

# Прогноз Великого Японского землетрясения

А.А.Любушин

**П**рогноз будущего развития любой системы — самая сложная часть научного исследования. Физика твердой Земли, а точнее, физика самой верхней и жесткой земной оболочки — литосферы — не исключение. И здесь, конечно же, на первый план выходит прогноз так называемых геокатастроф — землетрясений и вулканических извержений.

В данной статье речь пойдет только о землетрясениях, прогноз которых был и остается самой сложной, скользкой и опасной темой научных исследований в геофизике. Серьезный интерес в обществе к этой задаче возникает лишь после сейсмических катастроф с большим числом жертв. Когда же проходит совсем немного времени и другие события в политике или общественной жизни заслоняют впечатления от недавней катастрофы, проблема прогноза землетрясений уходит на задний план.

## Прогноз — дело тонкое

Многие ученые избегают иметь дело с прогнозом землетрясений, потому что занятие это неблагодарное, не гарантирует положительного результата, не способствует успешной карьере. Кроме того, неясно как к нему подступиться, памятуя о многочисленных прошлых неудачных попытках предсказания катастроф. Немногие хотят быть объ-



*Алексей Александрович Любушин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — анализ многомерных сигналов самых различных систем мониторинга с целью выделения скрытых и неочевидных особенностей данных, таких, например, как приближение сильных землетрясений.*

ектом иронических замечаний коллег о несостоявшихся или пропущенных сейсмических событиях. Можно даже стать объектом уголовного преследования, подобно группе из семи итальянских экспертов, отменивших сейсмическую тревогу перед землетрясением 6 апреля 2009 г. в Аквиле, унесшей более 300 жизней. Проще проблему прогноза объявить некорректной, нерешаемой и поставить на ней крест, тем самым отдать ее во власть экстрасенсов, магов, шаманов.

Однако всякий раз после сейсмических событий со значительным числом жертв проблема прогноза землетрясений упрямо реанимируется. И вновь ставится вопрос: а можно ли было предсказать катастрофу? Традиционную в настоящий момент практику прогнозирования землетрясений нельзя назвать неправильной, но определенно ее можно назвать неполной.

На сегодняшний день почти все методы прогнозирования строятся на основании анализа сейсмических каталогов. Библиография по традиционным методам прогноза очень велика, дадим лишь одну ссылку, где изложены некоторые методы и приведен их обзор: [1]. С технологической точки зрения желание ограничиться лишь анализом сейсмических каталогов вполне объяснимо. Это сравнительно небольшая (!) таблица, обычно содержащая несколько десятков тысяч, редко несколько сотен тысяч событий и состоящая из минимума информации — времени, места, силы. Можно воспользоваться стандартными редакторами таблиц, куда встроены многие статистические процедуры. Основная идея традиционного прогноза вполне разумна: по статистически значимым закономерностям последовательности сейсмических событий малой и средней силы дать прогноз сильных землетрясений. Для «обучения» (настройки) метода прогнозирования необходимо наличие нескольких сильных событий в прошлом. По особенностям поведения потока слабых со-

бытий перед прошлыми сильными событиями можно дать прогноз сильных событий в будущем. Обучение заключается в подгонке параметров метода прогноза (различных порогов для магнитуд, длин временных окон и размеров пространственного окна) таким образом, чтобы результат удовлетворял ретроспективному прогнозу прошлых событий. Обученный метод применяется уже для реального прогноза «вперед».

Очевидны недостатки такого подхода: малое число сильных событий и ненадежность регистрации слабых землетрясений в прошлом, когда сейсмические сети были менее густыми и совершенными, а отсюда малый объем информации для обучения методов и, как следствие, большая неопределенность результата прогноза. Отсутствие успехов в традиционном прогнозе привело к широкому распространению мнения о принципиальной непредсказуемости землетрясений, которое сейчас фактически, явно или неявно, утвердилось как общепринятое. Два последних мегаземлетрясения с магнитудой 9 (Суматранское 26 декабря 2004 г. и Японское 11 марта 2011 г.) традиционные методы пропустили. Это лишь укрепило убежденность мирового научного сообщества в том, что занятие прогнозом сродни изобретению вечного двигателя.

Следует сказать несколько слов о понятии «магнитуда». Сейсмологи понимают различие между магнитудой 9 и 8, но большинство людей такую разницу совершенно не чувствуют и часто путают ее со шкалой сотрясаемости грунта в баллах. Приведем формулу, связывающую энергию  $E$  (в джоулях) сейсмических волн от землетрясения и ее магнитуду  $M$ :  $\lg(E) = 4.8 + 1.5 M$ . Таким образом, увеличение магнитуды на единицу означает увеличение энергии сейсмических волн на полтора порядка, т.е. в  $10\sqrt{10} \approx 31$  раз. Одно событие с  $M = 9$  по энергии эквивалентно 31 событию с  $M = 8$ , 1000 событий с  $M = 7$  и т.д.

В отдельных регионах Земли (в Калифорнии, Японии) уже несколько десятков лет существуют обширные сети сейсмических станций, позволяющие создавать очень подробные каталоги с различными магнитудами — от значительной до нулевой. Такой детальный поток событий малой силы, казалось бы, должен был снять проблему в обучении методов прогноза довольно частых землетрясений средней силы ( $M = 6-7$ ). Однако этого не произошло. Значит, информации, содержащейся в сейсмических каталогах, недостаточно для прогнозирования, и, чтобы достичь прогресса, необходимо совершить качественный скачок в объеме анализируемых данных. Например, информация, обрабатываемая в медицине для контроля над состоянием больного и прогноза течения болезни, это сотни миллионов отсчетов от нескольких десятков датчиков с частотой дискретизации от 200 до 500 Гц (данные электроэнцефалограмм при лечении эпилепсии и прогноза припадков — своего рода «зем-

летрясений в мозге»). Другой пример — анализ и прогноз состояния финансовых рынков, где непрерывно обрабатываются временные ряды котировок десятков акций и биржевых индексов с шагом дискретизации 1 мин. При таких сравнениях объем информации сейсмических каталогов потрясаете мал и, очевидно, не может быть основой для успешного прогноза. Возникает естественная идея: необходимо перейти от анализа потоков событий (каталогов) к совместному анализу многомерных временных рядов, получаемых от большого числа наблюдательных станций геофизического мониторинга, покрывающих сейсмически опасную территорию.

