

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛУЧАЙНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.А. Любушин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

Эл. почта: lyubushin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18.10.2014; принята к печати 5.12.2015

В статье дается обзор методов прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности на основе новых подходов к анализу случайных флуктуаций геофизических характеристик. Рассматривается применение этих методов к прогнозу Великого восточно-японского землетрясения 11 марта 2011 г. и к оценке глобальной сейсмической опасности.

Ключевые слова: синхронизация, мультифракталы, случайные флуктуации, землетрясения, прогноз.

PROGNOSTIC PROPERTIES OF STOCHASTIC VARIATIONS IN GEOPHYSICAL PARAMETERS

A.A. Lyubushin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia

E-mail: lyubushin@yandex.ru

Methods for earthquake forecast and seismic hazard estimation based on novel approaches to analysis of stochastic fluctuations of geophysical parameters are reviewed. The approach is exemplified with the case of prediction of the Great East Japan Earthquake that occurred on 11 March 2011. The applicability of the approach to estimating global seismic hazard is discussed.

Keywords: synchronization, multi-fractals, stochastic fluctuations, earthquake, prognosis.

Введение: решаема ли проблема прогноза землетрясений?

В 1997 г. группой 4 известных американских геофизиков-математиков была опубликована статья [41], в которой весьма резко и безапелляционно было заявлено, что решения проблемы прогноза землетрясений не существует. Эта статья вызвала широкую дискуссию, и геофизический мир разделился на оптимистов и пессимистов по их отношению к прогнозируемости сейсмических событий. С тех пор прошло много времени, и процент пессимистов стал преобладающим. Высказывать скептицизм и иронию по отношению к проблеме прогноза стало признаком хорошего тона. Сейчас во многих международных геофизических журналах действует негласное правило отвергать под тем или иным благовидным предлогом статьи на тему прогноза землетрясений. Иными словами, прогноз землетрясений приравнивается к попытке построения вечного двигателя. Вновь и вновь появляются статьи на тему о непредсказуемости землетрясений как «фундаментальном свойстве» сейсмического процесса [4].

В основном эта аргументация основана на свойстве нелинейности природных процессов. Известно, что даже самые простые нелинейные динамические системы демонстрируют хаотическое поведение и сильную зависимость поведения своих траекторий от начальных условий [2, 39]. Немалую роль в неприятии возможности прогноза землетрясений сыграла идея самоорганизующейся критичности, введенная в сейсмологию в статье [40]. Согласно модели самоорганизующейся критичности, сейсмоактивный регион практически постоянно находится недалеко от «критического порога», вследствие чего землетрясе-

ние происходит под влиянием небольших внешних случайных возмущений, которые вынуждают систему перейти этот порог. В этом случае прогноз землетрясений сводится к необходимости прогнозирования воздействия внешних факторов, что практически невозможно, поскольку эти воздействия случайны, малы и большей частью не поддаются измерению.

Постепенно во всем мире работы по прогнозу землетрясений свертываются, прекращается финансирование как теоретических исследований, так и продолжения наблюдений на геодинамических полигонах, а высвобождающиеся научные силы переключаются на более надежные работы по оценке сейсмического риска и сейсмическому районированию, что ставит своей конечной целью определение, с каким запасом прочности надо строить сооружения в сейсмоактивных регионах.

Это означает, что фундаментальная научная проблема (то есть такая, которая может иметь решение, а может и не иметь) постепенно подменяется чисто технической (такой, которая всегда имеет решение – надо только постараться): ведь если всюду строить максимально надежно, из расчета на самое сильное землетрясение, то и решение проблемы прогноза вроде бы станет ненужным, и можно жить спокойно. Такое рассуждение, однако, имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, строить максимально надежно очень дорого. Во-вторых, в мегаполисе из большого числа максимально надежно построенных зданий всегда найдется какое-нибудь максимально слабое звено, разрушение которого может привести к большим неприятностям: газовая коммуникация, тоннель, опора моста, треснувший фундамент – ведь сооружения также стареют, а для того, чтобы их со-

держат в постоянной «сейсмологической» готовности, нужны средства, вполне сравнимые с постройкой новых зданий. В-третьих, немаловажен чисто психологический фактор паники, возникающей среди людей под воздействием мощных сейсмических колебаний почвы и зданий, качающихся люстр, падающих предметов и разбивающихся окон (осколки которых при падении с высоты представляют прямую угрозу жизни), внезапной остановки скоростных электропоездов и метро с выключением света на неопределенное время. В-четвертых, экономический ущерб от неполадок в средствах связи и тонких технологиях также может быть весьма существен. Не нужно большого воображения, чтобы перечислить еще много чего в-пятых и в-шестых и так далее. Другими словами, человек никогда не сможет абсолютно защитить себя от последствий сильных землетрясений, и поэтому их прогноз имеет огромное практическое значение.

Отношение к проблеме прогноза землетрясений в современной геофизике является сложным. Если кто-то всерьез говорит о том, что он занимается прогнозом, то к нему (за редким исключением особо признанных авторитетов) могут отнестись как к слегка ненормальному – ну разве можно об этом говорить вслух? Если ты хочешь все-таки сказать, что имеешь отношение к прогнозу землетрясений, то обязательно приправь это сообщение изрядной долей иронии по отношению к самому себе и дай понять, что это занятие для тебя – что-то вроде безобидного хобби, а настоящие твои интересы лежат совсем в других областях. На самом же деле, никакая другая геофизическая задача реально не может быть более интригующей и интересной. Это прекрасно понимают все: и скептики и энтузиасты, ученые и чиновники, журналисты и расплодившиеся в последнее время эксперты по «эзотерическому знанию». Но на специалистов-геофизиков, которые все-таки могут сказать больше всех о землетрясениях, действует психологический груз поражений, разочарований и несостоявшихся надежд во многих предыдущих попытках решить проблему прогноза. Этот груз заставляет более или менее добросовестных геофизиков любое утверждение о прогрессе в области прогноза землетрясений формулировать с чрезвычайной осторожностью и большими оговорками.

Многие ученые избегают иметь дело с прогнозом землетрясений, потому что это занятие неблагодарное, не гарантирует положительного результата, не способствует успешной карьере. Немногие хотят быть объектом 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 не корректной, не решаемой и поставить на ней крест. Однако от того, что прогноз землетрясений объявляется не решаемым, проблема не исчезает. Более того, всякий раз после сейсмических событий со значительным числом жертв эта проблема упрямо реанимируется. И вновь ставится вопрос: а можно ли было предсказать катастрофу?

На сегодняшний день значительная часть методов прогнозирования строится на основании анализа

сейсмических каталогов [5, 32]. 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 минимум информации – о времени, месте, силе. 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 событий 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, что приводит к малому объему информации для обучения методов и, как следствие, к большой неопределенности результата прогноза. Отсутствие успехов в традиционном прогнозе лишней раз подтвердило широко распространенное мнение о принципиальной непредсказуемости землетрясений. Два последних мега-землетрясения с магнитудой 9 (Суматранское 26 декабря 2004 г. и Японское 11 марта 2011 г.) традиционные методы пропустили.

С точки зрения механики сильное землетрясение, очевидно, является разрядкой, высвобождением в виде сейсмических волн огромного количества энергии, накопленной в земных недрах [3]. Сразу же возникает вопрос: может ли накопление произойти совершенно незаметно, без существенных изменений в физико-химических свойствах горных пород? Здравый смысл подсказывает: нет, конечно, что-то должно измениться. Следовательно, необходимо наблюдать за изменениями во времени какой-нибудь физической характеристики, достаточно полно отражающей состояние горных пород, и, согласно этой логике, перед землетрясением она, возможно, будет проявлять аномальное поведение.

История прогноза землетрясений изобилует сообщениями об аномальном поведении множества геофизических и геохимических характеристик [29, 32]. Вот некоторые из них: электросопротивление и электромагнитное излучение горных пород, интенсивность сейсмоакустической эмиссии («подземный звук»), колебания уровня подземных вод в глубоких скважинах и изменение их химического состава, интенсивность выделения газов из разломов, вариации линейных и объемных деформаций, а также наклонов земной коры, изменение отношения скорости продольных сейсмических волн к скорости поперечных волн и т. д.

Примечательно, что аномальное поведение почти каждой из вышеперечисленных характеристик перед

землетрясением имеет надежный фундамент из соответствующих физических и химических закономерностей поведения геоматериалов. Многие предвестниковые эффекты теоретически следуют из моделей, описываемых системами дифференциальных уравнений, выведенных «из первых принципов». Более того, все или почти все элементы предвестникового поведения получили свое экспериментальное подтверждение в лабораторных опытах, представляющих собой длительное нагружение (вплоть до разрушения) образцов геоматериалов и моделирующих таким образом подготовку очага геокатастрофы [32]. Современная геофизика может ответить на многие вопросы, касающиеся сейсмического процесса, начинающиеся со слов «почему». Парадокс заключается в том, что этот багаж знаний не помогает ответить на вопросы, начинающиеся со слов «когда» и «какой силы».

Такое положение дел явно находится в противоречии с традиционным подходом, принятым в современном естествознании, особенно в той ее части, которая тесно связана с физикой (сюда же относятся и геофизика). Согласно этому подходу сначала надо разобраться во всех «винтиках» явления, разложить его на элементарные составляющие, «атомы», поддающиеся формальному математическому описанию. После этого считается, что явление познано, поскольку его, подобно игрушке из детского конструктора, можно собрать из полностью известных элементов.

Такой подход неоднократно доказывал свою эффективность, и, вообще говоря, то, что он до сих пор не дал решения проблемы прогноза землетрясений, у многих вызывает досаду и недоумение. Это влечет за собой импульс к дальнейшим исследованиям в направлении «разобраться до конца в физике явления», а уж только потом, когда все будет ясно, заняться прогнозом, успешность которого тем самым будет уже гарантирована автоматически. Логика следующая: наверное, ранее что-то недоучили, пропустили какой-то важный элемент поведения, давайте введем нелинейные связи (наверное, в них вся соль), тщательнее выпишем системы уравнений и не будем их упрощать, а постараемся найти компьютер помощнее и посчитаем «в лоб», будем, в конце концов, измерять точнее, с помощью более совершенных приборов, на пределе возможностей современной измерительной техники.

Каждая такая попытка неизменно кончалась крахом. То, что было хорошо на мониторе компьютера и в лаборатории, становилось удивительно капризным и неустойчивым «на природе», в полевых условиях: «предвестник» наблюдается, а землетрясения не происходит (ложная тревога); и наоборот – грянет землетрясение, но ничего примечательного перед ним не было заметно (пропуск цели: потом уже – задним числом – конечно, что-нибудь да находят). Земная кора предстает перед ошеломленным исследователем во всей сложности своих связей и взаимных влияний, причины и следствия постоянно меняются местами, невозможно выделить главное, чтобы, моделируя и контролируя его, следить за приближением катастрофы. А тут еще и влияние самых разнообразных шумов, искажающих геофизическую информацию: вариации атмосферного давления, температуры, влажности, осадки, ветер и, наконец, индустриальная деятельность человека, шум от которой невозможно даже измерять. Самое время махнуть на все рукой и признать проблему неразрешимой.

Отдельные группы исследователей продолжают построение различных физических и математических моделей сейсмического процесса, подчас очень остроумных и выявляющих неочевидные и далекие аналогии между землетрясениями и поведением экологических систем, например. Многие модели и методы, зародившиеся в недрах теоретической физики в связи с совсем другими потребностями, были апробированы на проблеме моделирования сейсмического режима и прогноза землетрясений. Здесь и теория перколяции, динамический хаос и странные аттракторы, клеточные автоматы и решеточный газ. Эти исследования за последние 30 лет необычайно расширили словарь современного геофизика и высветили многие грани сейсмического процесса. Но в конечном итоге они принесли эстетическое наслаждение немногим ценителям, понимающим в этом толк, однако не дали продвижения в реальных, практических вопросах прогноза, которые ставят перед учеными «люди с улицы»: когда, какой силы?

