

О свойствах статистических функционалов от критической частоты ионосферы в сейсмоактивных регионах

Л. П. Коган¹, В. Б. Штенберг¹, И. Т. Бубукин²

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская 65. E-mail: L_kog@list.ru,

²НИРФИ при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского, Российская Федерация, 603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская 25/12а

Рассматривается задача о выявлении регулярных краткосрочных предвестников приближающегося землетрясения высокой магнитуды. Для этого вводится статистический функционал от критической частоты ионосферы, измеряемой в сейсмоактивных регионах. С целью апробации предлагаемой методики проводится расчет значений данного функционала по статистике критической частоты ионосферного слоя F2 для Камчатки и для Италии. Вводится понятие сейсмического квантования и определяются критерии, позволяющие сформулировать вывод о высокой вероятности сильного тектонического события в ближайшее время.

The problem of revealing a regular short-term precursors of an approaching earthquake of high magnitude is considered. For this, a statistical functional is introduced from the critical frequency of the ionosphere, measured in seismically active regions. In order to approbate the proposed methodology, the values of this functional are calculated for the statistics of the critical frequency of the ionospheric layer F2 for Kamchatka and for Italy. The concept of seismic quantization is introduced and criteria are determined that allow one to formulate a conclusion about the high probability of a strong tectonic event in the near future.

Введение и математический аппарат, применяемый при решении задачи

В данной работе рассматривается задача о краткосрочном прогнозировании сильных тектонических событий в сейсмоактивных регионах. Предлагаемый далее подход является развитием методики, ранее предложенной в работе [1].

Физические поля, измеряемые в районах с высокой тектонической активностью, как правило, могут быть записаны в виде $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$. Здесь случайный процесс $x_1(t)$ — фоновый шум, включая влияние возмущений, связанных с малыми землетрясениями. Тогда как $x_2(t)$ — флуктуации, связанные с завершающей фазой подготовки события высокой магнитуды. Как и в [1], полагаем случайные функции $x_1(t)$ и $x_2(t)$ статистически независимыми. Это связано с тем, что явления разлома литосферных плит, порождающие $x_2(t)$, с достаточной долей уверенности можем считать статистически независимыми с любыми другими «обычными» процессами, от влияния Солнца, магнитных бурь, метеорологических воздействий и так далее (вплоть до сбоев измерительной аппаратуры), в совокупности формирующего слагаемое $x_1(t)$. Кроме того, существенным является факт постоянного «присутствия» сейсмических процессов в тектонически опасных зонах. Таким образом, любому отрезку реализации случайной величины (СВ) $x = x_1 + x_2$ соответствует плотность вероятности

$$\rho(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_1(w-w')\rho_2(w')dw', \quad \rho_{1,2}(w) = \sum_{m=1}^N P_{m,1,2}\delta(w-m), \quad \rho(w) = \sum_{m=1}^N P_m\delta(w-m). \quad (1)$$

Здесь $\rho_{1,2}(w)$ — плотности вероятности для случайных величин $x_{1,2}$, $\delta(w)$ — дельта-функция Дирака, $P_{m,1,2}$ и P_m — вероятности попадания значений соответственно $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $x(t)$ (в реальности могут быть измерены только значения $x(t)$) в интервалы вида

$$x_{min} + mh \leq x \leq x_{min} + (m+1)h, \quad 1 \leq m \leq N. \quad (2)$$

Величина h в (2) задает интервал дискретизации при вычислении $\rho(w)$; x_{min} — наименьшее измеренное значение СВ x , свое для каждого отдельного отрезка реализации. На рис. 1 схематически показаны плотности вероятности $\rho(w)$ и $\rho_{1,2}(w)$. Для наглядности они изображены с помощью сплошных кривых, тогда как согласно (1) им должен соответствовать ансамбль дельта-функций. На рис. 1а широкая кривая соответствует $\rho_1(w)$, а узкая высокая кривая — $\rho_2(w)$. Несложно понять, что если процесс $x_2(t)$ существует и эффективная ширина распределения $\rho_2(w)$ значительно превосходит горизонтальный масштаб малых шероховатостей на графике $\rho_1(w)$, который равен значению h , то при интегрировании (1) они сглаживаются (усредняются). Следовательно, в этом случае получаем показанный на рис. 1б «гладкий» график $\rho(w)$. (Отметим, что при $h \rightarrow 0$ график зависимости $\rho_1(w)$ перешел бы в плавную кривую с бесконечно большим числом бесконечно малых шероховатостей, полностью исчезающих при любом усреднении, см. рис. 1а.)

