насколько хорошо двухгодичное облако из 7 параметров микросейсмического шума,

вычисляемых каждый день (т.е. всего в двухгодичном скользящем временном окне находится 730 таких 7-мерных векторов), разбивается на число групп (кластеров), варьируемых от максимального количества 40 до минимального 1 [Любушин, 2011].

### Результаты анализа данных до 11 марта 2011 года: прогноз магнитуды и времени возникновения будущего землетрясения

На рис. 1 представлены графики сглаженных значений параметра  $\Delta\alpha$ , усредненных по значениям от всех станций сети, для исходных данных с шагом по времени 1 с в последовательных временных интервалах длиной 30 мин. Представлены кривые, сглаженные в окне 27 сут (тонкая линия) и 1 год (толстая линия). Важная особенность поведения сглаженных в 1-годовом окне значений  $\Delta\alpha$  заключается в существенном падении среднего значения, которое началось в 2003 г. примерно за полгода до сильного землетрясения в районе о-ва Хоккайдо, причем достигнутый средний уровень после этого землетрясения уже не восстанавливается до прежнего значения вплоть до катастрофы 11 марта 2011 г. Видно, что величина падения среднего значения  $\Delta\alpha$  не зависит от выбора группы кластеров.



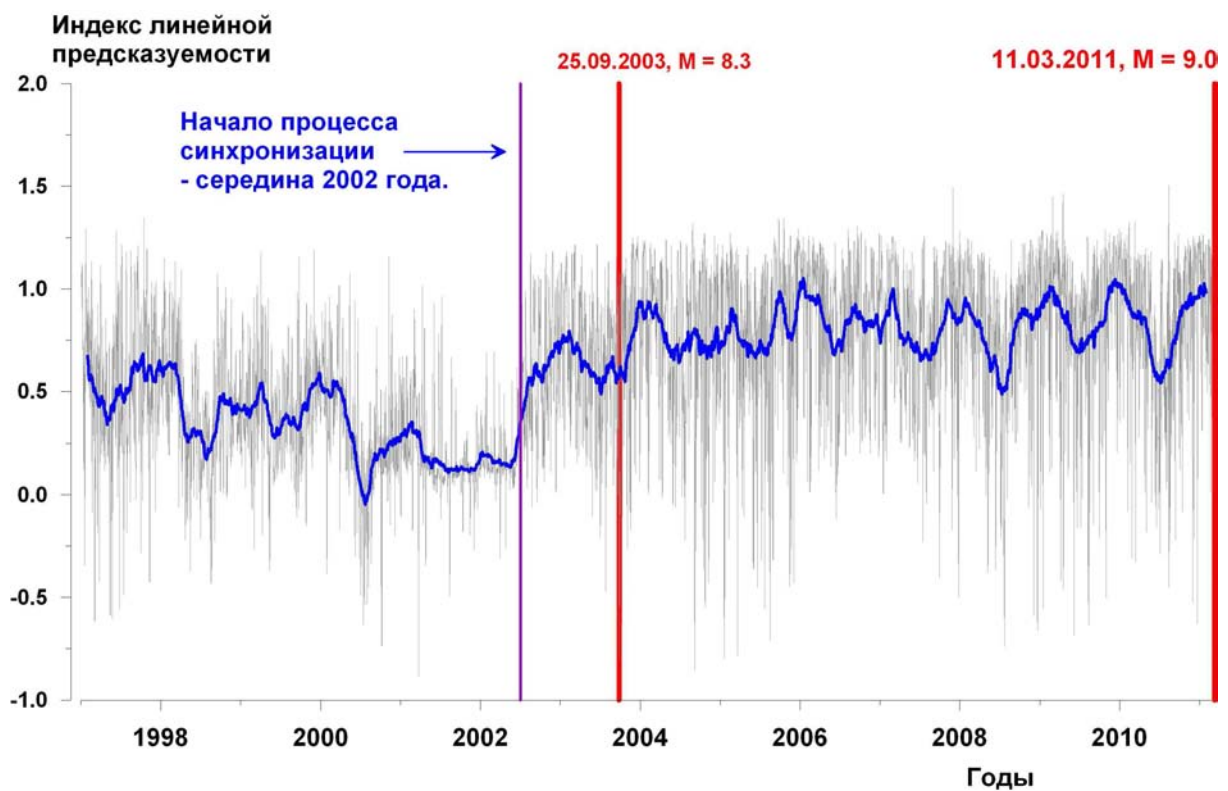
**Рис. 1.** Сглаженные кривые значений  $\Delta\alpha$  в последовательных временных окнах длиной 30 мин для исходных записей вертикальной компоненты микросейсмических колебаний частотой 1 Гц. Тонкая черная линия – сглаживание в окне радиуса 13 сут; толстая синяя линия – сглаживание в окне радиусом 0.5 года. Вертикальные линии на этом и последующих рисунках отмечают землетрясения:  $M = 8.3$ , 25 сентября 2003 г. и  $M = 9.0$ , 11 марта 2011 г.