Как подойти к проблеме прогноза

В настоящее время общепризнанно, что все критические явления имеют сходные черты. Исследование этих особенностей можно объединить под общим названием «науки о критических явлениях». Изначально под критическими явлениями понимали, в основном, фазовые переходы, и, следовательно, это была епархия статистической физики и термодинамики. Однако позже, когда было осознано, что математический аппарат, описывающий разрушение строительной конструкции, фазовый переход в жидкости и образование каустик в оптике, имеет поразительно много общего, зародилась математическая теория катастроф [1]. Накопление опыта анализа критических явлений с общих позиций привело к качественной формулировке относительно небольшого числа так называемых «флагов катастроф», то есть наиболее общих качественных признаков поведения любых систем, приближающихся к точке резкой смены своего состояния [1, 2].

Вернемся к землетрясениям и попытаемся понять, как реально можно применить эти красивые абстрактные концепции к прогнозу, учитывая, что придется иметь дело с «грязными», сырыми данными геофизических измерений, содержащих сбой аппаратуры, перерывы в наблюдениях, влияния вышеперечисленных шумов. Ведь в данном случае невозможно выписать какой-нибудь потенциал и исследовать его особенности в точках равновесия, как это принято, например, в математической теории катастроф. Следовательно, необходимо взять на вооружение максимально общую закономерность, своего рода метазакон, и трансформировать его таким образом, чтобы он мог работать с реальными данными, что подразумевает применение статистических методов анализа данных, адекватных этому метазакону. Необходимо научить компьютер выделять из данных геофизических наблюдений самую главную их суть и отбрасывать малозначительные детали. При этом опасение выплеснуть с водой и ребенка является для геофизика весьма актуальным при анализе и интерпретации данных.

В качестве такого метазакон предлагается брать феномен увеличения коллективного поведения или синхронизации геофизических полей в области под-

готовки землетрясения. Почему именно синхронизация, увеличение коллективного поведения измеряемых характеристик должно представлять интерес для задач мониторинга и иметь отношение к подготовке землетрясения или иной геокатастрофы? Для этого есть методические рекомендации, вытекающие из наиболее общих закономерностей поведения систем, приближающихся к бифуркации, катастрофе. Увеличение радиуса корреляции флуктуаций в окрестности точки бифуркации указывает на тенденцию к установлению согласованности во всем объеме системы, которая тем самым готовится к коллективному переходу в новое состояние [30]. В статистической физике жидкостей такое поведение известно как «критическая опалесценция» или аномальная дисперсия, которая рассматривается как один из универсальных «флагов» приближающейся катастрофы [1]. Иными словами, целью анализа многомерных временных рядов систем мониторинга предлагается считать поиск сигналов синхронизации, согласованности вариаций наблюдаемых параметров, относящихся к состоянию земной коры, измеряемых в разнесенных пунктах системы геофизического мониторинга, покрывающей исследуемый участок земной коры.

Если бы дело ограничилось только пожеланиями, какого рода сигналы следует искать, без формального описания того, как это надо делать, и реализации алгоритмов в виде программ, то в этой идее не было бы ничего нового и оригинального, так как в той или иной форме она всегда витала в воздухе и считалась даже очевидной среди исследователей, занимавшихся прогнозом землетрясений. Ведь если имеется серия графиков измерений различных характеристик на геофизическом полигоне, то исследователь прежде всего старается найти элементы общего поведения, какие-нибудь «загогулины» и «крючочки», которые есть и тут, и там, и везде. Однако человеческий глаз весьма несовершенен в ситуации, когда необходимо проанализировать, например, 10 графиков одновременно. Кроме того, глаз может заметить только особенности низкочастотного, плавного поведения, причем лишь в том случае, если они не теряются на фоне помех. Далее, формализовать визуальные особенности графиков очень сложно, их восприятие весьма субъективно, и то, что для одного кажется аномалией, другим воспринимается как фон. А как быть в случае, если имеется очень слабый общий сигнал, присутствующий во всех измерениях в сумме с сильными индивидуальными помехами, характерными только для одного типа измерений или для того или иного места их проведения? Метод пристального взгляда здесь будет совершенно бессильным. Иногда помогает частотная фильтрация – способ цифровой обработки сигналов, когда колебания, имеющие периоды в заданном диапазоне значений, сохраняются, а все прочие подавляются. Но и он становится бессильным, если периоды и общего сигнала, и индивидуальных помех имеют одинаковый диапазон значений: тогда, подавляя помехи, мы заодно уничтожаем и сигнал.

Для того, чтобы эта идея могла фактически работать, необходима ее реализация в виде комплекса вычислительных алгоритмов и программ, позволяющих производить анализ многомерных временных рядов, скалярными компонентами которых являются

результаты измерения физически разнородных геофизических величин в разнесенных пунктах сети мониторинга.

Опыт проведения наблюдений в сейсмоактивных регионах показывает, что все процессы в земной коре более или менее равноправны в том смысле, что в любом из них доля предвестниковой информации сравнительно невелика, а значительная мощность вариаций приходится на шумы различного происхождения. Такая ситуация является общим положением, хотя иногда (очень редко) по отдельным процессам могут наблюдаться сильные предвестниковые изменения. Этим объясняется ненадежность и мозаичность исторически наблюдаемых предвестников землетрясений по тому или иному процессу [3, 29], несмотря на то что некоторые из них систематически появляются в лабораторных опытах по разрушению образцов [32]. Одна из причин этому может быть достаточно проста: при наблюдениях в лабораторных условиях нет шумов, и, как следствие, отношение сигнал/шум значительно выше, чем при полевых наблюдениях (в которых предвестники фиксируются тогда, когда уровень шумов случайно понижается перед событием). Поэтому проблема увеличения отношения сигнал/шум для реальных наблюдений является одной из основных для прогноза землетрясений. Однако проблема фильтрации помех, повышения отношения сигнал/шум, является не единственной причиной, для которой необходим многомерный анализ. Более важным стимулом представляется возможность анализировать взаимодействия, связи между различными геофизическими полями. Самые общие соображения и аналогии подсказывают, что наиболее тонкие, скрытые особенности поведения геофизических полей должны проявиться именно при анализе их взаимодействий.

Прежде чем стремиться увеличивать отношение сигнал/шум, очевидно, надо задаться вопросом: что здесь есть «сигнал»? В подходе, уже давно развиваемом автором, сигналом предлагается называть синхронизацию, согласованность вариаций наблюдаемых параметров, относящихся к состоянию земной коры, измеряемых в пространственно разнесенных пунктах системы геофизического мониторинга, покрывающей исследуемый участок земной коры. Основным аппаратом для анализа информации от сетей геофизического мониторинга является многомерный анализ временных рядов, многомерные параметрические модели и Фурье и вейвлет-преобразования [7–16, 45].

Исследование эволюции максимального собственного числа спектральных матриц и канонических когерентностей (которые представляются в виде частотно-временных диаграмм) и определение сигнала синхронизации как временных интервалов и частотных полос увеличения значений этих статистик, является важным инструментом анализа взаимодействия между геофизическими процессами [7, 8, 10, 13–16, 45]. Попутно решается и задача повышения отношения сигнал/шум, поскольку используемые методы как раз и нацелены на то, чтобы из множества регистрируемых процессов выделить максимально общую для всех тенденцию и пренебречь индивидуальными особенностями каждого процесса и места проведения измерений.

В работах [9, 11, 12] была развита конструкция агрегированного сигнала – такого скалярного сигнала, который в максимальной степени аккумулирует в себе наиболее общие вариации, присутствующие сразу во всех анализируемых процессах и в то же время подавляющие те составляющие, которые характерны только для одного (того или иного) процесса и имеют, как правило, характер локальных помех, обусловленных спецификой места проведения измерений, техногенными причинами или ошибками измерений. Агрегированный сигнал, в отличие от частотно-временных диаграмм, часто дает более наглядное и более привычное (в виде графика одного сигнала) для многих геофизиков представление о

поведении наиболее общих компонент, присутствующих во всех измеряемых величинах, что позволяет эффективнее использовать накопленный опыт и интуицию.

Некоторые примеры

Прежде чем переходить к рассмотрению конкретных примеров, 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 маг-

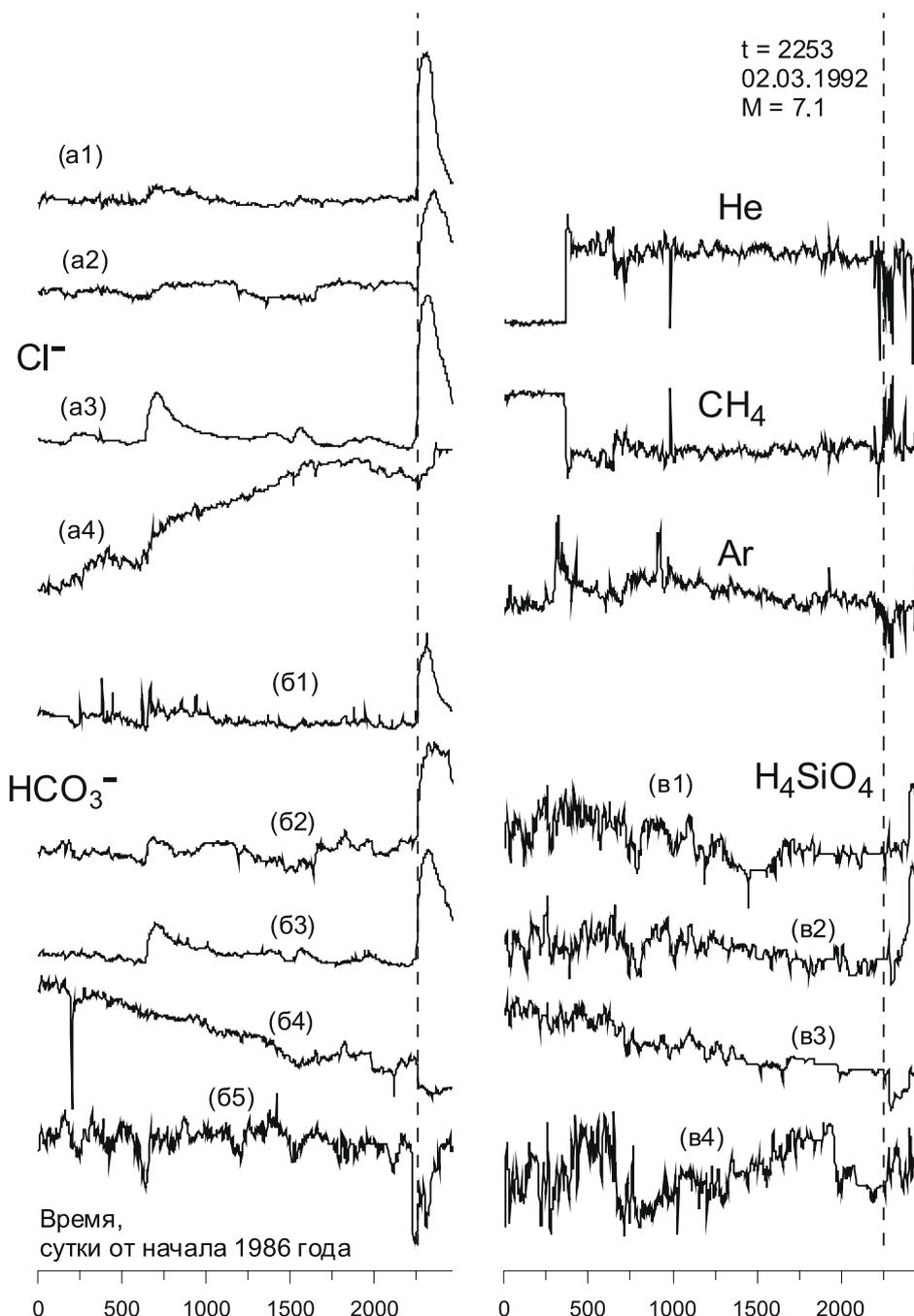


Рис. 1. Графики 16 временных рядов мониторинга гидрогеохимических показателей на системе скважин и источников на Камчатке. Первый отсчет – 03.01.1986, последний – 28.09.1992, интервал взятия отсчетов – 3 суток, общее число наблюдений в каждом ряду – 821. Группа (a1)–(a4) – концентрация Cl^- , группа (b1)–(b5) – концентрация бикарбонатных ионов HCO_3^- , группа (b1)–(b4) – концентрация кремниевой кислоты H_4SiO_4 в подземных водах. Вертикальной линией отмечен момент землетрясения $M = 7,1$ 02.03.1992

нитуду M : $\lg(E) = 4,8 + 1,5M$. Таким образом, увеличение магнитуды на единицу означает увеличение энергии сейсмических волн на полтора порядка, то есть 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.