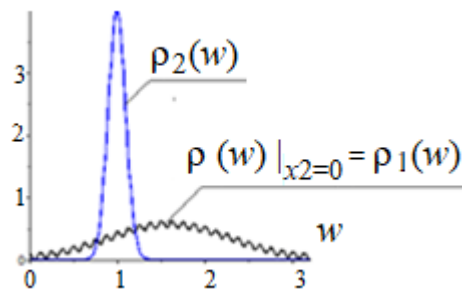


Рис. 1а.

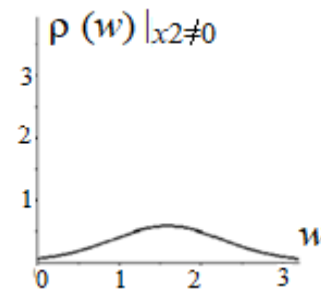


Рис. 1б.

Далее, в развитие методики [1], перейдем к рассмотрению СВ $X = \sin x$. Это связано с тем, что плотность вероятности $\rho_{\sin x}(w)$ является пропорциональной множителю

$(1-w^2)^{-1/2}$, который стремится к бесконечности при $|w| \rightarrow 1$. Это приводит к значительно большему различию размеров амплитуд шероховатостей графика функции $\rho_{\sin x}(w)$ (в области $|w| \approx 1$) при отсутствии, и, наоборот, при существовании процесса $x_2(t)$ (см. рис. 2а и соответственно 2б; здесь с целью уменьшения ширины изображения показана только область $0 \leq w \leq 1$) по сравнению с зависимостями $\rho(w)$ на рис. 1а и 1б. (Очевидно, что вместо синуса может быть применена какая-либо другая функция, обладающая таким свойством преобразования плотности вероятности.)

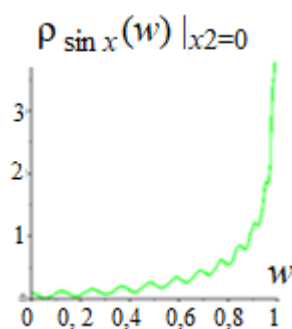


Рис. 2а.

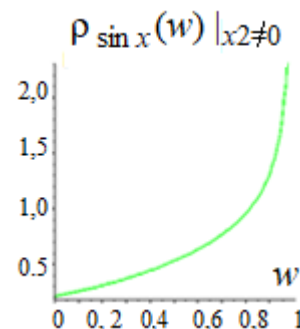


Рис. 2б.

При дальнейших вычислениях рассматриваются значения статистического функционала

$$L(n) = \frac{100}{M} \sum_{l=n-M}^n \left| \sum_{m=1}^N \exp(ipm) P_{l,m}^{\%} \right|, \quad (3)$$

отвечающего значениям $\sin x$, т. е. синуса от значений исходного измеряемого процесса $x = x(t)$. Здесь M — число отрезков реализации, предшествующих данному моменту

времени, а множитель 100 введен для получения удобного для анализа диапазона значений $L(n)$. Величина $p = \pi$, см. [1]; для отрезка реализации номер l полагаем вероятности $P_{l,m}^{\%} = P_m$ применительно к значениям СВ $\sin x$ вместо СВ x , см. (1) и (2). Функционал (3) сводится к усреднению модуля характеристической функции для синуса от измеряемой величины по M отрезкам реализации.

Как следует из проведенных выше вычислений, относящихся к рис. 1 и 2, принципиальной особенностью функционала (3) является его обратно пропорциональная зависимость от эффективной ширины распределения $\rho_2(w)$ (см. также [1]). Эта ширина, как правило, значительно увеличивается перед сильными землетрясениями.

Проведение вычислений

В качестве случайной величины $x(t)$ далее рассматриваются значения критической частоты слоя F2 ионосферы (измеряемые в мегагерцах). Зависимость $x_1(t)$, формируемую под действием факторов, не связанных с подготовкой сильных землетрясений, в данном случае следует рассматривать как квазислучайный процесс, среднее значение которого определяется почти детерминированным суточным ходом. Расчеты для рис. 3 проведены по данным измерений в 1994–2004 гг. ионозонда Петропавловск (PK553), расположенного рядом с г. Петропавловск-Камчатский в сейсмически активном регионе, а для рис. 4 — по измерениям в период 2004–2011 г. ионозонда Rome (RO 041), находящегося в Италии, вблизи Рима.

Каждый отрезок реализации, по которому строится статистика в (1) и (2), включает $N_1=96$ интервалов по 15 минут каждый, что в совокупности составляет 24 часа. (Таким образом, изменение n на единицу означает смещение вперед на одни сутки 100-суточного интервала, по которому всякий раз вычисляется $L(n)$.) Любому такому 15-минутному отрезку времени сопоставляется либо одно измеренное значение критической частоты, либо сбой аппаратуры. При наличии последних число измерений в наборе данных, по которому строится распределение (1) для соответствующего отрезка реализации, становится меньше N_1 на количество указанных сбоев. Далее в (3) принимаем

$M=100$, а в (2) полагаем $h=0,01$; поскольку $|\sin x| \leq 1$, то в (1) и (2) значение $N=200$.