Этот эффект впервые был опубликован для всех станций сети в работе [Lyubushin, 2008], но его интерпретация была сформулирована несколько позже. Аналогии с поведением нелинейных связанных систем свидетельствуют о том, что параметр  $\Delta\alpha$  косвенно описывает синхронизацию поведения частей, вместе составляющих одну сложную систему [Pavlov et al., 2003; Ziganshin, Pavlov, 2005]. Исходя из известного положения теории катастроф, что синхронизация является одним из флагов приближаю-

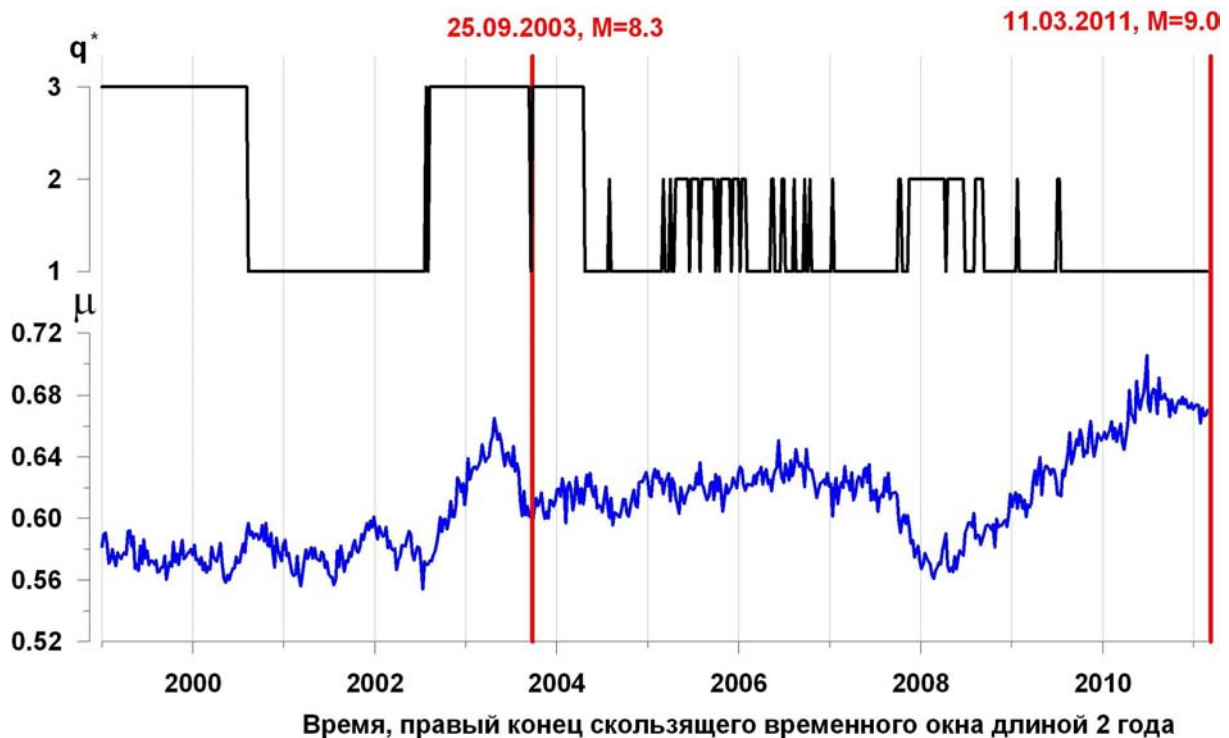
шейся катастрофы [Gilmore, 1981], в работах [Lyubushin, 2008, 2010; Любушин, 2009] был сформулирован вывод, что землетрясение в районе о-ва Хоккайдо, несмотря на значительную силу ( $M = 8.3$ ), может быть всего лишь форшоком еще более сильного землетрясения, готовящегося в районе Японских островов. Качественная оценка магнитуды будущего толчка как 8.5–9.0 базировалась лишь на здравом смысле: нижняя граница ( $M = 8.5$ ) основана на предположении, что магнитуда главного толчка должна быть больше магнитуды форшока, а верхняя ( $M = 9.0$ ) выбрана из соображений, что “больше не бывает”.