На рис. 1 представлены графики 16 временных рядов различных геохимических показателей, относящихся к составу подземных вод в скважинах и самоизливающихся источниках Петропавловского геодинамического полигона Института вулканологии РАН, измерения проведены Ю.М. Хаткевичем в 1986–1992 гг. За время наблюдений в окрестности полигона (на расстоянии не более 130 км) произошли 2 сильных землетрясения: 06.10.1987, $M = 6,6$ и 02.03.1992, $M = 7,1$. Последнее событие является своего рода вехой в сейсмическом процессе на Камчатке, так как именно с него началась сильная активизация сейсмичности. К сожалению, измерения, сформировавшие эти ряды, производились вручную с интервалом 1 раз в 3 суток. Поэтому, несмотря на большую календарную длительность наблюдений их фактический объем невелик – всего 821 отсчет в каждом сигнале.

На рис. 2 представлена частотно-временная диаграмма эволюции частотно-зависимой меры связанности между 2 многомерными временными рядами – квадрата модуля максимальной канонической когерентности между 5-мерным временным рядом концентрации отрицательных бикарбонатных ионов (группа (б1)–(б5) на рис. 1) и 4-мерным временным рядом концентрации кремниевой кислоты (группа (в1)–(в4) на рис. 1) в подземных водах. Эта мера может принимать значения от 0 до 1, и, чем она ближе к 1, тем сильнее связь. Оценка строилась в скользящем временном окне длиной 100 отсчетов (300 суток) с помощью векторной модели авторегрессии

3-го порядка с предварительным устранением линейных трендов и переходом к приращениям в каждом окне. Видна отчетливая синхронизация (пятна повышенных значений) этих многомерных сигналов примерно за 500 суток до события 02.03.1992 (с учетом длины окна) на периодах от 20 до 50 суток. Примечательно, что если обрабатывать отдельно обе группы многомерных сигналов, то ни та, ни другая не дают никаких предвестников.

На рис. 3 представлены графики данных геофизического мониторинга в Северо-Восточном Китае. Данные для анализа были любезно представлены проф. Чанг Чаоченгом, Центр анализа и прогноза землетрясений (Prof. Zhang Zhaocheng, Center for Analysis and Prediction of Earthquakes, State Seismological Bureau, China). Набор исходных данных состоит из 10 временных рядов, представляющих собой результаты синхронной регистрации следующих геофизических параметров: электросопротивление горных пород – 3 ряда, графики 1–3 на рис. 3; наклоны – 3 ряда, графики 4–6 на рис. 3; вариации уровней подземных вод в скважинах – 4 ряда, графики 7–10 на рис. 3.

Характерный линейный размер наблюдательной сети составляет 200 км. Обрабатываемый интервал наблюдений составляет 8 лет: с 01 января 1972 г. по 31 декабря 1979 г. Интервал снятия отсчетов составляет 1 сутки, что обеспечивает длину рядов по 2922 отсчета в каждом. В течение обработанного интервала наблюдений произошло катастрофическое Тяньшаньское землетрясение ($M = 7,8$) 28 июля 1976 г. Момент этого землетрясения соответствует 1671 дню от начала 1972 г., и он наиболее ярко отражен в постсейсмической реакции на графике 9 рис. 3 вариаций подземных вод в пункте, находящемся непосредственно в эпицентральной зоне.

На графике 11 рис. 3 представлено поведение агрегированного сигнала первых 1670 отсчетов (то есть

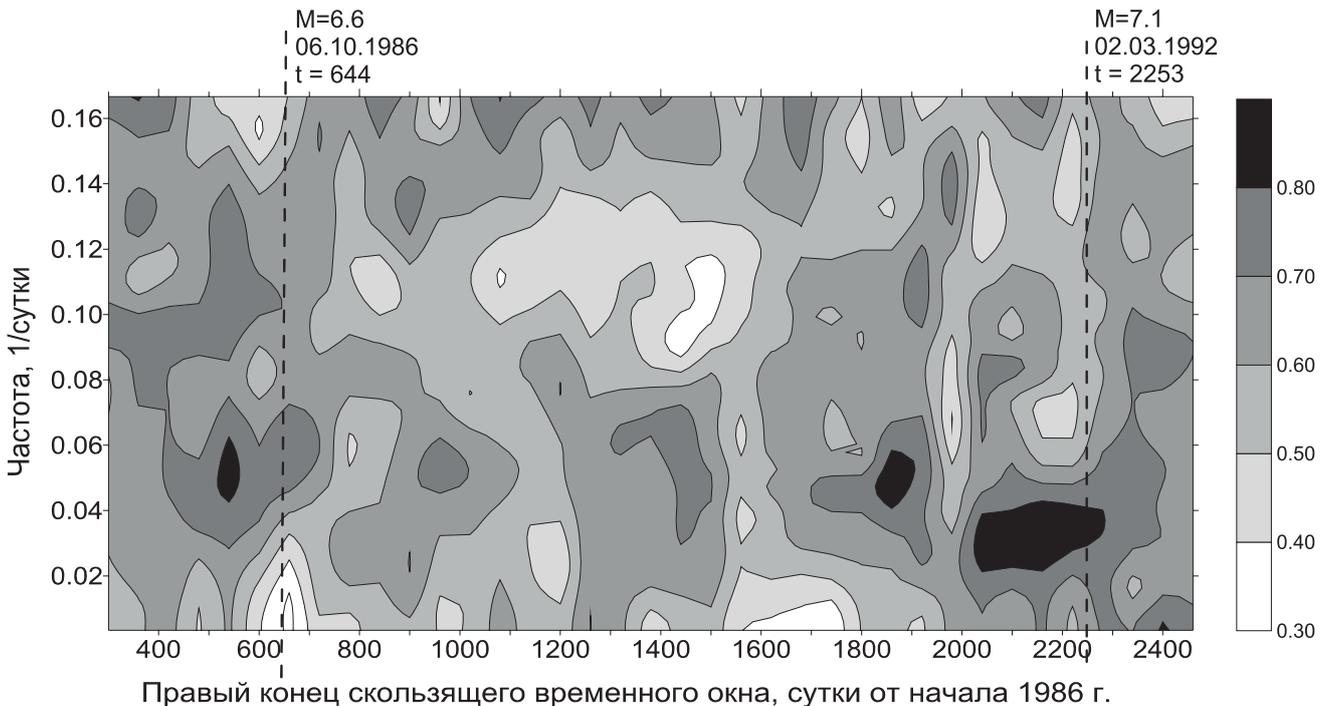


Рис. 2. Частотно-временные диаграммы квадрата максимальной канонической когерентности между 5-мерным временным рядом концентрации бикарбонатных ионов HCO_3^- , группа (б1)–(б5) на рис. 1 и 4-мерным временным рядом концентрации кремниевой кислоты H_2SiO_4 в подземных водах, группа (а1)–(а4) на рис. 1. Оценка в скользящем временном окне длиной 100 отсчетов (300 суток), векторная AR(3)-модель

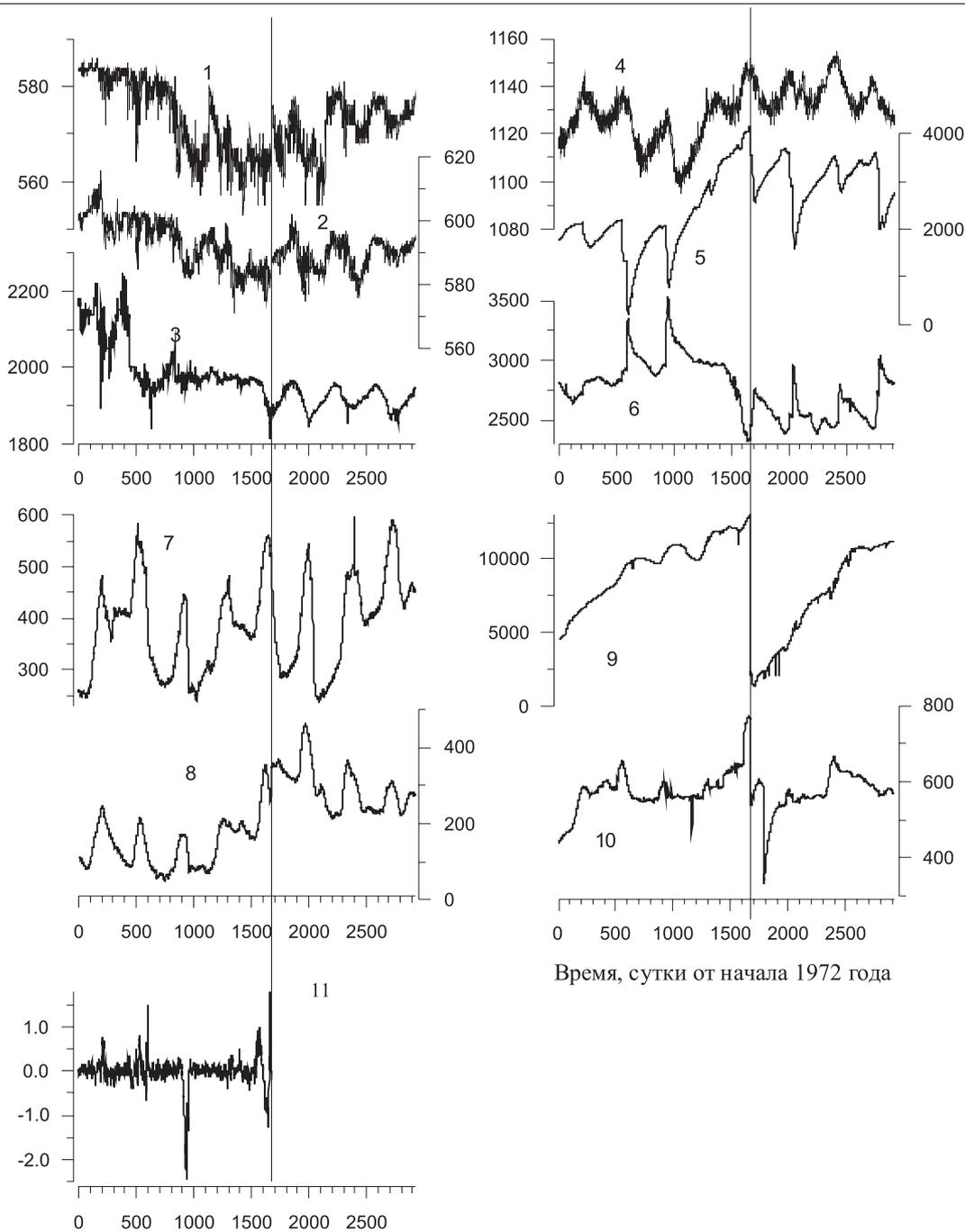


Рис. 3. Временные ряды мониторинга в Северо-Восточном Китае и их агрегированный сигнал. Графики 1–3 – электросопротивление горных пород; 4–6 – наклоны; 7–10 – вариации уровня подземных; 11 – вейвлет-агрегированный сигнал, построенный по первым 1670 отсчетам (строго до момента Тяньшаньского землетрясения 28.06.1976: $N = 1771$, $M = 7,6$); вертикальные линии – момент землетрясения

выборки, непосредственно примыкающей к моменту толчка) всех 10 временных рядов. Оно характеризуется амплитудной аномалией, предшествующей землетрясению и начавшейся приблизительно за 100 суток до момента толчка. Кроме того, график 11 содержит другие всплески для моментов времени менее 1000 дней, которые, по всей видимости, являются постсейсмическими реакциями или предвестниками других землетрясений.