### Дрожь Земли, шумы и сигналы

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 в Вашингтоне. Они могут быть заказаны и скачены по Интернету любым желающим\*. Общее число станций, с которых могут быть получены сведения со всего мира, очень велико (порядка 1000), но не все они дают информацию в частотном диапазоне, наиболее перспективном для задач прогноза. Наибольший интерес представляют широкополосные станции. На них рабочий диапазон фактически доходит до частот приливных деформаций земной коры. Для целей прогноза (как показал опыт использования сейсмических записей) наиболее перспективен период от 2 до 500 мин. Этот частотный диапазон служит границей между сейсмологией и гравиметрией. Он малоизучен. Колебания в нем в силу больших (по сейсмологическим меркам) периодов представляют собой своего рода глобальную «дрожь» Земли. Такие низкочастотные микросейсмические колебания, несмотря на то, что их основная энергия обусловлена процессами, происходящими в атмосфере и океане (вариациями атмосферного давления и воздействием океанических волн на берег и шельф), содержат важную информацию о процессах в земной коре. Связь низкочастотных микросейсм с атмосферными и океаническими процессами хорошо изучена [2]. Фактически земная кора — среда 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 при подготовке крупных землетрясений.

\* <http://www.iris.edu/forms/webrequest.htm>.

На данный момент 226 широкополосных станций объединены в группу GSN (Global Seismic Network)\*. Однако многие из них задействованы совсем недавно, в 2007—2008 гг. Количество станций, работающих стабильно и введенных не позднее 2005 г., постепенно растет от 60 в начале 1996 г. до 148 в настоящее время. Несмотря на это, глобальная система наблюдений IRIS характеризуется большими средними расстояниями между станциями и содержит много «прогалин», не заполненных пунктами наблюдений.

Любая прогностическая сеть мониторинга характеризуется двумя пространственными параметрами: характерным линейным размером всей сети (максимальный масштаб) и средним расстоянием между станциями (минимальный масштаб). Первый параметр определяет максимальную магнитуду землетрясения, которое можно надеяться предсказать, используя полученную информацию. Вторым параметром характеризует минимальную магнитуду, начиная с которой можно пытаться прогнозировать событие. Используя корреляционные соотношения между размером очага и магнитудой [1], нетрудно понять, что глобальную сеть можно использовать для прогноза землетрясений в нереальном диапазоне магнитуд — от 11 до 14.

Единственная сеть широкополосных станций, удовлетворяющая перечисленным требованиям достаточной густоты пунктов наблюдения, — сеть F-net в Японии. Она состоит из 83 станций и непрерывно функционирует начиная с 1997 г. Ее данные свободно доступны\*\*. Размеры сети и среднее расстояние между станциями делают ее пригодными для прогноза событий с магнитудами 8—9. На рис.1 представлены положения 77 станций сети F-net (шесть станций, расположенные на небольших удаленных островах южнее 30° с.ш., исключены из рассмотрения).

На рис.2 представлены записи вертикальных сейсмических колебаний длительностью 12 сут на одной из станций сети F-net после перехода путем вычисления средних значений в последовательных временных окнах длиной 60 с от шага 1 к шагу 1 мин. На верхнем рисунке видны почти периодические изменения среднего уровня, обусловленные влиянием солнечно-лунных приливных деформаций (сумма нескольких гармонических колебаний с периодами, близкими к 12 и 24 ч). Такие приливные вариации легко оцениваются с помощью сглаживания данных (вычисления «тренда»). Нижний рисунок содержит остаток от вычитания тренда, или «шум».

Одна из наиболее традиционных моделей временных рядов заключается в разделении наблюдений на низкочастотный сигнал и высокочастотный шум. Уже сама используемая терминология подразумевает, что последний — это нечто лиш-

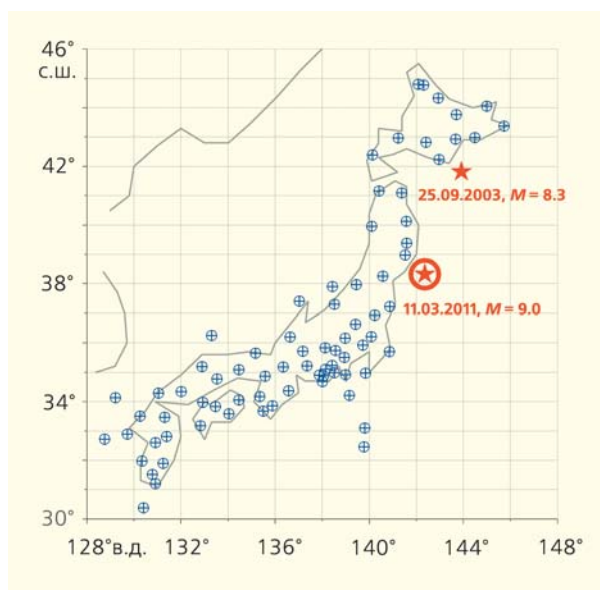


Рис.1. Положение 77 сейсмических станций сети F-net (синие кружки). Звездочками показаны гипоцентры землетрясений 25.09.2003 г. ( $M = 8.3$ ) и 11.03.2011 г. ( $M = 9.0$ ).

нее, типа погрешности измерений или результат воздействия различных малосущественных источников, знание которых не приносит никакой пользы. А вот сглаженная, низкочастотная составляющая измерений — именно то, что надо изучать, т.е. сигнал. В излагаемом подходе к анализу данных мониторинга эта модель в некотором смысле выворачивается наизнанку. Да, анализ гладких, или трендовых, составляющих сигналов мониторинга важен, но он, как правило, уже не

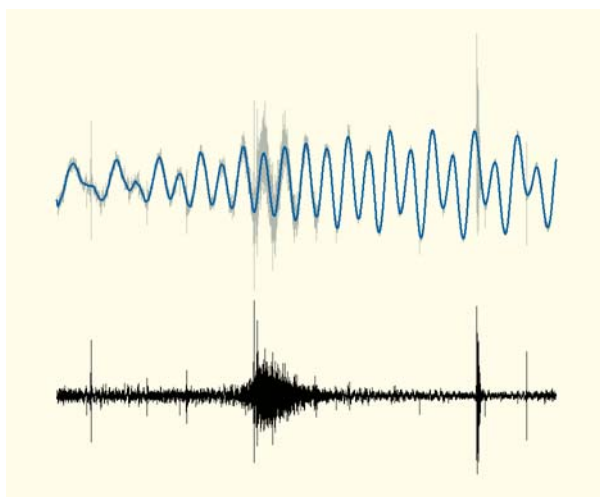


Рис.2. Фрагмент записи низкочастотных сейсмических колебаний длительностью 12 сут. Вверху приведены график исходных данных (серая линия) и гладкая составляющая сигнала — тренд (синяя линия). Внизу показан остаток после вычитания тренда — «шум».

\* [http://www.iris.edu/mda/\\_GSN](http://www.iris.edu/mda/_GSN)

\*\* <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en>

приносит никакой новой информации. Мы же предлагаем обратить внимание на высокочастотную составляющую, пренебрежимо называемую «шумом». Как оказалось, именно структура шума дала принципиально новую и неочевидную (скрытую) информацию. Иными словами, именно шум оказался сигналом.