Последующие рисунки описывают результаты, полученные для сейсмических записей после перехода от исходных 1-секундных данных к 1-минутным путем вычисления средних значений в последовательных временных отрезках длиной 1 мин (60 значений).

На рис. 2 представлен график изменения среднего значения по всем станциям сети для индекса линейной предсказуемости в последовательных временных окнах длиной 1 сут. Видно, что величина  $\rho$  претерпевает значительный и довольно резкий скачок, приходящийся на июль 2002 г. По всей видимости, этот скачок можно считать началом роста синхронизации. Рост индекса линейной предсказуемости означает увеличение временной коррелированности микросейсмических колебаний, т.е. за счет синхронизации характер сейсмических колебаний стал “проще” и более предсказуем. Из этого графика видно, что процесс синхронизации (консолидации блоков земной коры, возможно находящихся на разных тектонических плитах) начался в середине 2002 г. и землетрясение 25.09.2003 этот процесс не нарушило, в результате чего смогло накопиться такое огромное количество энергии, выделившееся в результате события магнитудой  $M = 9.0$  11 марта 2011 г.



**Рис. 2.** Поведение среднего значения индекса линейной предсказуемости  $\rho$  (тонкая черная линия) и его значения, усредненного в скользящем временном окне длиной 57 сут (толстая синяя линия). Индекс  $\rho$  вычислялся внутри последовательных временных окон длиной 1 сут



**Рис. 3.** Результаты кластерного анализа облаков 7-мерных векторов ежесуточных свойств поля микросейсмических колебаний на Японских островах в скользящем временном окне длиной 2 года со смещением 7 сут в зависимости от положения правого конца временного окна:  $q^*$  – оптимальное число кластеров;  $\mu$  – значение кластерной экспоненты

На рис. 3 представлены результаты кластеризации облаков 7 ежедневных средних характеристик микросейсмического фона сети F-net для 14 лет наблюдений (1997–2010 гг.) при оценке в скользящем временном окне длиной 2 года ( $N = 730$ ) со смещением 7 сут. Эти графики примечательны тем, что: а) число кластеров перед катастрофой стало стабильно минимальным и равным 1, что также является признаком потери разнообразия типов поведения или “заморозкой лишних степеней” свободы геологической среды; б) поведение кластерной экспоненты  $\mu$  в середине 2008 г. стало напоминать поведение перед событием  $M = 8.3$  25 сентября 2003 г., но с большим размахом и временной длительностью линейного тренда. Когда же для двухгодичной оценки кластерной экспоненты  $\mu$  в середине 2010 г. линейный тренда переключился с возрастающего на убывающий, стало ясно, что момент предсказанной катастрофы уже близок.

Рис. 4 представляет график изменений множественного коэффициента корреляции  $k$  для 5 временных рядов средних значений  $\Delta\alpha$  внутри 5 пространственных групп станций в скользящем временном окне длиной 1 год. 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. Главная особенность графика на рис. 4 – рост степени множественного коэффициента корреляции перед событием 25 сентября 2003 г. и его стабилизация на новом более высоком уровне вплоть до 11 марта 2011 г. Этот график независимо от графика среднего значения  $\Delta\alpha$  на рис. 1 подтверждает синхронизацию поля микросейсмических колебаний, причем в отличие от среднего значения  $\Delta\alpha$  он дает не косвенную оценку синхронизации, а прямую.