Рис. 4 отражает изменение формы агрегированного сигнала на последнем участке, после 1000-го дня, по мере увеличения длины N обрабатываемой выборки (от 1500 до 1670 отсчетов) и ее приближения к моменту толчка.

Видно, что наиболее контрастный предвестник сформировался за 5 суток до землетрясения.

Эти два примера ярко иллюстрируют важность комплексного анализа разнородных данных для поиска скрытых сигналов коллективного поведения, предвещающих сильные землетрясения.

Прогностические свойства сейсмического шума

Развитие наблюдательной сейсмологии привело в конце 1990-х гг. к возникновению уникального инструмента получения информации о процессах в Земле – глобальной сети сейсмических станций.

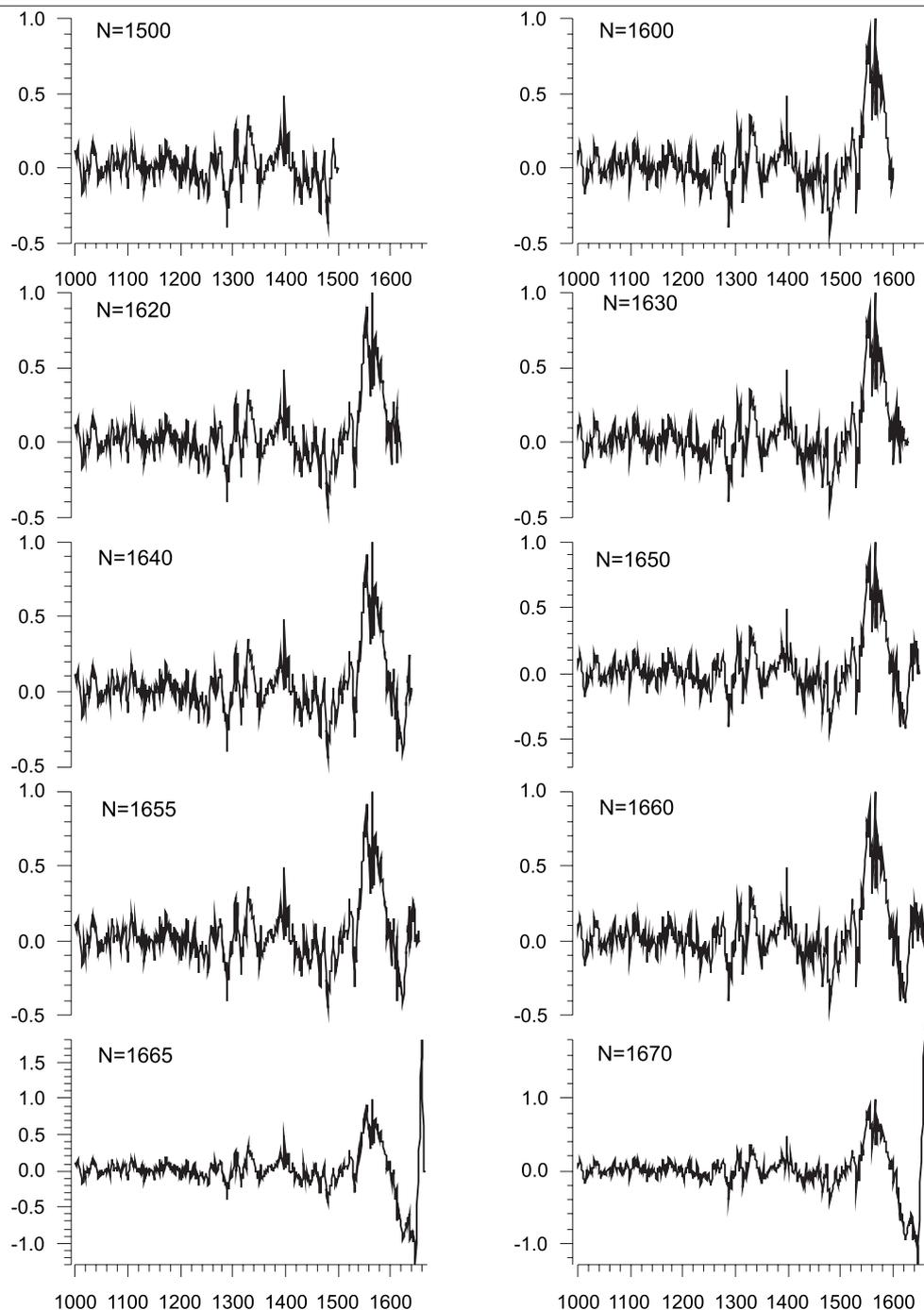


Рис. 4. Последовательное изменение формы агрегированного сигнала на рис. 3 на последнем участке, после 1000-го дня, по мере увеличения длины N обрабатываемой выборки (от 1500 до 1670 отсчетов) и ее приближения к моменту толчка

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, сделавшим запрос по адресу: <http://www.iris.edu/forms/webrequest.htm>. 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 сей-

смических записей) наиболее перспективен период от 2 до 500 мин. Этот частотный диапазон служит границей между сейсмологией и гравиметрией. Он малоизучен. В силу больших периодов (по сейсмологическим меркам) колебания в нем 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 [44, 55, 57].

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.

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. Второй параметр характеризует минимальную магнитуду, начиная с которой можно пытаться прогнозировать событие. Используя корреляционные соотношения между размером очага и магнитудой [32], нетрудно понять, что глобальную сеть можно использовать для прогноза землетрясений в нереальном диапазоне магнитуд – от 11 до 14, поскольку она характеризуется большими средними расстояниями между станциями и содержит много пустых «прогалов», не заполненных пунктами наблюдений.

Единственная сеть широкополосных станций, удовлетворяющая перечисленным требованиям достаточной густоты пунктов наблюдения, – сеть F-net

в Японии. Она состоит из 84 станций и непрерывно функционирует начиная с 1997 г. Ее данные свободно доступны по адресу: <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en>.

Размеры сети и среднее расстояние между станциями делают ее пригодными для прогноза событий с магнитудами 8–9. На рис. 5 представлены положения 78 станций сети F-net (шесть станций, расположенные на небольших удаленных островах южнее 30° с. ш., исключены из рассмотрения). Звездочками обозначены гипоцентры землетрясений 25.09.2003 г. ($M = 8,3$) и 11.03.2011 г. ($M = 9,0$).

На рис. 6 представлены записи вертикальных сейсмических колебаний длительностью 12 суток на одной из станций сети F-net после перехода путем вычисления средних значений в последовательных временных окнах длиной 60 с от шага 1 с 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.

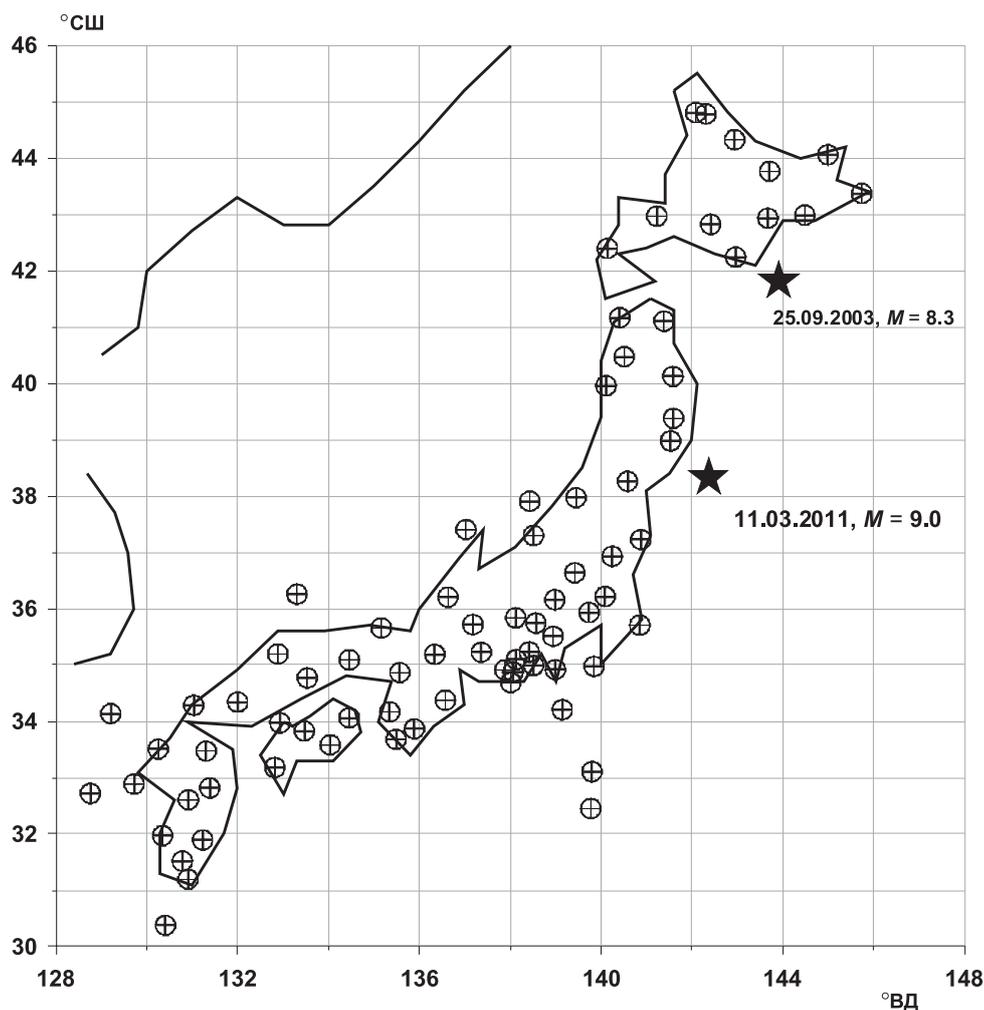


Рис. 5. Положения 78 широкополосных сейсмических станций сети F-net в Японии. Звездочками отмечены гипоцентры 2 сильнейших землетрясений, произошедших в Японии с начала 1997 г.

Уже сама используемая терминология подразумевает, что последний – это нечто лишнее, 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, то есть – сигнал. В излагаемом подходе к анализу сейсмических данных эта модель выворачивается наизнанку. Анализ гладких, или трендовых, составляющих сигналов мониторинга важен, но он, как правило, уже не приносит никакой новой информации. Мы же предлагаем обратить внимание на высокочастотную составляющую, пренебрежимо называемую «шумом». Как оказалось, именно структура шума дала принципиально новую и нео-

чевидную (скрытую) информацию. Иными словами, именно шум оказался сигналом. Каким же образом следует анализировать шум?