### Сингулярности случайных колебаний

Совокупное воздействие атмосферных и океанических процессов, приливных деформаций земной коры, глобального сейсмического процесса, а также трудно идентифицируемых и малоизученных процессов в земной коре, связанных с накоплением и медленной диссипацией тектонической энергии в литосфере (так называемых тихих или медленных землетрясений) приводит к формированию случайного процесса. Для его исследования традиционный аппарат спектрального анализа оказывается малоэффективным.

При расшифровке структуры сейсмического шума применяется так называемый мультифрактальный анализ. Этот метод с начала 1990-х годов используется в физике турбулентности, при рассмотрении финансовых и медицинских временных рядов, но пока еще не вошел в обязательный инструментарий специалистов по прикладной математике или изучению сигналов. В данной статье нет никакой возможности дать строгое определение понятий фракталов и мультифракталов, и для подробного ознакомления с ними отошлем читателя к монографии Е.Федера [3].

Для наших же целей достаточно будет ограничиться кратким качественным описанием мультифрактального анализа применительно к случайным сигналам, зависящим лишь от одной переменной — времени. К сожалению, совсем обойтись без математических обозначений для того, чтобы объяснить смысл спектра сингулярности, невозможно. Суть мультифрактального спектра сингулярности для нашего частного случая представлена на рис.3.

Рассмотрим некоторое случайное колебание на интервале времени  $[t - \delta/2, t + \delta/2]$  длиной  $\delta$ , с центром во временной точке  $t$ , и размах  $\mu(t, \delta)$  случайного колебания на данном интервале, т.е. разницу между максимальным и минимальным значениями (левая часть рис.3). Если устремить  $\delta \rightarrow 0$ , то  $\mu(t, \delta)$  будет также стремиться к нулю, но здесь важна скорость убывания. Если скорость определяется законом  $\delta^{b(t)}$ :  $\mu(t, \delta)_{\delta \rightarrow 0} \sim \delta^{b(t)}$  или если существует предел

$$b(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log(\mu(t, \delta))}{\log(\delta)},$$

то величина  $b(t)$  называется экспонентой Гельдера—Липшица.

Если величина  $b(t)$  не зависит от момента времени  $t$ :  $b(t) = \text{const} = H$ , то случайное колебание  $X(t)$  называется монофрактальным, а величина  $H$  — постоянной (или экспонентой) Херста, по имени британского гидролога, введшего этот параметр (но совершенно другим способом) при изучении режима разлива Нила [3]. Это один из парадоксов истории науки. Благодаря своей по-

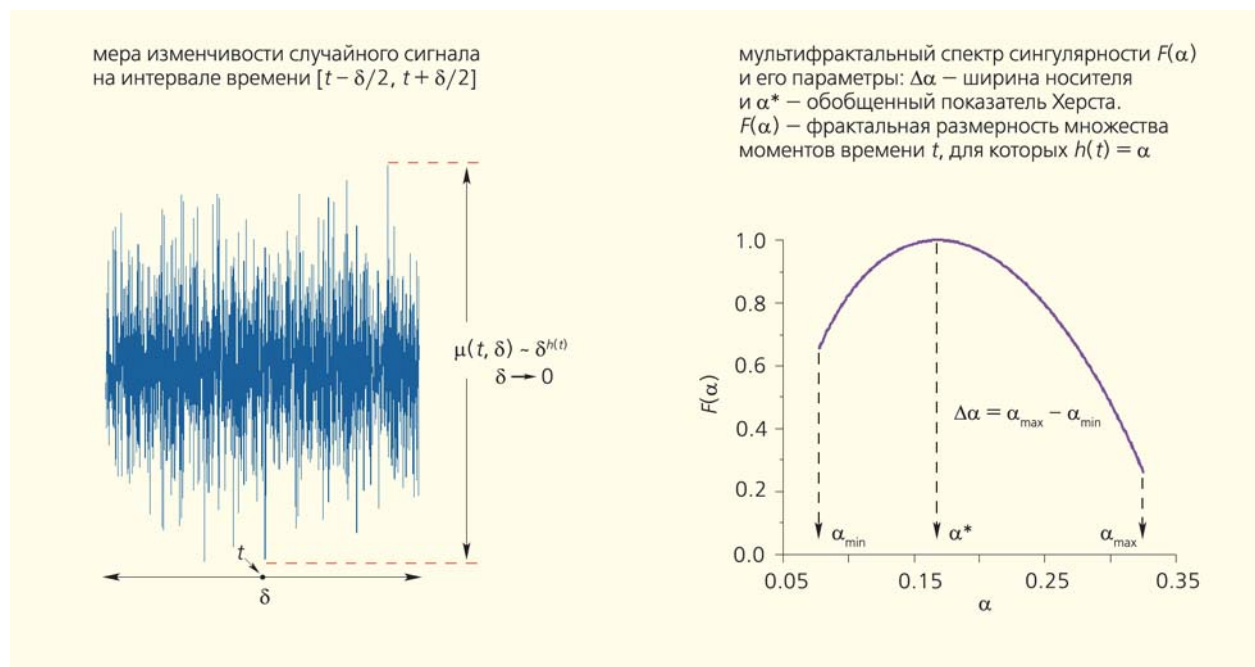


Рис.3. Иллюстрации к понятию мультифрактального спектра сингулярности.

трясающей интуиции Г.Е.Херст, будучи совершенно не математиком, своими работами по гидрологии, сам того не подозревая, фактически открыл новую область в математике и математической статистике — фрактальный анализ.

Если экспоненты Гельдера—Липшица существенно различаются для разных моментов времени, то случайное колебание называется мультифракталом и для него можно определить понятие спектра сингулярности  $F(\alpha)$  (правая часть рис.3). Мысленно выделим множество  $C(\alpha)$  таких моментов времени  $t$ , которые имеют одно и то же значение  $\alpha$  экспоненты Гельдера—Липшица:  $b(t) = \alpha$ . Множества  $C(\alpha)$  существуют (содержат какие-то элементы) не для всех значений  $\alpha$ , т.е. существуют некоторые  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ , и лишь для  $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$  множества  $C(\alpha)$  будут непустыми. Для каждого значения  $\alpha$  в интервале между минимальным и максимальным значениями множества  $C(\alpha)$  состоит из точек, довольно причудливо разбросанных по временной оси. Размерность временной оси, которую в данном случае можно назвать множеством, вмещающим в себя множества  $C(\alpha)$ , равна 1. Но размерность множеств  $C(\alpha)$  меньше единицы — они фрактальны.