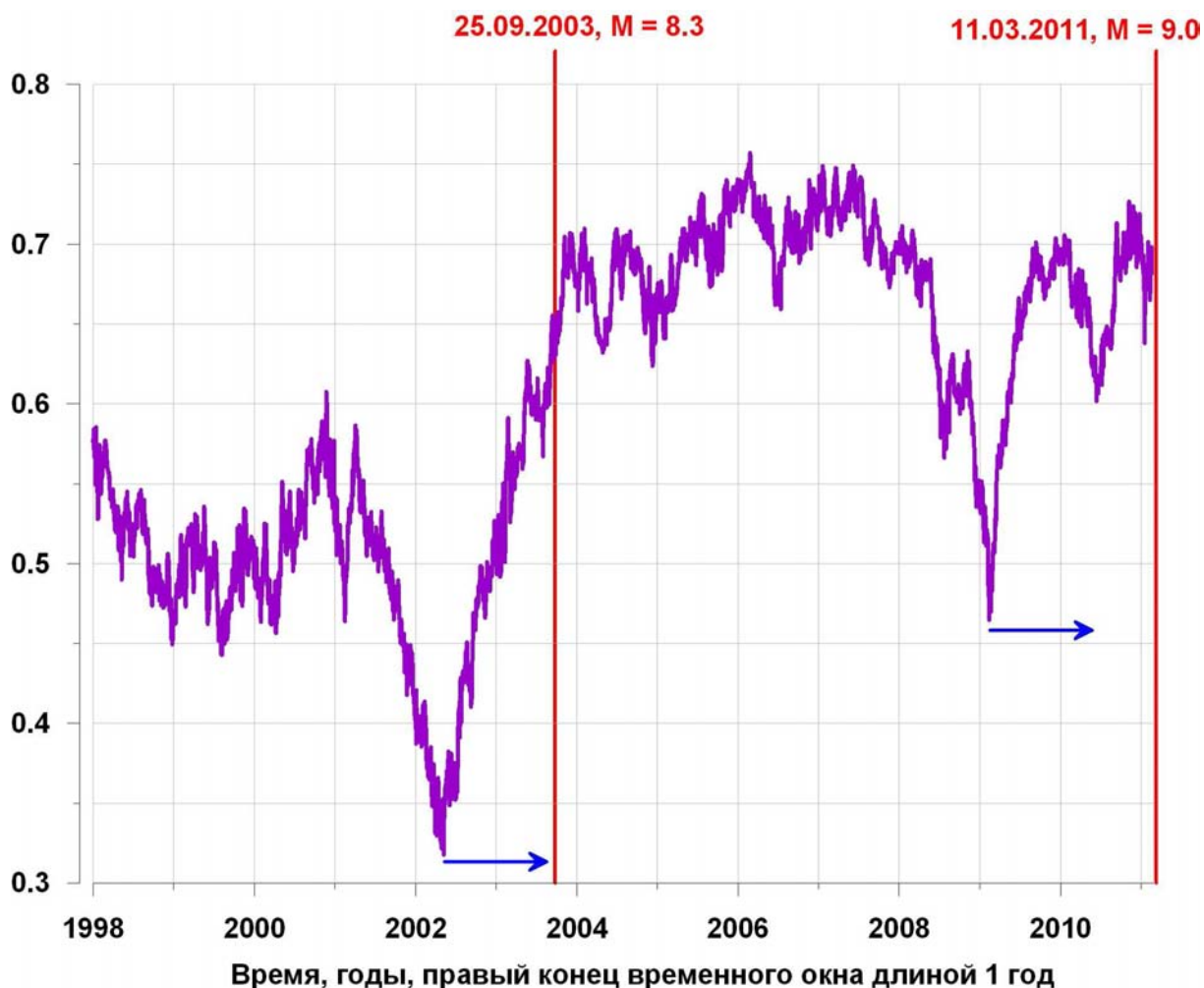
**Рис. 4.** Изменения множественного коэффициента корреляции  $K$ , оцененного для пяти средних значений параметра  $\Delta\alpha$ , вычисленных внутри пяти пространственных групп станций для 1-минутных данных в последовательных сутках. Коэффициент множественной корреляции вычислен в окне длиной 1 год

На рис. 5 представлен график изменения коэффициента корреляции между средними по всей сети станций параметрами  $\alpha^*$  и  $\Delta\alpha$ , вычисленного в скользящем временном окне длиной 1 год.