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 постоянных сейсмических колебаний земной поверхности. Для его исследования традиционный аппарат спектрального анализа (то есть исследования распределения энергии колебаний по частотам) оказывается малоэффективным. Поэтому геофизики пробуют различные методы современной теории сигналов (анализ временной структуры «выбросов» – anomalously больших по амплитуде значений шума, меры синхронизации параметров шума и др.), которые пока еще не вошли в стандартный набор инструментов, используемых сейсмологами для исследования данных [17, 24, 27, 33–36].

При анализе сейсмического шума наибольшую эффективность показало использование понятия мультифрактального спектра сингулярности [15–18]. Это понятие с начала 1990-х гг. используется в физике турбулентности и при рассмотрении финансовых и медицинских временных рядов. В данной статье нет никакой возможности дать строгое определение понятий фракталов и мультифракталов, и для подробного ознакомления отошлем читателя к монографиям [28, 38]. Для наших целей достаточно будет ограничиться кратким качественным описанием мультифрактального анализа применительно к случайным сигналам, зависящим лишь от одной переменной – времени. Суть мультифрактального спектра сингулярности для нашего частного случая представлена на рис. 7.

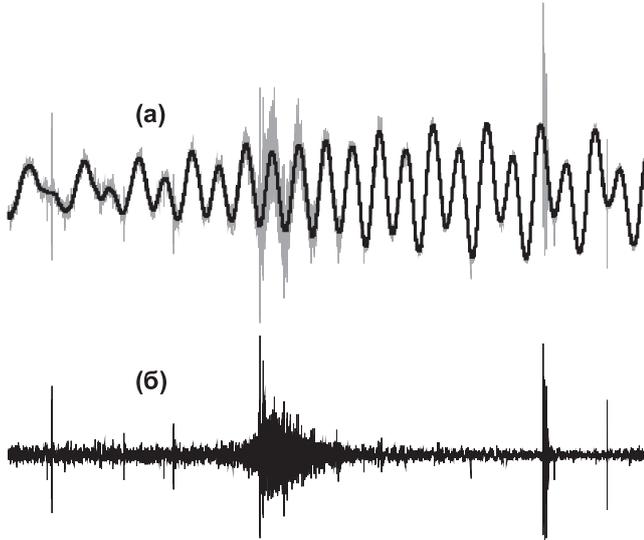
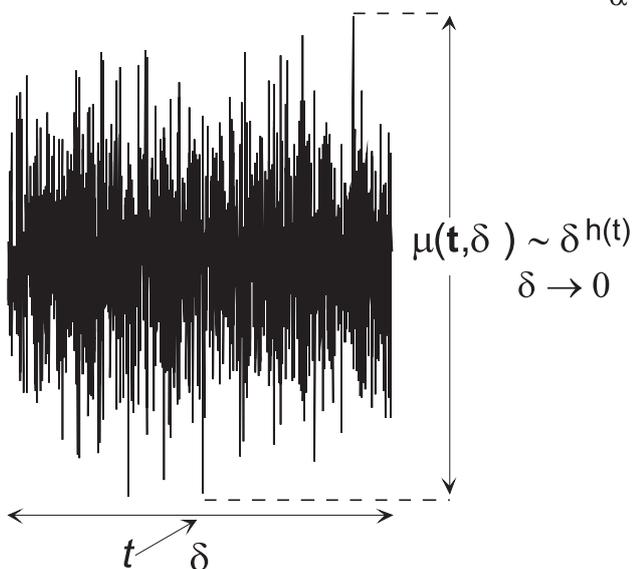


Рис. 6. Фрагмент записи низкочастотных сейсмических колебаний длительностью 12 суток: (а) – серой линией представлен график исходных данных, жирная черная линия соответствует гладкой составляющей сигнала (тренд); (б) – «шум», остаток после вычитания тренда

Мера изменчивости случайного сигнала на интервале времени $[t - \delta/2, t + \delta/2]$



Мультифрактальный спектр сингулярности $F(\alpha)$ и его параметры: $\Delta\alpha$ – ширина носителя и α^* – обобщенный показатель Херста

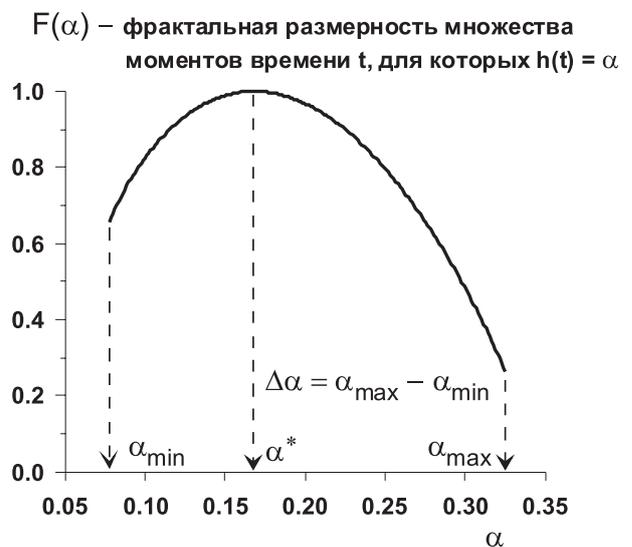


Рис. 7. Иллюстрации к понятию мультифрактального спектра сингулярности (см. в тексте)

Рассмотрим некоторое случайное колебание на интервале времени $[t - \delta/2, t + \delta/2]$, длиной δ , с центром во временной точке t и размах $\mu(t, \delta)$ случайного колебания на данном интервале, то есть разницу между максимальным и минимальным значениями (левая часть рис.7). Если устремить $\delta \rightarrow 0$, то $\mu(t, \delta)$ будет также стремиться к нулю, но здесь важна скорость убывания. Если скорость определяется законом

$$\delta^{h(t)}: \mu(t, \delta) \lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{h(t)},$$

или если существует предел

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

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 – постоянной (или экспонентой) Херста (Hurst), по имени британского гидролога, введшего этот параметр (но совершенно другим способом) при изучении режима разлива Нила [38]. 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. 7). Мысленно выделим множество $C(\alpha)$ таких моментов времени t , которые имеют одно и то же значение α экспоненты Гельдера-Липшица: $h(t) = \alpha$. Множества $C(\alpha)$ существуют (содержат какие-то элементы) не для всех значений α , то есть, существуют некоторые минимальное α_{\min} и максимальное α_{\max} и лишь для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ множества $C(\alpha)$ будут непустыми. Для каждого значения α в интервале между минимальным и максимальным значениями множество $C(\alpha)$ 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.

Основное качество визуального восприятия фрактальных множеств, или просто фракталов, – именно их причудливость, независимость от масштаба (любая малая часть фрактала при соответствующем увеличении неразличима от любой большой части), внешняя хаотичность. За этой хаотичностью 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, называется также 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 [38], что больше 1 (размерности прямой линии) и меньше 2 (размерности вмещающего множества – двумерной 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 – это обобщение фрактального множества на случай, когда фрактальных размерностей много, причем мультифракталы,

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. 7 представлен график оценки спектра сингулярности вертикальных сейсмических колебаний на одной из станций сети F-net на временном интервале длиной 1 сут (1440 мин).

Как видно из правой части рис. 7, спектр сингулярности может быть охарактеризован двумя параметрами: значением $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, которое называется шириной носителя спектра сингулярности, и значением аргумента α^* , доставляющим максимум функции $F(\alpha)$. Обычно $F(\alpha^*) = 1$, то есть значение α^* 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 α^* называется обобщенным показателем Херста. Если оценивать спектр сингулярности $F(\alpha)$ в скользящем временном окне, то эволюция его параметров $\Delta\alpha$ и α^* 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 α^* шума каждые сутки.

По своему определению мультифрактальный параметр $\Delta\alpha$ 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, 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 большом состоянии, то ритм его биений упорядоченный и ширина спектра сингулярности очень мала [42].

Почему же сейсмический шум, и не только он, а случайные флуктуации любых геофизических измерений, удовлетворительно описываются моделью мультифрактального случайного процесса? Дело в том, что при накоплении и сбросе тектонической энергии важную роль играют иерархическая и блоковая структуры коры. Каждый крупный блок (например, литосферная плита) разбит на некоторое число менее крупных, а те, в свою очередь, на еще более мелкие и так далее вплоть до мельчайших структурных единиц типа кристаллов и песчинок. При желании иерархичность можно наблюдать и рассматривая, например, систему прожилок 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 [31]. 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 [6].

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 значительной энергии перед своим распадом и, тем самым, быть 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, состоящая 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 и уменьшилось 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 острова 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 [46].

Прогноз Великого Японского землетрясения 11 марта 2011 г.

11 марта 2011 г. в Японии произошло катастрофическое землетрясение магнитудой $M = 9,0$, сопровождавшееся цунами («землетрясение Тохоку»). В результате стихийного бедствия погибли и пропали без вести в общей сложности около 20 тыс. человек, стране 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. В дальнейшем для обозначения этого события будем использовать аббревиатуру ВЯЗ (Великое Японское Землетрясение). Оно действительно «великое», поскольку по палеосейсмическим данным землетрясения с магнитудой 9 в Японии не было по крайней мере последние 1000 лет (устное сообщение автору от японских ученых).

Это землетрясение 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 $M = 8,5-9,0$, опубликованный в серии статей и выступлений на международных конференциях до сейсмической катастрофы [18–20, 25, 26, 46–48] (статья [20] опубликована после события, но была подана в журнал в апреле 2010 г.). 26 апреля 2010 г. была подана заявка в Российский экспертный совет по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности о приближении Японии к землетрясению с магнитудой 8,5–9 с оценкой момента события в июле 2010 г., текст которой можно посмотреть в Интернете по ссылке: http://old.ifz.ru/news/2011/Lyubushin_Prediction.pdf.

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 [21–23, 49].

Поскольку сеть станций F-net покрывает всю Японию (рис. 5), и от каждой станции ежедневно можно получить оценку 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.