Основные качества визуального восприятия фрактальных множеств, или просто фракталов, — именно их причудливость, независимость от масштаба (любая малая часть фрактала при соответствующем увеличении неотличима от любой большей части), внешняя хаотичность. За последней на самом деле могут быть скрыты вполне регулярные внутренние правила, порождающие элементы этих множеств. Размерность фракталов, которая обычно представляет собой дробное число, меньшее, чем целочисленная размерность (1, 2, 3) вмещающего множества, также называется фрактальной. По традиции, изложение понятия фрактала начинается с выяснения вопроса, какова длина береговой линии Норвегии, которая, как известно, чрезвычайно извилиста и испещрена фьордами различной длины. Она имеет размерность 1.52 [3], что больше 1 (размерности прямой линии) и меньше 2 (размерности вмещающего множества — двухмерной плоскости). Возвращаясь к случайным колебаниям, зависящим от одномерного аргумента  $t$ , можно дать определение мультифрактального спектра сингулярности  $F(\alpha)$  — это фрактальная размерность множества точек  $C(\alpha)$ . Таким образом, мультифрактал — обобщение фрактального множества на случай, когда фрактальных размерностей много. Причем части мультифрактала, имеющие одну и ту же фрактальную размерность (в нашем случае один и тот же показатель Гельдера—Липшица), сильно перемешаны друг с другом.

На правой части рис.3 представлен график оценки спектра сингулярности вертикальных сейсмических колебаний на одной из станций сети F-net на временном интервале длиной 1 сут (1440 мин). Разумеется, приведенное выше качест-

венное определение спектра сингулярности для сигналов не может быть руководством к действию для его вычисления по данным наблюдений. При вычислении функции  $F(\alpha)$  используют два практических метода: предложенный в начале 1990-х метод WTMM (Wavelet Transform Modulus Maxima), основанный на оценке так называемого скелета максимумов модуля непрерывных вейвлет-преобразований [4], и более поздний метод DFA (Detrended Fluctuation Analysis), что можно перевести на русский язык как «метод анализа флуктуаций после удаления зависимых от масштаба трендов» [5]. Оба метода анализируют именно остаток после удаления тренда, или шум (рис.2). Само удаление трендов и вычисление функции  $F(\alpha)$  производится разными способами. Я использовал более быстрый и устойчивый метод DFA [6—9].

Как видно из правой части рис.3, спектр сингулярности может быть охарактеризован двумя параметрами: значением  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , которое называется шириной носителя спектра сингулярности, и значением аргумента  $\alpha^*$ , доставляющим максимум функции  $F(\alpha)$ . Обычно  $F(\alpha^*) = 1$ , т.е. значение  $\alpha^*$  соответствует наиболее типичному показателю Гельдера—Липшица. Последний встречается настолько часто, что размерность соответствующего множества  $C(\alpha^*)$  просто совпадает с размерностью вмещающего пространства (одномерной оси времени) и равна 1. Если сигнал монофрактальный, то  $\Delta\alpha = 0$ , а сама функция  $F(\alpha)$  вырождается в точку  $F(\alpha^*) = 1$ . При этом  $\alpha^* = H$ . Поэтому  $\alpha^*$  называется обобщенным показателем Херста. Если оценивать спектр сингулярности  $F(\alpha)$  в скользящем временном окне, то эволюция его параметров  $\Delta\alpha$  и  $\alpha^*$  дает информацию об изменении структуры шума.

При анализе низкочастотных микросейсм использовались оценки параметров спектров сингулярности от каждой станции сети после перехода к шагу по времени 1 мин в последовательных непересекающихся временных окнах длиной 1 сут. Таким образом осуществлялся переход от последовательности значений сейсмического шума каждую минуту к последовательности значений свойств  $\Delta\alpha$  и  $\alpha^*$  шума каждые сутки.

## Хаос или порядок — что лучше?

Греческое слово «хаос» несет в себе определенный негативный заряд и ассоциируется с нестабильностью, смутным временем, беспорядком. На самом деле хаос бывает разным, в том числе и полезным, положительным. В статистической физике и теории фазовых переходов известно, что при приближении к резкому изменению свойств системы (к фазовому переходу) происходит синхронизация поведения малых частей системы. Например, увеличивается радиус корреляции флуктуаций. Это свойство увеличения коллективной компоненты перед переходом системы

в качественно новое состояние — один из универсальных «флагов катастроф» [10]. Таким образом, увеличение порядка и уменьшение хаоса служит предвестником катастрофы, причем не только в физике, но и самых различных областях. В стабильном обществе каждый человек занимается своим родом деятельности независимо от других членов общества, и это разнообразие есть своего рода «здоровый хаос». Если же общество находится в критическом, предреволюционном, состоянии, то множество людей, раньше ведущих образ жизни, независимый друг от друга, синхронизируют свое поведение, начинают вести себя подобно друг другу. Они одновременно собираются в одном и том же месте, выходят на демонстрации, скандируют лозунги. Разнообразие мод поведения уменьшается. Одна из основных причин современного экономического кризиса в Европе — излишняя централизация управления экономической жизнью через единую валюту — евро. Происходит утеря «здорового хаоса» реальных различий между экономиками почти 20 стран, составляющих Европейский Союз, которых невозможно «стричь под одну гребенку». Поэтому синхронизация, уменьшение разнообразия, увеличение порядка может означать потерю «здорового хаоса» и быть признаком приближения катастрофы.

По своему определению мультифрактальный параметр  $\Delta\alpha$  как раз и есть мера разнообразия случайного поведения сигнала. Он, грубо говоря, отражает число экспонент Гельдера—Липшица. В простом монофрактальном случайном сигнале существует только один показатель Гельдера—Липшица, он же показатель Херста. Уменьшение  $\Delta\alpha$  свидетельствует о подавлении определенных степеней свободы системы, генерирующей изучаемый сигнал, и уменьшении их числа.

Одним из первых применений мультифрактального анализа были исследования ритма биения сердца — последовательности промежутков времени между максимумами сигнала кардиограмм. Оказалось, что если сердце здорово, то спектр сингулярности биений весьма широкий. Сердце обладает «здоровым хаосом». А вот если оно находится в больном состоянии, то ритм его биений упорядоченный и ширина спектра сингулярности очень мала [11]. Такой же феномен позднее был обнаружен при выявлении аномалий развития плода.

А.Н.Павлов и В.С.Анищенко исследовали уменьшение ширины носителя спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  (которое называли «потерей мультифрактальности») на временных рядах и на моделях синхронизации поведения связанных нелинейных осцилляторов. Они показали, что при синхронизации (за счет увеличения связи между элементами системы) происходит резкое уменьшение параметра  $\Delta\alpha$  [12].

Почему же сейсмический шум, и не только он, а и случайные флуктуации любых геофизических измерений удовлетворительно описываются мо-

делью мультифрактального случайного процесса? Дело в том, что земная кора на самом деле не представляет собой сплошную среду, динамика которой полностью описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Континуальная механика удовлетворительно описывает процессы в земной коре лишь на больших пространственных масштабах, когда свойства внутренней структуры среды усредняются. При накоплении и сбросе тектонической энергии важную роль играет иерархическая и блоковая структура коры. Каждый крупный блок (например, литосферная плита) разбит на некоторое число менее крупных, а те, в свою очередь, на еще более мелкие и т.д. — вплоть до мельчайших структурных единиц типа кристаллов и песчинок. При желании иерархичность можно наблюдать, и рассматривая, например, систему прожилков на поверхности полированной мраморной плиты.