Рис. 5 примечателен тем, что он содержит 2 яркие аномалии поведения коэффициента корреляции – острые минимумы в 2002 и 2009 гг. Поскольку после первой аномалии 2002 г. последовало крупное землетрясение 25 сентября 2003 г., логично предположить, что второй острый минимум коэффициента корреляции может быть также предвестником будущего сильного события во второй половине 2010 г., причем это событие может быть большим по энергии.

Этот график позволил сделать вывод [Lyubushin, 2010; Любушин, 2011], что начиная с середины 2010 г. следует ждать сильного землетрясения на Японских островах магнитудой  $M = 8.5-9.0$ . Именно он дал основание уже в конце 2009 г. обозначить середину 2010 г. как оценку начала опасного периода ожидания катастрофы.

Отметим, что середина 2010 г. также выделяется на графике кластерной экспоненты  $\mu$  на рис. 2 как точка перелома положительного линейного тренда на отрицательный, но это стало ясно лишь в начале 2011 г.



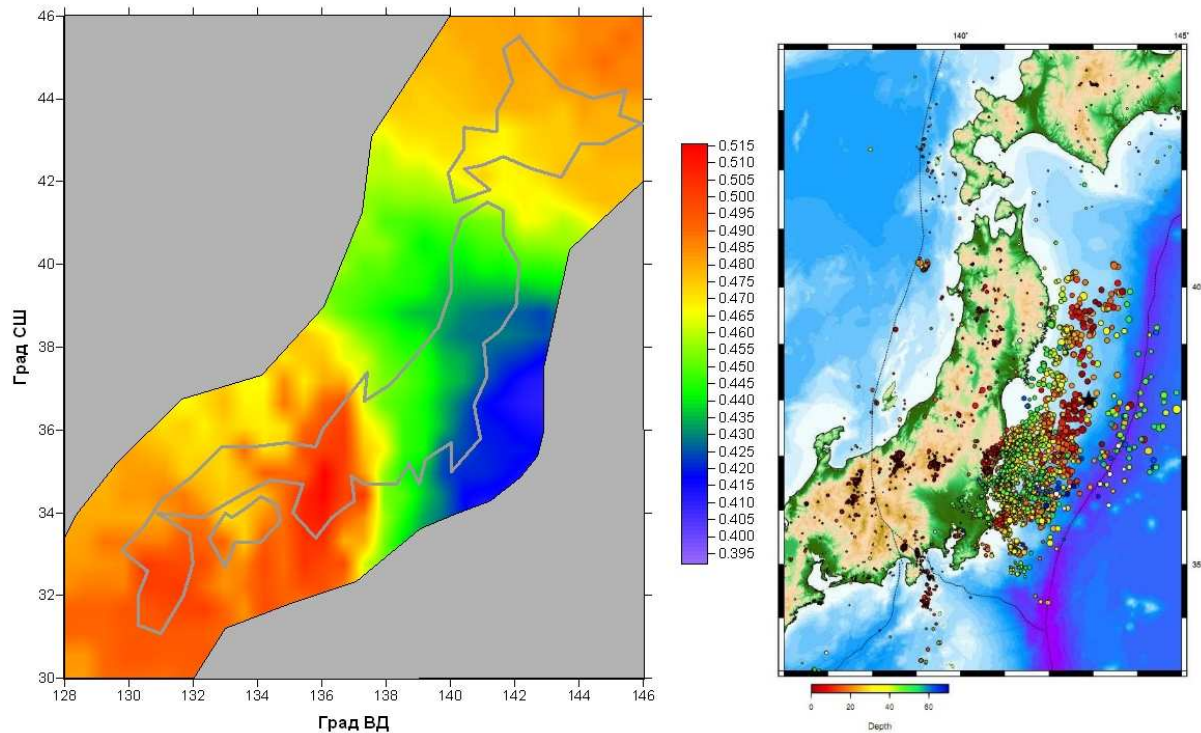
**Рис. 5.** Изменения коэффициента корреляции между средними величинами  $\alpha^*$  и  $\Delta\alpha$  в скользящем временном окне 1 год в зависимости от положения правого конца временного окна. Горизонтальными стрелками выделены временные интервалы одинаковой длины от момента первого глубоко “заостренного” минимума коэффициента корреляции до момента землетрясения 25 сентября 2009 г. и от момента второго минимума, имеющего тот же характер, до июля 2010 г., который оценивается как начало опасного временного интервала ожидания катастрофы

### **Что было сделано после 11 марта 2011 г.: можно было дать прогноз места будущей катастрофы**

Кратко изложенный выше аппарат анализа микросейсмического шума, оказывается, мог дать и прогноз места катастрофы. Но, увы, это уже было проделано после 11 марта 2011 г. Тем не менее это показывает, что разработанный метод прогноза места возникновения сильных землетрясений может быть применен в будущем.