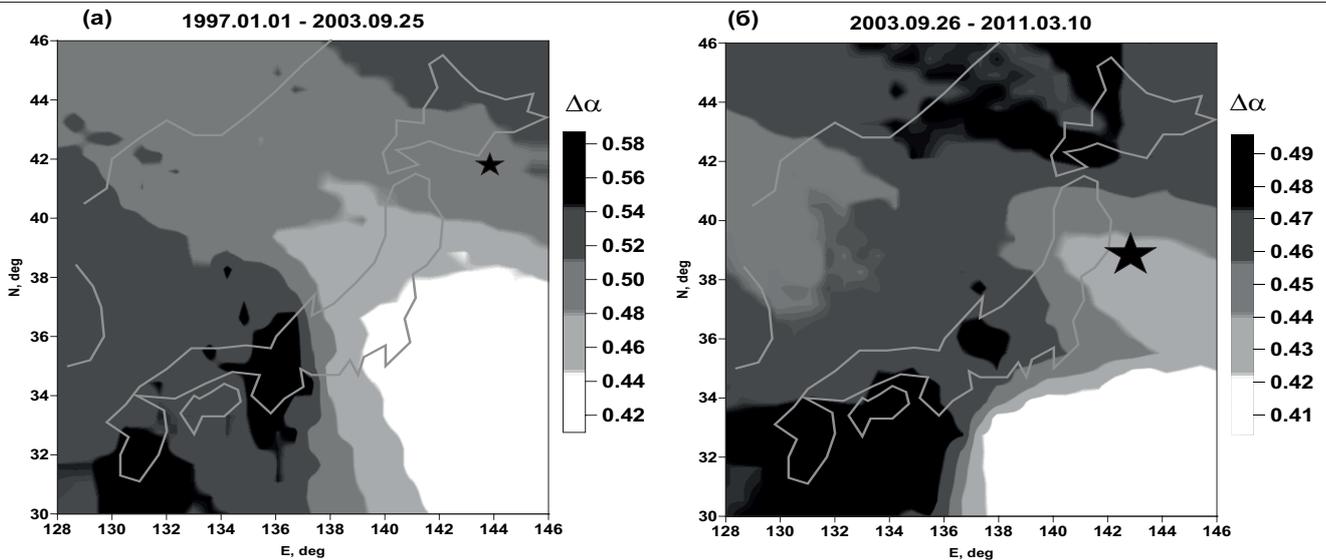


Рис. 8. (а) – усредненная карта значений $\Delta\alpha$ – ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности для промежутка времени от начала 1997 г. по 25 сентября 2003 г., когда произошло землетрясение с магнитудой 8,3 у берегов Хоккайдо (положение гипоцентра отмечено малой черной звездочкой); (б) – усредненная карта значений $\Delta\alpha$ для промежутка времени от 26 сентября 2003 г. по 10 марта 2011 г. – дня перед мегаземлетрясением Тохоку, положение гипоцентра которого отмечено большой черной звездочкой. Области пониженных значений $\Delta\alpha$ являются областями (пятнами) сейсмической опасности

Представленные в статье карты получены как совокупность средних значений $\Delta\alpha$ от пяти ближайших к каждому узлу станций в узлах равномерной сетки 30×30 , покрывающей прямоугольную область с координатами от 30 до 46° с. ш. и от 128 до 146° в. д. Если усреднить ежедневные карты по всем дням внутри большого промежутка времени, то получатся усредненные карты.

На рис. 8а представлена карта распределения $\Delta\alpha$ от 1997 г. – 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. В определенном смысле это событие можно считать форшоком (предваряющим толчком) последовавшего затем мегаземлетрясения.

После землетрясения 2003 г. произошло хотя и небольшое, но статистически значимое уменьшение среднего значения $\Delta\alpha$. Это хорошо видно при сравнении карт на рис. 8а и 8б. На рис. 8а область будущего мегаземлетрясения 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 [29]. Примечательно, что после землетрясения 2003 г. область пониженных значений $\Delta\alpha$ распалась на две части (рис. 8б), и только северная реализовалась как область мегаземлетрясения. А каково же будущее другой, южной части?

На рис. 9 показано распределение по пространству параметра $\Delta\alpha$, оцененное уже после ВЯЗ (точнее, начиная с 14 марта, когда сейсмическая сеть «пришла в себя» после мегаземлетрясения), за промежуток времени по конец сентября 2014 г. Для карты на рис. 9 важно отметить, что область, содержащая ги-

поцентр ВЯЗ, после сейсмической катастрофы характеризуется уже повышенными значениями $\Delta\alpha$, то есть там произошел распад консолидированного состояния и рост числа степеней свободы. Важная особенность карты на рис. 9 состоит в том, что область в нижнем правом углу рассматриваемого региона существовала до катастрофы (в промежуток времени 1997–2010 гг.) и остается после ВЯЗ местом относительно низких значений $\Delta\alpha$. Таким образом, следуя интерпретации пониженных значений ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ как индикатора сейсмической опасности, делаем вывод: рассматриваемая область была ранее и остается до сих пор опасной.

Можно предположить, что после события 25.09.2003 у берегов Хоккайдо вследствие распада некогда единой зоны пониженных значений $\Delta\alpha$ (рис. 8б) на две части (рис. 8б) сложилась ситуация, когда сильное событие могло произойти как в северной, так и в южной ее половине. Под влиянием различных случайных воздействий «задействована» была северная часть, а южная часть осталась нетронутой. Уместно выдвинуть гипотезу, что в результате ВЯЗ была сброшена лишь половина накопленных напряжений, а вторая половина ждет своего часа. Причем именно эта часть оставшегося сейсмического потенциала представляет собой большую опасность в силу своей близости к столице Японии.

Следует отметить, что этот регион – желоб Нанкай, где Филиппинская океаническая плита своей северной границей подходит к Японским островам, – уже давно рассматривается японскими учеными как место возможного возникновения опаснейших землетрясений [54, 56]. После землетрясения Тохоку, которое оказалось неожиданным для ученого мира, произошел пересмотр сейсмической опасности Японии, и сейчас высказываются гипотезы о возможно-

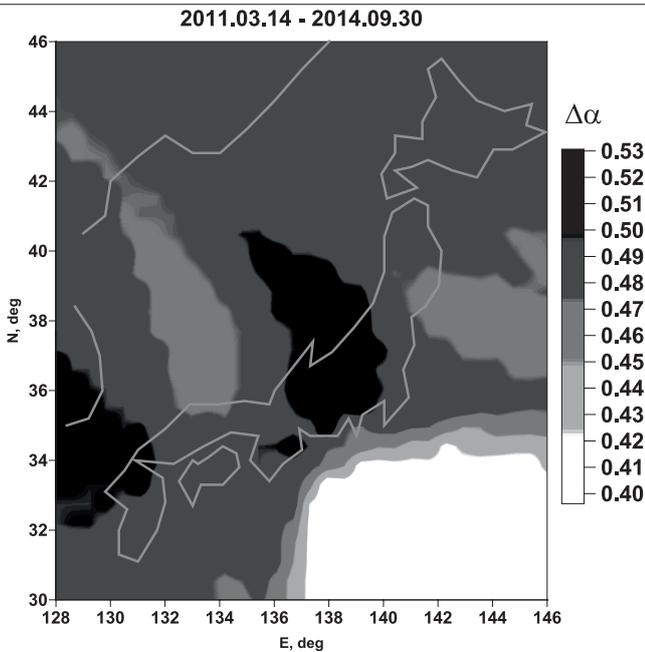


Рис. 9. Усредненная карта значений $\Delta\alpha$ – ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности для промежутка времени от 14 марта 2011 г. по 30 сентября 2014 г.

сти землетрясений с магнитудами до 10 в Японском океаническом желобе [43]. Таким образом, мультифрактальный анализ сейсмического шума дал независимую оценку сейсмической опасности.

Можно ли дать прогноз времени сейсмического события?

Последовательность карт распределения $\Delta\alpha$ по пространству, полученных в скользящем временном окне (возможно, с сильным перекрытием соседних окон), служит своего рода оценкой сейсмической опасности. Если сгенерировать достаточно длинную последовательность таких карт, то их можно «прокрутить» наподобие мультфильма и реконструировать, как возникают, живут и исчезают пятна сейсмической опасности. Если в каком-то месте возникло такое пятно, и оно стабильно и увеличивается по площади, то это можно рассматривать как сигнал: опасность растет. Размер области пониженных значений $\Delta\alpha$ дает оценку силы готовящейся катастрофы.

В настоящее время арсенал методов для анализа структуры случайных шумов геофизических полей существенно расширен: наряду с параметрами мультифрактального спектра сингулярности рассматриваются индекс линейной предсказуемости шума, минимальная нормализованная энтропия распределения квадратов ортогональных вейвлет-коэффициентов, индекс гладкости волновых форм шума и многие другие [23, 24, 49–52]. Фактически создан новый метод динамической оценки сейсмической опасности на основе математического анализа сейсмических колебаний земной поверхности.

Предложена качественная модель, объясняющая, почему области сейсмической опасности выделяются пониженными значениями ширины носителя спектра сингулярности волновых форм шума: при консолидации малых блоков земной коры в области подготовки землетрясения уменьшается интенсивность взаимных движений малых блоков земной

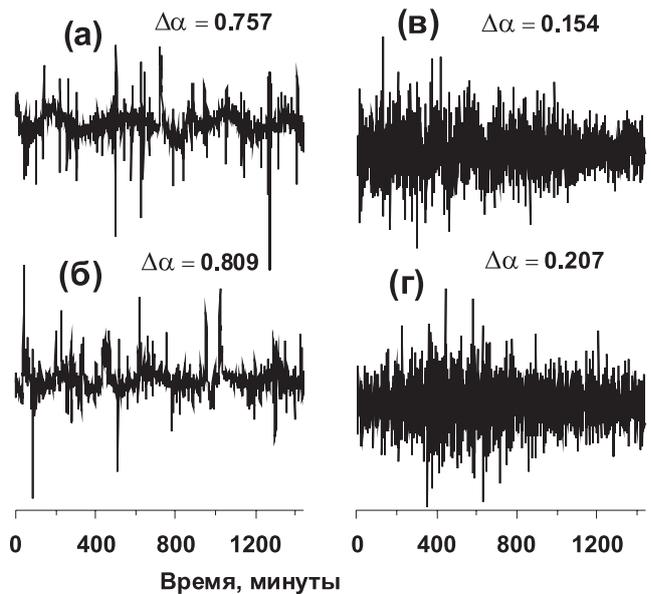


Рис. 10. Графики суточных волновых форм сейсмического шума с большими (а, б) и малыми (в, г) значениями ширины носителя спектра сингулярности

коры. Это приводит к уменьшению числа и амплитуды выбросов, то есть к упрощению структуры шума. В свою очередь этот эффект означает потерю мультифрактальности, увеличение энтропии, предсказуемости и гладкости шумовых волновых форм. Эта модель иллюстрируется графиками на рис. 10: волновые формы сейсмического шума на графиках 10а и 10б (левая пара графиков), характеризуемые большими значениями $\Delta\alpha$, содержат серии высокоамплитудных нерегулярных выбросов, которые интерпретируются как следствие взаимных движений малых блоков неконсолидированной земной коры, тогда как графики на рис. 10в и 10г (правая пара графиков) волновых форм шума с малыми значениями $\Delta\alpha$ значительно более «спокойны» и по своей реализации похожи на стационарный белый шум. Получается, что именно «спокойное» поведение сейсмического шума указывает на возможное сильное «беспокойство» в будущем – на землетрясение.

Но определение времени события – самый сложный вопрос. 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 горного туриста, а Первая мировая война началась от знаменитого выстрела в Сараево, но и то и другое практически невозможно спрогнозировать. Однако можно утверждать, что если критическое явление готово начаться, то оно с большой вероятностью дождется того или иного триггера. Для сейсмического события таким фактором могут быть электромагнитная буря, тайфун, волны от удаленного землетрясения, приливные деформации земной коры [37].

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 со-

бытия. Помимо параметра $\Delta\alpha$, как уж было сказано выше, интерес представляет также параметр α^* – обобщенный показатель Херста, или наиболее часто встречающийся показатель Гельдера-Липшица, который определяет максимум спектра сингулярности $F(\alpha)$ (см. рис. 7). В общем случае оба параметра, $\Delta\alpha$ и α^* , совершенно независимы. Но оказалось, что для сейсмического шума между ними есть статистическая связь (корреляция), зависящая от времени.

На рис. 11 представлен график изменения квадрата коэффициента корреляции между средними (по всей сети станций) параметрами α^* 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 г. Поскольку 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 землетрясение на Японских островах, магнитудой $M = 8,5–9,0$.

По данным после катастрофы можно заметить возникновение третьего заостренного минимума коэффициента корреляции при положении правого конца годового скользящего окна в начале 2012 г. Если исходить из аналогии в поведении коэффициента корреляции перед двумя предыдущими сильнейшими землетрясениями, то логично выдвинуть гипотезу о возникновении второго мегаземлетрясения в Японии с положением гипоцентра в желобе Нанкай в проме-

жутке времени от 2 до 3 лет после возникновения третьего заостренного минимума, то есть в 2014–2015 гг. Следует отметить, конечно, что прогноз времени будущего сильного землетрясения, как уже говорилось, является самым сложным вопросом оценки сейсмической опасности в силу триггерного механизма возникновения сейсмических событий, и способ оценки времени, изложенный выше, является весьма дискуссионным и нуждающимся в дальнейшей проверке.