Примечательно, что в иерархии присутствует порядок: каждый блок крупного уровня состоит из примерно одного и того же числа блоков менее крупного уровня [13—14]. Таким образом, в блоковом строении земной коры наблюдается основное свойство фрактального множества — независимость структуры от масштаба (подобно тому, как ветка дерева представляет собой образ всего дерева в уменьшенном масштабе). Степень связанности между мелкими блоками непостоянна. Они консолидируются в более крупные блоки и опять распадаются на свои составляющие, причем в результате каждого такого распада выделяется некоторая величина сейсмической энергии. Однако каждый распад малого блока есть на самом деле шаг к последующей консолидации еще более крупного блока на следующем уровне иерархии. Консолидация — процесс более плотного «упаковывания» составных частей блока во время их взаимных подвижек [15].

Иерархическая самоподобная структура земной коры приводит к тому, что в каждый момент времени существует множество блоков земной коры, находящихся в той или иной степени консолидации. В зависимости от ее степени и от ранга в иерархии передаточные и резонансные свойства блоков различны. Если разнообразие велико, это означает, что не существует консолидированного блока земной коры крупного ранга, который смог бы запасти значительную энергию перед своим распадом и тем самым стать источником сильного землетрясения. Большое разнообразие размеров консолидированных блоков отражается в ширине спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  сейсмического шума, который образуется в результате прохождения сейсмических волн от атмосферных и океанических процессов через иерархическую блоковую среду.

Таким образом, сейсмический шум мультифрактален, потому что мультифрактальна иерархическая среда распространения сейсмических волн, со-

стоящая из консолидированных блоков различных рангов. Что же происходит перед сильным землетрясением? Для того чтобы такое землетрясение случилось, необходимо наличие консолидированного блока высокого ранга или большого размера. Иначе энергия будет расходоваться на множество подвижек между малыми блоками. Но существование крупного консолидированного блока означает потерю разнообразия передаточных и резонансных свойств среды. А это приводит к тому, что параметр  $\Delta\alpha$  уменьшается, происходит потеря мультифрактальности. Если уменьшилось среднее значение  $\Delta\alpha$ , то уменьшилось и разнообразие параметров «дрожания» блоков земной коры. Произошла их консолидация во временные более крупные структуры. А синхронизация означает приближение к сильному землетрясению, поскольку консолидация блоков земной коры дает возможность накопиться тектонической энергии, которая раньше сбрасывалась при сейсмических толчках малой и средней силы при движении малых блоков.

Эта цепочка выводов применительно к данным сети F-net была сформулирована в середине 2008 г., а заключение о том, что Японские о-ва приближаются к сильному землетрясению с магнитудой более 8.3, было доложено в конце ноября того же года на конференции Азиатской сейсмологической комиссии в японском городе Цукуба [16].

### Прогноз сейсмической катастрофы по мультифрактальным свойствам «шума»

11 марта 2011 г. в Японии произошло катастрофическое землетрясение магнитудой  $M = 9.0$ , сопровождавшееся цунами. В результате стихийного бедствия погибли и пропали без вести в общей сложности около 30 тыс. человек, стране был нанесен огромный материальный ущерб, исчисляемый примерно в 300 млрд долл. США. Воздействие волн цунами привело к крупнейшей катастрофе на атомной электростанции в Фукусиме, последствия которой теперь оцениваются как более тяжелые, нежели последствия взрыва на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Психологическое влияние атомной катастрофы на Фукусиме оказалось настолько сильным, что привело к массовому отказу от использования атомной энергии в ряде стран Европы и в самой Японии. Стихийное бедствие стало для Японии причиной крупнейшей экономической рецессии [17–18].

Великое Японское землетрясение (ВЯЗ) знаменательно и в научном плане, поскольку в данном случае был сделан заблаговременный прогноз времени и силы ожидаемой катастрофы. Он базировался на анализе данных регистрации микросейсмических шумов японской широкополосной сейсмической сетью F-net. 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 сейсмического события магнитудой  $M = 8.5–9.0$  [19–22].

После землетрясения опыт его прогноза был опубликован в научных журналах, и было показано, что использованная методика анализа свойств низкочастотных микросейсмических колебаний давала прогноз места будущей катастрофы. Однако это было сделано уже после события, ретроспективно [23].

Поскольку сеть станций F-net покрывает всю Японию (рис.1) и от каждой станции ежедневно приходят оценки параметра  $\Delta\alpha$ , можно построить ежедневную карту изменения этого параметра в пространстве. Чтобы получить цифровую карту, покроем прямоугольную область, включающую в себя все станции, равномерной сеткой узлов. Далее для каждого узла возьмем значение  $\Delta\alpha$ , равное среднему значению по заданному числу сейсмических станций, наиболее близких к рассматриваемому узлу. Представленные в статье карты получены как совокупность средних значений  $\Delta\alpha$  от пяти ближайших к каждому узлу станций в узлах равномерной сетки  $30 \times 30$ , покрывающей прямоугольную область с координатами от  $30^\circ$  до  $46^\circ$  с.ш. и от  $128^\circ$  до  $146^\circ$  в.д. Если усреднить ежедневные карты по всем дням внутри большого промежутка времени, то получатся усредненные карты.

На рис.4 представлена карта распределения  $\Delta\alpha$  от начала функционирования системы F-net до сильного события у берегов Хоккайдо 25.09.2003 г. ( $M = 8.3$ ), которое стало первым сильным проявлением масштабного роста дестабилизации литосферы всего Японского региона [8]. В определенном смысле это событие можно считать форшотом последовавшего затем мегаземлетрясения.

После землетрясения 2003 г. произошло хотя и небольшое, но статистически значимое уменьшение среднего значения  $\Delta\alpha$ , оставшееся фактически постоянным вплоть до момента ВЯЗ. Это хорошо видно при сравнении карт на рис.4,а,б. На рис.4,а область ВЯЗ отмечена существенно пониженными значениями  $\Delta\alpha$ , свидетельствующими о начале подготовки события задолго до 1997 г. (введения системы наблюдений F-net), что вполне естественно, поскольку время появления первых предвестников мегаземлетрясений с магнитудой 9 оценивается как 30–50 лет [1]. Примечательно, что после землетрясения 2003 г. область пониженных значений  $\Delta\alpha$  распалась на две части (рис.4,б), и только северная реализовалась как область мегаземлетрясения. А каково же будущее другой, южной части?