Покроем прямоугольник от  $30^\circ$  до  $46^\circ$  с.ш. и от  $128^\circ$  до  $146^\circ$  в.д. регулярной сеткой узлов  $30 \times 30$ . Рассмотрим скользящее временное окно длиной 60 сут со смещение 7 сут. Просканируем этим окном весь интервал наблюдений от начала 1997 г. до конца февраля 2011 г. и внутри каждого окна оценим значение параметра  $\Delta\alpha$  в каждом узле регулярной сетки как медиану средних внутри окна оценок  $\Delta\alpha$  от 5 ближайших к узлу сейсмических станций. Оценки  $\Delta\alpha$  в каждом узле регулярной сетки есть не что иное, как карта распределения  $\Delta\alpha$  за 60-суточное окно. Далее усредним оценки от всех окон,

в результате получим усредненную за весь интервал наблюдений карту распределения  $\Delta\alpha$ . Она представлена на рис. 6. Области, не покрытые сейсмическими станциями, закрыты серым фоном, поскольку оценки  $\Delta\alpha$  там несостоятельны. Видно, что область афтершоков будущего землетрясения отчетливо выделяется как синее пятно пониженных значений  $\Delta\alpha$ .



**Рис. 6.** Прогноз места расположения очага землетрясения 11 марта 2011 г. ( $M_w = 9.0$ ): средняя карта распределения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$ . Область афтершоков будущего землетрясения отчетливо выделяется как синее пятно пониженных значений  $\Delta\alpha$ . Для сравнения слева приведено распределение афтершоков с сайта [http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103\\_tohoku/eng/](http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/)

## Выводы

Разработана эффективная технология анализа низкочастотного микросейсмического шума, позволившая выделить долговременные предвестники сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г и дать ее заблаговременный прогноз. Это обстоятельство подчеркивает важность создания и поддержания достаточно густых сетей непрерывного геофизического мониторинга, аналогичных сети F-net в Японии, и обеспечение свободного доступа к их данным через Интернет.

## Литература

- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- 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. 2011. № 6, с.26-34.
- Gilmore R.* Catastrophe theory for scientists and engineers. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1981. (Рус. пер.: Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2-х кн. М.: Мир, 1984. Кн. 1, 350 с.; Кн. 2, 285 с.).
- Lyubushin A.A.* Mean multifractal properties of low-frequency microseismic noise // Proceedings of 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC-2008. Hersonissos, Crete, Greece, 7–12 Sept. 2008. 2008a. P.255–270.
- Lyubushin A.A.* Multifractal properties of low-frequency microseismic noise in Japan, 1997–2008 // Book of abstracts of 7th General Assembly of the Asian Seismological Commission and Japan Seismological Society. Fall meeting. Tsukuba, Japan, 24–27 Nov. 2008. 2008b. P.92.
- Lyubushin A.A.* Synchronization of multifractal parameters of regional and global low-frequency microseisms // European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, 02–07 of May, 2010. Geophys. Res. Abstr. V. 12. EGU2010-696, 2010a.
- Lyubushin A.A.* Synchronization phenomena of low-frequency microseisms // European Seismological Commission, 32nd General Assembly, Sept. 06–10, 2010, Montpellier, France: Book of abstr. Ses. ES6. 2010b. P.124.
- Lyubushin A.* Multifractal parameters of low-frequency microseisms // Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, DOI 10.1007/978-3-642-12300-9\_15. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010c. 388 p. Chapter 15. P.253–272.
- Pavlov A.N., Sosnovtseva O.V., Mosekilde E.* Scaling features of multimode motions in coupled chaotic oscillators // Chaos, Solitons and Fractals. 2003. V. 16. P.801–810.
- Ziganshin A.R., Pavlov A.N.* Scaling properties of multimode dynamics in coupled chaotic oscillators // Proc. of 2-nd Int. Conference “Physics and Control” (August 24-26, 2005, S.-Petersburg). Saint Petersburg, 2005. P.180–183.