Глобальный сейсмический шум и тренды сейсмической опасности

Выше мы рассматривали лишь одну региональную сеть – F-net в Японии, в силу ее технической развитости, наличия свободного доступа к данным и уникального положения в высоко сейсмическом регионе и достаточно длинной истории наблюдений (с начала 1997 г.). Существуют еще несколько достаточно густых региональных сетей, но они либо расположены в регионах со слабой или средней сейсмичностью, либо имеют короткую историю (то есть созданы сравнительно недавно), либо их датчики не обладают требуемым свойством широкополосности, либо, что очень важно, нет свободного доступа к данным через Интернет.

Как уже было отмечено выше, существует глобальная сеть сейсмических наблюдений, охватывающая весь земной шар, но для нее среднее расстояние между станциями слишком велико, чтобы использовать их данные для прогноза. Оказывается, тем не менее, что анализ глобального сейсмического шума позволяет установить интересные связи между его свойствами и последовательностью сильнейших землетрясений во всем мире [24, 27].

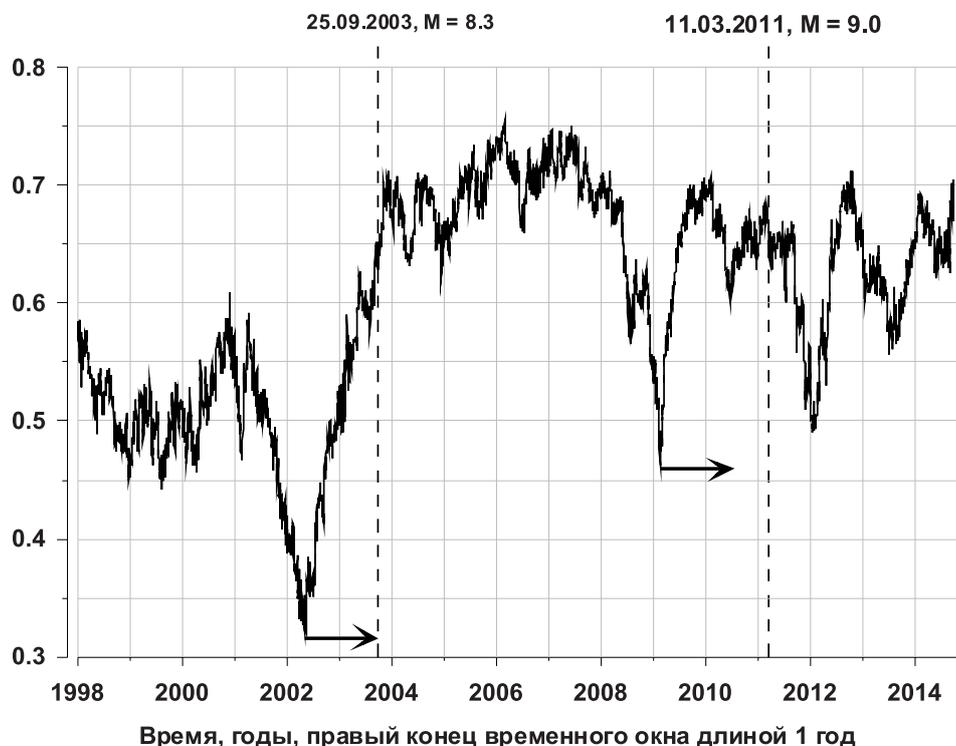


Рис. 11. Изменения квадрата коэффициента корреляции между средними по всем станциям сети ежедневными значениями величин α и $\Delta\alpha^*$ в скользящем временном окне 1 год в зависимости от положения правого конца временного окна. Горизонтальными стрелками выделены временные интервалы одинаковой длины 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 оценивался как начало опасного временного интервала ожидания катастрофы

Рассмотрим объединение трех глобальных сейсмических сетей (всего 229 станций):

Global Seismographic Network: <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 17 лет наблюдений, с 01 января 1997 г. по 31 декабря 2013 г. Далее сейсмические записи приводились к шагу по времени 1 мин путем вычисления средних значений в последовательных временных интервалах длиной 60 значений α .

На рис. 12 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. 12 с указанием числа станций в каждой группе. Имена групп станций состоят из 3 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 восточные долготы (вторая буква E) и их южную 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 групп была разбита на 2 части, северную и южную, граница по широте между которыми выбиралась из условия примерного равенства числа станций в каждой подгруппе.

Для каждой станции вычислялась ширина носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ в последовательных временных окнах (без перекрытия), состоящих из фиксированного числа 1440 соседних минутных отсчетов, что составляет одни сутки. Таким образом,

для каждой станции получался временной ряд значений $\Delta\alpha$ с шагом по времени 1 сутки. На рис. 13 представлены графики ежесуточных медиан, взятых внутри каждой из 8 групп станций, показанных на рис. 12, в каждом временном ряду по 6209 суточных значений (за 17 лет наблюдений) 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.

Нас будут интересовать эффекты когерентного поведения компонент 8-мерного временного ряда, представленного на рис. 13. Для этого рассмотрим скользящее временное окно длиной 365 суток (1 год) и будем его сдвигать слева направо со смещением 7 суток. В каждом окне будем вычислять частотно-зависимый множественный коэффициент когерентности между всеми 8 рядами, представленными на рис. 13. Эта множественная когерентность представляет собой обобщение квадрата модуля спектра когерентности между 2 временными рядами на случай, когда число анализируемых временных рядов превосходит 2 [8, 16]. Далее в каждом временном окне возьмем максимум по частотам от значений множественного коэффициента когерентности, в результате чего получим величину, зависящую только от времени (от временной метки скользящего временного окна) [27], график которой представлен на рис. 14. Как обычно для коэффициентов корреляции и когерентности, мера, представленная на рис. 14, может принимать значения от 0 до 1, и, чем ближе она к 1, тем сильнее совокупная связь между вариациями анализируемых временных рядов. На рис. 14 мы видим сильный положительный тренд такой связи, что говорит о том, что синхронизация изменения параметров сейсмического шума в различных частях земного шара постоянно нарастает. Заметим, что в работе [27] графики, подобные рис. 14, построены еще для 3 свойств глобального сейсмического шума, и они также демонстрируют положительный тренд роста меры когерентности.

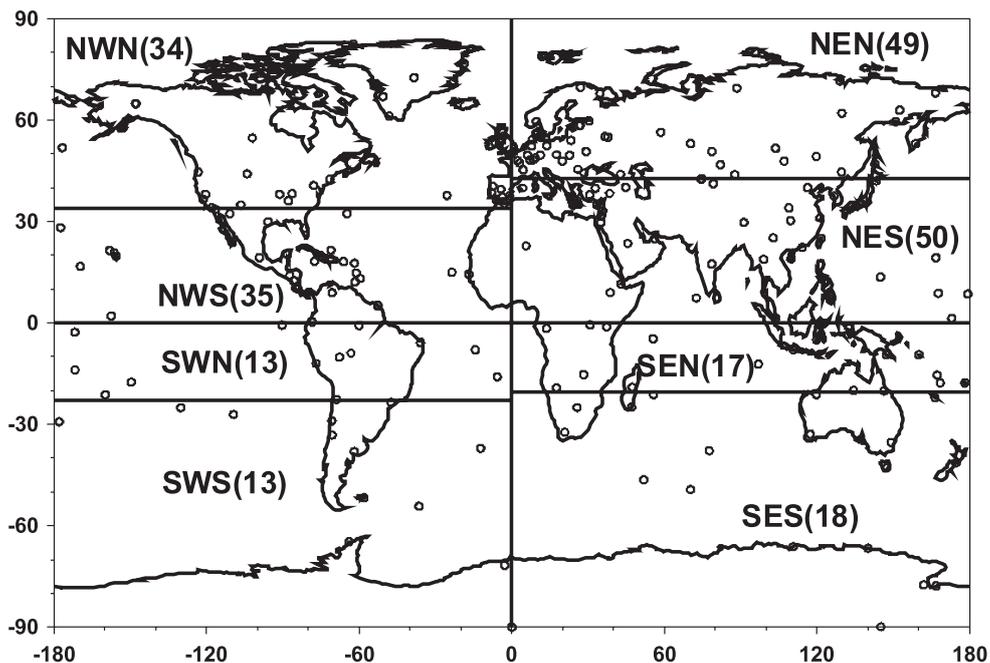


Рис. 12. Положения 229 широкополосных станций объединения трех глобальных сейсмических сетей и их разбиение на 8 групп. В скобках после имени группы указано число станций в группе

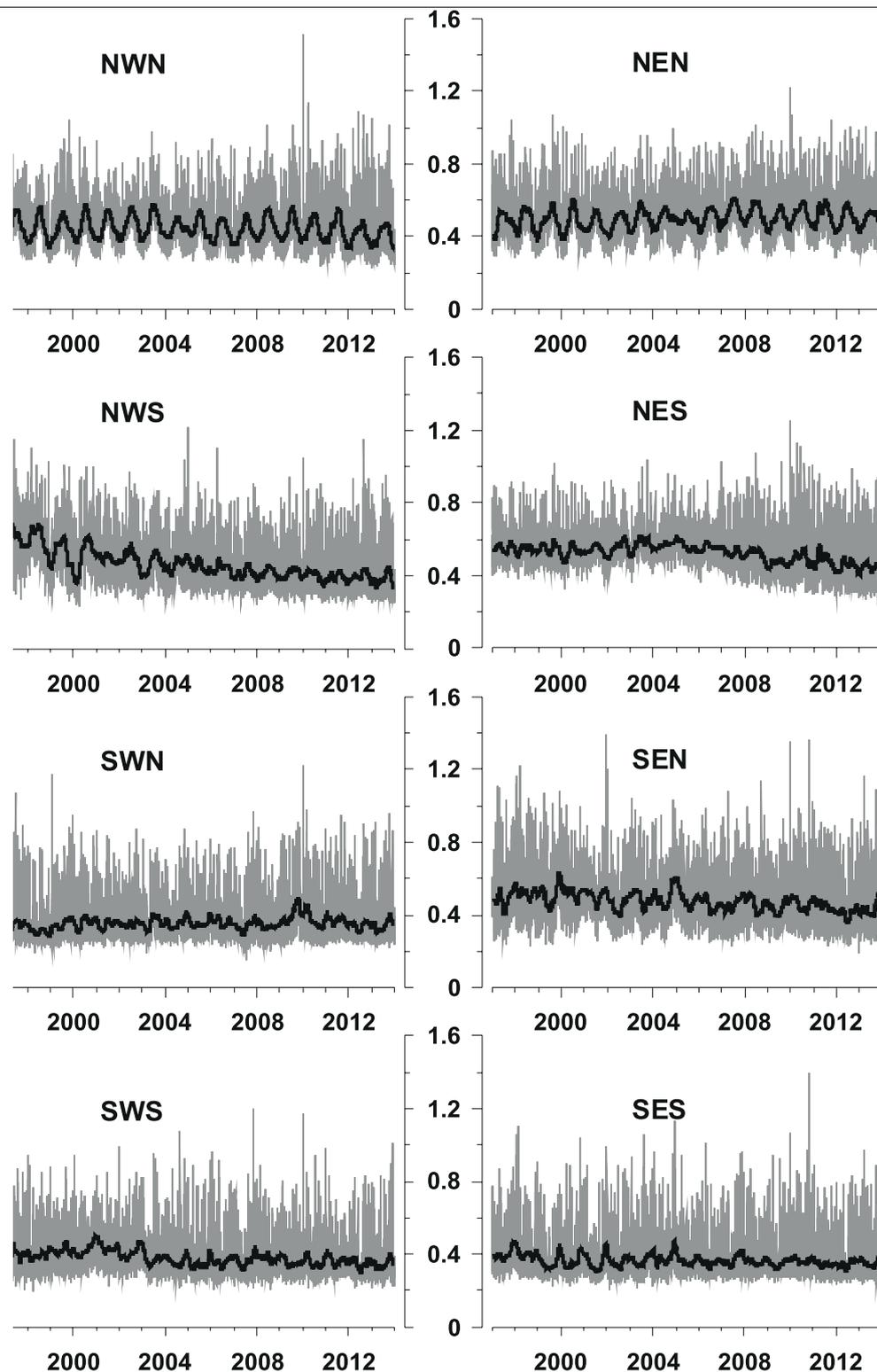


Рис. 13. Серые линии: графики ежесуточных медиан свойств $\Delta\alpha$, вычисленных для 8 групп станций (рис. 12). Толстые черные линии – средние значения в скользящем временном окне длиной 57 суток