На рис.5 показано оцененное уже после ВЯЗ распределение по пространству параметра  $\Delta\alpha$  внутри четырех последовательных интервалов времени примерно одинаковой длины, которые покрывают промежуток от 12 марта 2011 г. (сле-

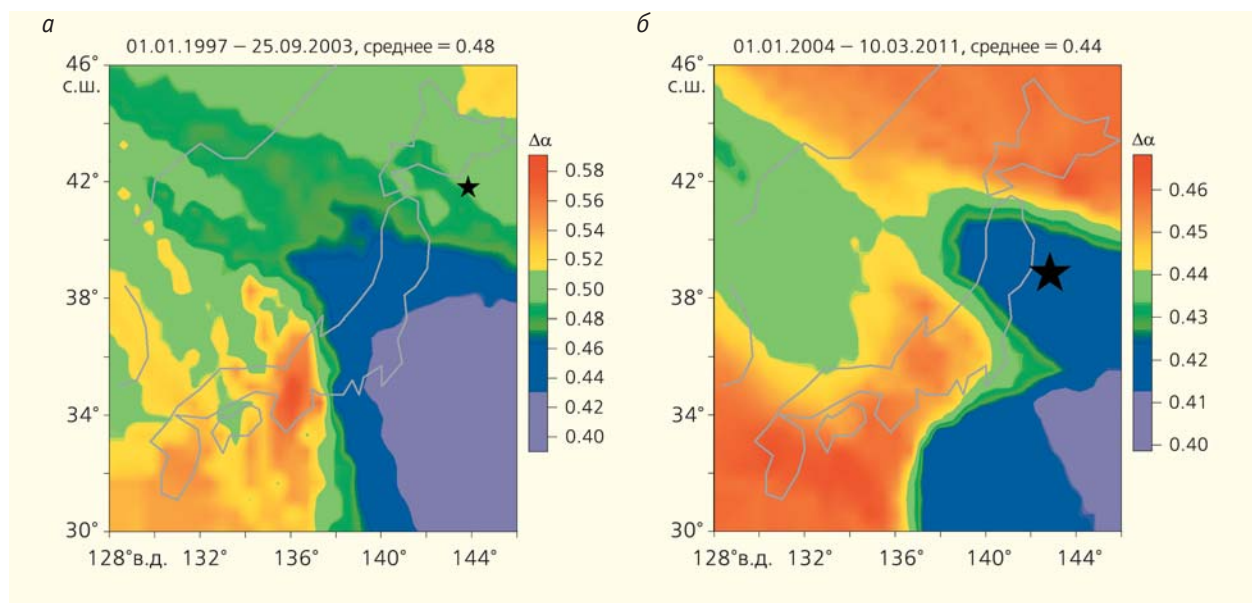


Рис.4. Усредненные карты распределения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  для волновых форм низкочастотных микросейсм сети наблюдений F-net в различные промежутки времени. Звездочками показаны эпицентры катастрофических событий 25.09.2003 г. ( $M = 8.3$ ) и 11.03.2011 г. ( $M = 9.0$ ).

дующий день после катастрофы) до середины мая 2012 г. Для карты на рис.5,*а* важно отметить следующее: общий (средний) уровень значений резко увеличился (от 0.44 на рис.4,*б* до 0.64 на рис.5,*а*); область, содержащая эпицентр ВЯЗ и афтершоки, после сейсмической катастрофы характеризуется максимальными значениями  $\Delta\alpha$ , т.е. там произошел распад консолидированного состояния и возросло числа степеней свободы.

На следующих двух картах (рис.5,*б,в*) видно, что среднее значение  $\Delta\alpha$  уменьшается, хотя в дальнейшем (рис.5,*г*) наблюдается небольшое увеличение. Важная особенность этих карт в том, что область в нижнем правом углу рассматриваемого региона существовала до катастрофы (в 1997–2010 гг.) и остается после мегаземлетрясения (11.03.2011 г.) местом относительно низких значений  $\Delta\alpha$ . Таким образом, следуя интерпретации ширины носителя спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  как меры (силы) хаоса, делаем вывод: рассматриваемая область характеризовалась ранее и характеризуется сейчас пониженной мерой хаоса, а значит, была ранее и остается до сих пор опасной.

Можно предположить, что после события у берегов Хоккайдо 25.09.2003 г. вследствие распада некогда единой зоны пониженного хаоса (рис.4,*а*) на две части (рис.4,*б*) сложилась ситуация, когда сильное событие могло произойти как в северной, так и в южной ее половине. Под влиянием различных случайных воздействий «задействована» была только северная, а южная часть низкого хаоса осталась нетронутой. Уместно выдвинуть гипотезу, что в результате ВЯЗ была сброшена лишь половина накопленных напряжений,

а вторая половина ждет своего часа. И именно эта часть оставшегося сейсмического потенциала представляет собой большую опасность в силу своей близости к столице Японии.

Возникает резонный вопрос: насколько обосновано рассматривать карты значений  $\Delta\alpha$  в широкой прямоугольной области (рис.4, 5) на основе данных, полученных на станциях, расположенных на островах вдоль ее «главной диагонали» (рис.1)? Подобного рода вопрос (или оценка надежности, вычисление ошибок и доверительных интервалов) — один из самых сложных в статистике. Конечно, было бы правильно рядом с каждой картой представить еще карту распределения стандартного отклонения (ошибки). Однако рассмотрение этих методов выходит далеко за рамки нашей статьи. Разумеется, чем дальше от пунктов измерения, тем меньше надежность значений, представленных на карте, и тем больше их ошибка. Но приходится делать выводы на основании тех данных, которые имеются в наличии, а не тех, которые должны быть в идеальной ситуации. Следует заметить, что в южной области пониженного хаоса имеются три сейсмические станции, расположенные в океане на малых островах (рис.1), и именно их данные делают выводы о низких значениях  $\Delta\alpha$  в нижнем правом углу обособленными. Кроме того, при интерпретации карт (рис.4, 5) важно учитывать, что местом сильнейших цунамигенных землетрясений Японии являются именно побережье и прилегающая акватория Тихого океана (а не внутреннего Японского моря). Именно там находится океанический желоб — зона субдукции океанических плит.