*Сведения об авторе*

**ЛЮБУШИН Алексей Александрович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 8(499)254-23-50. E-mail: lyubushin@yandex.ru

## MICROSEISMS NOISE ANALYSIS PROVIDED PREDICTION OF JAPAN EARTHQUAKE OF 11 MARCH, 2011

A.A. Lyubushin

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The data analysis of microseisms noise from broadband seismic network F-net allowed to formulate in 2008 a hypothesis that Japanese islands were approaching to a larger seismic catastrophe. The base for such a hypothesis was statistically significant decreasing of multi-fractal singularity spectrum support width mean value. Further on as far as the new information from monitoring system became available new results confirming increasing of microseisms synchronization were obtained. The cluster analysis of microseisms noise parameters allowed us to make a decision that starting from July of 2010 Japan islands come to the state of impending strong earthquake. Estimate of spatial distribution of multi-fractal singularity spectrum support width allows to give the region of catastrophe.

**Keywords:** synchronization, microseismic noise, earthquake precursors.

## Приложение

## Дополнительная информация об авторе

ЛЮБУШИН Алексей Александрович родился 6 января 1954 г. в Белогорске Амурской обл. В 1977 г. окончил Факультет аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института по специальности “Динамика полета и управление”. В 1977–1984 гг. работал в Институте проблем механики АН СССР, где в 1981 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по численным методам оптимального управления. С 1984 г. по настоящее время работает в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, в настоящее время в должности главного научного сотрудника.

В 1996 г. А.А. Любушин защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по разработке методов анализа многомерных временных рядов в системах геофизического мониторинга. С 1997 г. по настоящее время – профессор на кафедре математики Российского государственного геологоразведочного университета. Специалист в области разработки новых методов анализа информации от систем мониторинга различного предназначения, оценке сейсмического риска, изучения климатических временных рядов.

А.А. Любушин впервые в мировой практике геофизического мониторинга конструктивно сформулировал такие понятия, как сигнал синхронизации, агрегированный сигнал многомерного временного ряда, медленное событие, имеющие фундаментальное значение для решения целого комплекса геофизических задач, включая поиск качественно новых предвестников сильных землетрясений. На основе использования многомерного вейвлет-анализа временных рядов он разработал подход к выделению общих сигналов так называемого всплескового характера, представляющих большой практический интерес в задачах поиска краткосрочных предвестников землетрясений. Разработана простая и эффективная программа выделения периодических составляющих сейсмического процесса, не требующая обычного перехода к временным рядам. Создана эффективная байесовская процедура оценки сейсмического риска, позволяющая легко учитывать неопределенность данных.

По анализу мультифрактальных свойств низкочастотного микросейсмического шума, зарегистрированного на сети сейсмических станций F-net в Японии за период с 1997 по 2010 гг. А.А. Любушин сделал долгосрочный прогноз сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г., который был заблаговременно опубликован в серии статей и представлен на международных конференциях с конца 2008 г. по середину 2010 г. Общее число публикаций и выступлений с прогнозом, куда также входит заявка в Российской экспертный совет по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности, поданная 26 апреля 2010, равно 10. В апреле 2010 г. были даны оценка магнитуды будущего землетрясения в интервале  $M=8.5-9.0$  и оценка наиболее раннего момента возникновения землетрясения как середина 2010 г. Разработанная А.А. Любушиным технология анализа многомерного потока данных позволяла также дать оценку и места будущей катастрофы, но она уже была произведена ретроспективно.

А.А. Любушин автор и соавтор 150 научных работ, в том числе монографий:  
*Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.

*Кляшторин Л.Б., Любушин А.А.* Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. М.: Изд-во ВНИРО (Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии), 2005. 235 с. Английский перевод: *Klyashtorin L.B. and Lyubushin A.A.* (2007) *Cyclic Climate Change and Fish Productivity*. Moscow: VNIRO Publishing, 2007.

*Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А.* Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.