Сравним полученный рост когерентности с сильнейшими землетрясениями во всем мире. Под «сильнейшими» мы будем понимать сейсмические события с магнитудой не менее 8,5. В табл. 1 приведена информация о 17 таких землетрясениях с начала XX в. Из этих 17 сейсмических событий 6 произошло за менее чем 10 лет, начиная с конца 2004 г. В промежуток 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 уровня когерентности 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 когерентности наблюдается за весь анализируемый период наблюдений, причем к концу 2013 г. она достигла максимума. Последнее может быть предвест-



Рис. 14. Изменение во времени максимума по частотам множественного коэффициента когерентности для 8-мерного временного ряда медиан ежесуточных значений ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности от 8 групп станций (рис. 13)

ником дальнейшего роста интенсивности сильнейших сейсмических событий, подобно тому, как это произошло в 1950–1965 гг.

Обсуждение

Опыт изучения случайных флуктуаций геофизических сигналов, накопленный к настоящему времени, позволяет предположить, что их анализ поможет создать принципиально новые методы оценки сейсмического риска и прогноза сильных землетрясений. Под случайными флуктуациями имеются в виду постоянно имеющие место колебания сравнительно небольшой амплитуды, не содержащие ни «событий», ни каких-либо ярко выраженных монохроматических компонент.

Следует сказать несколько слов еще про один источник «полезных» геофизических шумов – про спутниковые наблюдения за смещениями земной поверхности, про данные GPS и, в России, ГЛОНАС. Технология этих наблюдений пока еще не достигла той степени совершенства, которая характерна для сейсмических наблюдений, но она активно развивается. В частности, ВЯЗ явилось шоком для научной общественности в особенности потому, что Япония является уникальным местом с исключительно плотной системой геофизических наблюдений. Система непрерывно работающих стационарных датчиков GPS насчитывает более 1200 станций и густо по-

Сильнейшие землетрясения, $M \geq 8,5$, с начала XX века

Источник: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10_largest_world.php

Дата	Магнитуда	Широта	Долгота
1906.01.31	8,8	1	-81,5
1922.11.11	8,5	-28,55	-70,5
1923.02.03	8,5	54	161
1938.02.01	8,5	-5,05	131,62
1950.08.15	8,6	28,5	96,5
1952.11.04	9,0	52,76	160,06
1957.03.09	8,6	51,56	-175,39
1960.05.22	9,5	-38,29	-73,05
1963.10.13	8,5	44,9	149,6
1964.03.28	9,2	61,02	-147,65
1965.02.04	8,7	51,21	178,5
2004.12.26	9,1	3,3	95,78
2005.03.28	8,6	2,08	97,01
2007.09.12	8,5	-4,438	101,367
2010.02.27	8,8	-35,846	-72,719
2011.03.11	9,0	38,322	142,369
2012.04.11	8,6	2,311	93,063

крывает Японские острова. После сейсмической катастрофы Тохoku неоднократно высказывалась досада: «Почему такая густая сеть наблюдений оказалась бесполезной для прогноза?» С нашей точки зрения, причиной этому является анализ временных рядов систем мониторинга, неадекватный целям прогноза. Традиционное использование GPS данных заключается в том, что в них рассматриваются только так называемые «тренды» (что ориентировано для решений задач геодинамики и кинематики плит), а случайные флуктуации игнорируются и рассматриваются лишь как «шум», от которого следует избавляться. Но для прогноза надо анализировать не медленное движение плит, а их «дрожь».

В работе [53] показано, что анализ GPS шума по сети из 1203 станций на Японских островах за 40 дней до землетрясения позволил исключительно точно указать место очага надвигающейся сейсмической катастрофы. Оказывается, что в области будущей сейсмической катастрофы тектонические плиты дрожат неким особым образом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-05-00146, и Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованием государственного контракта № 14.577.21.0109).

Литература

1. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: в 2 книгах. – М. : Мир, 1984. – 350 с. и 285 с.
2. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. – М. : Наука, 1997. – 285 с.
3. Касахара К. Механика землетрясений. – М. : Мир, 1985. – 264 с.
4. Короновский Н., Наймарк А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2012. – № 6. – С. 3–10.
5. Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. – М. : ГЕОС, 2005. – 179 с. – (Вычислительная сейсмология; выпуск 36).
6. Любушин А.А. Модель сейсмического процесса в блоковой среде // Современные методы интерпретации сейсмологических данных. (Вычислительная сейсмология, выпуск 24). – М. : Наука, 1991. – 302 с. – С. 50–61.
7. Любушин А.А. Классификация состояний низкочастотных систем геофизического мониторинга // Физика Земли. – 1994. – № 7. – С. 135–141.
8. Любушин А.А. Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга // Физика Земли. – 1998. – № 1. – С. 59–66.
9. Любушин А.А. Агрегированный сигнал систем низкочастотного геофизического мониторинга // Физика Земли. – 1998. – № 3. – С. 69–74.
10. Любушин А.А. Периодичности и катастрофы во взаимодействии геофизических процессов // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 2. Циклическая динамика в природе и обществе / Ред.: А.Г. Гамбурцев, С.И. Александров. – М. : Научный мир, 1998. – С. 380–385.
11. Любушин А.А. Вейвлет-агрегированный сигнал и синхронные всплески в задачах геофизического мониторинга и прогноза землетрясений // Физика Земли. – 2000. – № 3. – С. 20–30.
12. Любушин А.А. Робастный вейвлет-агрегированный сигнал для задач геофизического мониторинга // Физика Земли. – 2002. – № 9. – С. 37–48.
13. Любушин А.А. Геофизический мониторинг: шумы, сигналы, предвестники // Проблемы геофизики XXI века. Сборник научных трудов в 2 книгах / Ред.: А.В. Николаев. – М. : Наука, 2003. – Кн. 2. – С. 70–94.
14. Любушин А.А. Всплески и сценарии синхронизации в геофизических наблюдениях // Очерки геофизических исследований. К 75-летию Объединенного Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М. : ОИФЗ РАН, 2003. – С. 130–134.
15. Любушин А.А., Соболев Г.А. Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. – 2006. – № 9. – С. 18–28.
16. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. – М. : Наука, 2007. – 228 с.
17. Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. – 2008. – № 4. – С. 17–34.
18. Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. – 2009. – № 5. – С. 15–28.
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. Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // Геофизические процессы и биосфера. – 2011. – Т. 10. – С. 9–35.
22. Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. – 2012. – № 8. – С. 23–33.
23. Любушин А.А. Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // Физика Земли. – 2013. – № 1. – С. 11–20.
24. Любушин А.А. Карты линейной синхронизации свойств глобального поля низкочастотных сейсмических шумов // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. – С. 41–53.
25. Любушин А.А. Прогноз сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 года // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 5. Человек и три окружающие его среды. – М. : Янус-К, 2013. – С. 188–192.
26. Любушин А.А. Прогноз землетрясений и глобальное поле низкочастотных микросейсм // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века / Ред. А.О. Глико. – М. : Янус-К, 2013. – С. 245–262.
27. Любушин А.А. Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997–2012 // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 18–27.
28. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М. : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
29. Моги К. Предсказание землетрясений. – М. : Мир, 1988. – 382 с.
30. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. – М. : Мир, 1990. – 344 с.
31. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247. – С. 829–832.
32. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М. : Наука, 2003. – 270 с.
33. Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Синхронизация микросейсмических

колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. – 2005. – № 8. – С. 3–27.

34. *Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // Физика Земли. – 2006. – № 9. – С. 5–17.

35. *Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 года на Суматре // Физика Земли. – 2007. – № 5. – С. 3–16.

36. *Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Асимметричные импульсы, периодичности и синхронизация низкочастотных микросейсм // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 2. – С. 135–152.

37. *Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. – М.: ИФЗ РАН, 2011. – 56 с.

38. *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

39. *Шустер Г.* Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 240 с.

40. *Bak P., Tang C.* Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // J. Geophys. Res. – 1989. – Vol. 94. – P. 15635–15637.

41. *Geller R.A., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F.* Earthquakes cannot be predicted // Science. – 1997. – Vol. 275. – P. 1616–1617.

42. *Ivanov P. Ch., Amaral L. A. N., Goldberger A. L., Havlin S., Rosenblum M. B., Struzik Z., Stanley H. E.* Multifractality in healthy heart-beat dynamics // Nature. – 1999. – Vol. 399. – P. 461–465.

43. *Kagan Y.Y., Jackson D.D.* Tohoku Earthquake: A Surprise? // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2013. – Vol. 103, № 2B. – P. 1181–1194.

44. *Kobayashi N., Nishida K.* Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances // Nature. – 1998. – Vol. 395. – P. 357–360.

45. *Lyubushin A.A.* Analysis of multidimensional geophysical monitoring time series for earthquake prediction // Annali di Geofisica. – 1999. – Vol. 42. – P. 927–937.

46. *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. – P. 92.

47. *Lyubushin A.A.* Synchronization of multifractal parameters of regional and global low-frequency microseisms // Geophys. Res. Abstr. – 2010. – Vol. 12. – EGU2010-696.

48. *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. – P. 124.

49. *Lyubushin A.* Prognostic properties of low-frequency seismic noise // Natural Science. – 2012. – Vol. 4. – P. 659–666.

50. *Lyubushin A.A.* Spots of seismic danger extracted by properties of low-frequency seismic noise // Geophys. Res. Abstracts. – 2013. – Vol. 15. – EGU2013-1614.

51. *Lyubushin A.* How soon would the next mega-earthquake occur in Japan? // Natural Science. – 2013. – Vol. 5. – P. 1–7.

52. *Lyubushin A.A.* Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise // Natural Hazards. – 2014. – Vol. 70. – P. 471–483.

53. *Lyubushin A., Yakovlev P.* Properties of GPS noise at Japan islands before and after Tohoku mega-earthquake // Springer Plus. – 2014. – Vol. 3. – P. 364. <http://www.springerplus.com/content/3/1/364>

54. *Mogi K.* Two grave issues concerning the expected Tokai Earthquake // Earth, Planets and Space. – 2004. – Vol. 56. – P. 51–66.

55. *Rhie J., Romanowicz B.* Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // Nature. – 2004. – Vol. 431. – P. 552–554.

56. *Rikitake T.* Probability of a great earthquake to recur in the Tokai district, Japan: reevaluation based on newly-developed paleoseismology, plate tectonics, tsunami study, micro-seismicity and geodetic measurements // Earth, Planets and Space. – 1999. – Vol. 51. – P. 147–157.

57. *Tanimoto T.* The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth // Geophys. J. Int. – 2005. – Vol. 160. – P. 276–288.