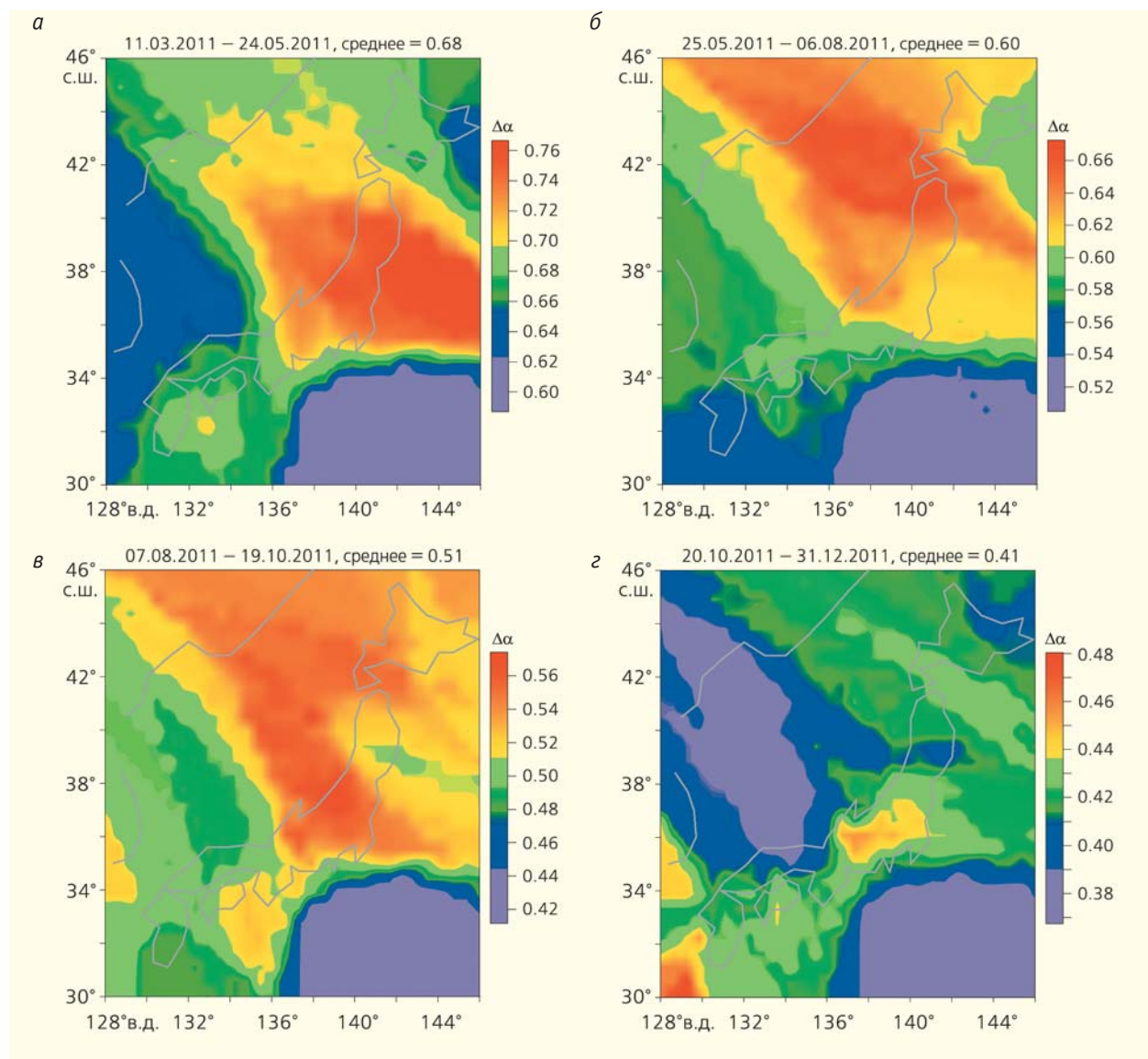


Рис.5. Усредненные карты распределения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  для волновых форм низкочастотных микросейсм сети наблюдений F-net в последовательных временных интервалах длиной 107—108 дней.

### Самый сложный вопрос — время

Последовательность карт распределения  $\Delta\alpha$  по пространству, полученных в скользящем временном окне (возможно, с сильным перекрытием соседних окон), служит фактически своего рода динамической оценкой сейсмической опасности (рис.5). Если сгенерировать достаточно длинную последовательность таких карт, то их можно «прокрутить» наподобие мультфильма и реконструировать возникновение, жизнь и исчезновение областей пониженного хаоса, каждая из которых свидетельствует об увеличении опасности. Если в каком-то месте возникло такое «пятно синхронизации» и оно стабильно и увеличивается по площади, то это можно рассматривать как сигнал:

опасность растет. Размер области пониженных значений  $\Delta\alpha$  (пониженного хаоса) дает оценку силы готовящейся катастрофы. Но самый сложный вопрос — определение времени события.

Действительно, если критическое явление готово произойти, то толчком к нему может быть самое незначительное и случайное событие, которое сдвинет шаткое равновесие. Снежная лавина может начаться от громкого крика туриста, а Первая мировая война началась от знаменитого выстрела в Сараево. Но кто же может дать точный прогноз, когда какому-то туристу в горах захочется проверить силу своих легких и когда террорист надумает спустить курок на официальной церемонии? Однако можно утверждать, что если критическое явление готово начаться, то оно с большой вероят-

ностью дождется того или иного случая. Для сейсмического события такими факторами могут стать электромагнитная буря, тайфун, волны от удаленного землетрясения, приливные деформации земной коры [1]. Например, катастрофу на Суматре (26.12.2004 г.,  $M = 9$ ), скорее всего, спровоцировало землетрясение на о.Маккуори, к югу от Новой Зеландии (23.12.2004 г.,  $M = 7.9$ ) [24].

Трудно сказать что-то определенное относительно причины начала ВЯЗ. Однако удалось заметить одну особенность поведения мультифрактальных параметров сейсмического шума, которая, как представляется, может иметь отношение к оценке времени события. Помимо параметра  $\Delta\alpha$ , как уж было сказано выше, интерес представляет также параметр  $\alpha^*$  — обобщенный показатель Херста, или наиболее часто встречающийся показатель Гельдера—Липшица, который определяет максимум спектра сингулярности  $F(\alpha)$ . В общем случае оба параметра,  $\Delta\alpha$  и  $\alpha^*$ , совершенно независимы. Но оказалось, что для сейсмического шума между ними есть статистическая связь (корреляция), зависящая от времени.

На рис.6 представлен график изменения коэффициента корреляции между средними (по всей сети станций) параметрами  $\alpha^*$  и  $\Delta\alpha$ , вычисленного в скользящем временном окне длиной 1 год. Картина примечательна тем, что она содержит две яркие аномалии поведения коэффициента корреляции — острые минимумы в 2002 и 2009 гг. Поскольку

ку после первой аномалии 2002 г. последовало крупное землетрясение 25 сентября 2003 г., логично предположить, что второй острый минимум коэффициента корреляции мог быть предвестником еще более сильного события, происшедшего во второй половине 2010 г. А наш график позволил уже в конце 2009 г. сделать вывод [20, 22], что начиная с середины 2010 г. следует ждать сильное (магнитудой  $M = 8.5-9.0$ ) землетрясение на Японских о-вах. По данным, полученным после катастрофы, можно заметить третий заостренный минимум коэффициента корреляции при положении правого конца годового скользящего окна в начале 2012 г. Если исходить из анализа поведения коэффициента корреляции перед двумя предыдущими сильнейшими землетрясениями, то логично предположить еще одно мегаземлетрясение в Японии через 1.5—2.5 года после возникновения третьего заостренного минимума, т.е. во второй половине 2013 г. — первой половине 2014 г. Конечно, определение времени будущего сильного землетрясения, как уже говорилось, самый сложный вопрос в оценке сейсмической опасности и способ прогноза времени, изложенный выше, весьма дискуссионный и нуждается в дальнейшей проверке.

## Вместо заключения

Какой опыт можно вынести из истории прогноза ВЯЗ? Основной недостаток представленного прогноза — то, что данный случай единичный. Мне пришлось выслушать немало ехидных замечаний, что неплохо было бы «попрогнозировать» в другом месте. Вот тогда и посмотрим, что у тебя получится, и не был ли твой удачный прогноз случайным совпадением. Следует отметить, что выше изложена лишь краткая история прогноза. Многие детали опущены просто из-за того, что их изложение требует слишком тяжеловесного статистического аппарата [9]. Однако для случайного совпадения общее число публикаций с прогнозом до землетрясения (с конца 2008 по конец 2010 г.) все-таки многовато. Кроме того, прогноз основан на использовании общих принципов. Статистика  $\Delta\alpha$  ширины носителя спектра сингулярности — объективная мера синхронизации (уменьшения хаоса) перед катастрофическими явлениями.

В ответ же на пожелание проверить методику прогноза в другом регионе сразу же возникает вопрос: в каком «другом регионе»? Где есть достаточно густая сеть непрерывного мониторинга, данные которой свободно выставлены в Интернете для всех желающих? Мои попытки найти такую сеть не увенчались успехом. Как это ни печально, но даже там, где такие сведения существуют, они не предоставляются в свободное пользование владельцами сетей — либо по нежеланию давать их «чужим», либо вследствие отсутствия необходимого программного интерфейса, который позволил бы вы-

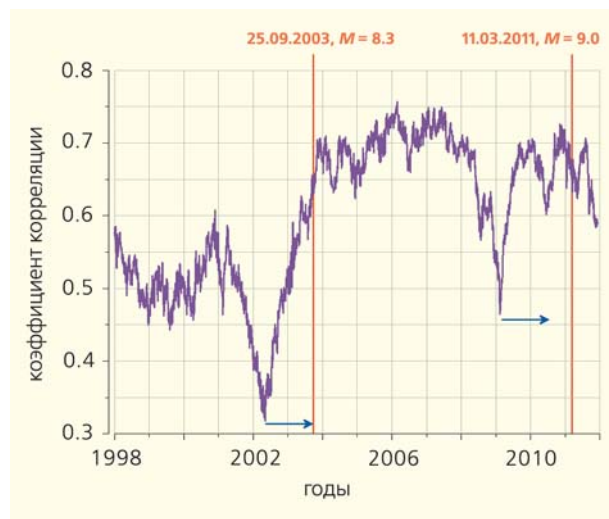


Рис.6. Изменения коэффициента корреляции между средними по всем станциям сети ежедневными значениями величин  $\alpha^*$  и  $\Delta\alpha$  в скользящем временном окне длиной 1 год в зависимости от положения правого конца временного окна. Горизонтальными стрелками выделены временные интервалы одинаковой длины от момента первого глубоко «заостренного» минимума до землетрясения 25 сентября 2003 г. и от момента второго минимума (имеющего тот же характер) до июля 2010 г., который оценивался как начало ожидания катастрофы.

брать нужный формат от заданных станций за нужный промежуток времени (грубо говоря, данные «свалены в бесформенную кучу»). Сделать такой интерфейс сравнительно несложно, но бюрократия и лень мешают довести дело до конца. Результат есть, но большей частью «пропадает зря».

Наконец, самый последний и главный вывод: до тех пор пока не произойдет качественный скачок в увеличении объема анализируемой информации, пока не будут созданы достаточно густые сети непрерывного геофизического мониторинга, пока не будет обеспечен быстрый и простой до-

ступ к полученным данным для всех желающих (как это сделано в Японии), проблема прогноза землетрясений не сдвинется с мертвой точки. Следует подчеркнуть, что для того чтобы работать с огромным объемом данных, необходимо специализированное программное обеспечение. Широко распространенные стандартные статистические пакеты для этих целей совершенно непригодны. Относительный успех представленного прогноза в значительной мере обусловлен тем, что подобный аппарат совместного анализа временных рядов высокой размерности был уже создан [6]. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 12-05-00146.**

## Литература

1. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М., 2003.
2. *Rbie J., Romanowicz B.* Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // *Nature*. 2004. V.431. P.552–554.
3. *Федер Е.* Фракталы. М., 1991.
4. *Малла С.* Вэйвлеты в обработке сигналов. М., 2005.
5. *Kantelhardt J.W., Zschiegner S.A., Koncsienly-Bunde E. et al.* Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series // *Physica A*. 2002. V.316. P.87–114.
6. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М., 2007.
7. *Любушин А.А.* Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // *Физика Земли*. 2008. №4. С.17–34.
8. *Любушин А.А.* Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // *Физика Земли*. 2009. №5. С.15–28.
9. *Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т.10. №1. С.9–35.
10. *Гилмор Р.* Прикладная теория катастроф: В 2 кн. М., 1984.
11. *Ivanov P.Ch., Amaral L.A.N., Goldberger A.L. et al.* Multifractality in healthy heartbeat dynamics // *Nature*. 1999. V.399. P.461–465.
12. *Павлов А.Н., Анищенко В.С.* Мультифрактальный анализ сложных сигналов // *Успехи физических наук*. 2007. Т.177. №8. С.859–876.
13. *Садовский М.А.* О естественной кусковатости горных пород // *Докл. АН СССР*. 1979. Т.247. №4. С.829–832.
14. *Turcotte D.L.* Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. N.Y., 1997.
15. *Любушин А.А.* Модель сейсмического процесса в блоковой среде // *Современные методы интерпретации сейсмологических данных (Вычислительная сейсмология. Вып.24)*. М., 1991. С.50–61.
16. *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.* 2008. P.92.
17. *Пинегина Т.К.* Землетрясение и цунами в Японии // *Природа*. 2011. №5. С.43–51.
18. *Левин Б.В., Родкин М.В., Тихонов И.Н.* Великое Японское Землетрясение // *Природа*. 2011. №10. С.14–22.
19. *Любушин А.А.* Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // *Физика Земли*. 2010. №6. С.86–96.
20. *Любушин А.А.* Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // *Физика Земли*. 2011. №6. С.26–34.
21. *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.* 2010.V. 12. EGU2010-696.
22. *Lyubushin A.A.* Synchronization phenomena of low-frequency microseisms // *European Seismological Commission, 32nd General Assembly, Sept. 06–10, 2010, Montpellier, France. Book of abstr. 2010. Ses. ES6. P.124.*
23. *Любушин А.А.* Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // *Наука и технологические разработки*. 2011. №1. С.3–12.
24. *Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 года на Суматре // *Физика Земли*. 2007. №5. С.3–16.