Зависимость $L(n)$, построенная по камчатским данным, приведена на рис. 3 (красная кривая). На оси абсцисс одна единица соответствует одним суткам непрерывной работы ионозонда (с пропуском интервалов, когда он не функционировал). Рис. 3а отвечает всему указанному периоду наблюдений с 1994 по 2004 г. Вертикальные прямые на рис. 3 соответствуют моментам тектонических событий с магнитудой $M \geq 5,5$, происшедших в 1994–2004 гг. в области радиусом 1000 км от ионозонда. Моменты времени их возникновения здесь и далее учитываются с точностью до продолжительности половины 15-минутного интервала, в течение которого данное землетрясение имело место. Подобная точность позволяет строить более подробные графики: например, рис. 3б и 3в. (Здесь и далее в статье рассматриваются только основные землетрясения, без учета форшоков и афтершоков; такие события определяются как географически близкие, с разницей географических координат гипоцентров не более 100 км, землетрясения, взаимно отстоящие по времени менее чем на 10 суток.)

Группы таких прямых, выделенные одним стилем и цветом (например, пять синих точечных пунктирных линий в интервале от $n=210$ до $n=530$), отвечают сериям землетрясений, для которых различие значений $L(n)$ при переходе от одного соответствующего сейсмического события к другому не превышает 1 % от минимальной из двух соответствующих этим двум землетрясениям величин $L(n)$. Исключение составляют сплошные серые линии: отвечающие им землетрясения не входят в состав какой-либо серии (возможно, это связано с исключением из рассмотрения землетрясений, происшедших во время перерывов в работе ионозонда).

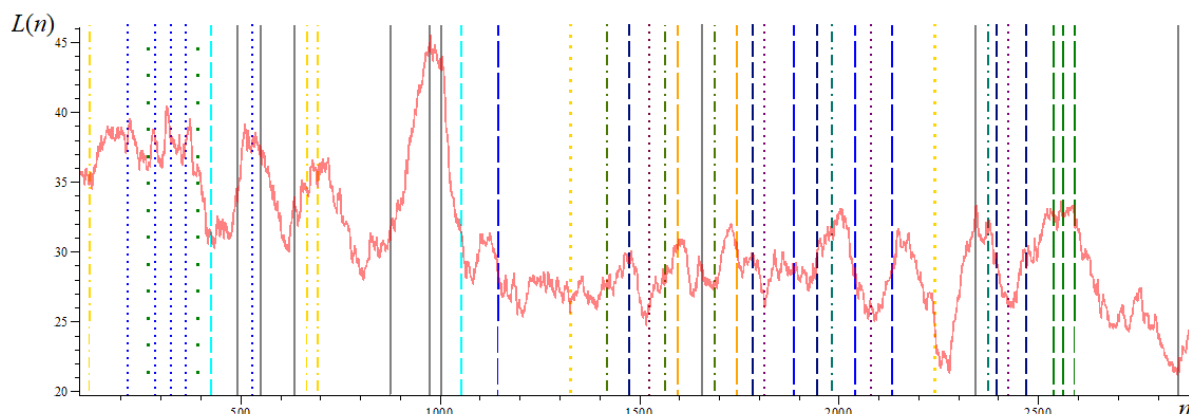


Рис. 3а.

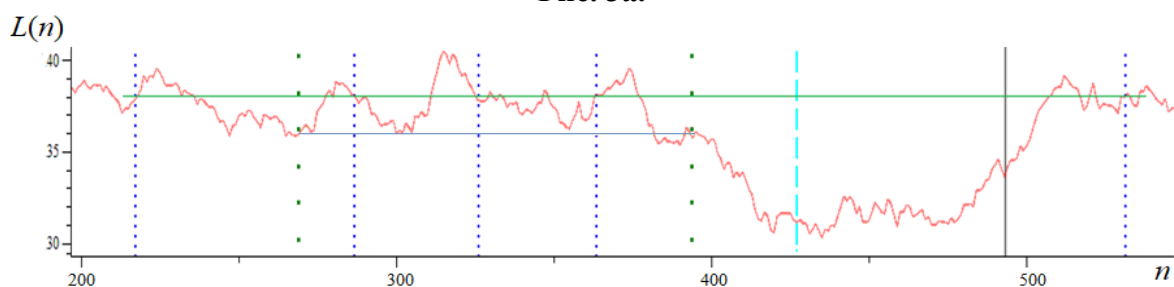


Рис. 3б.

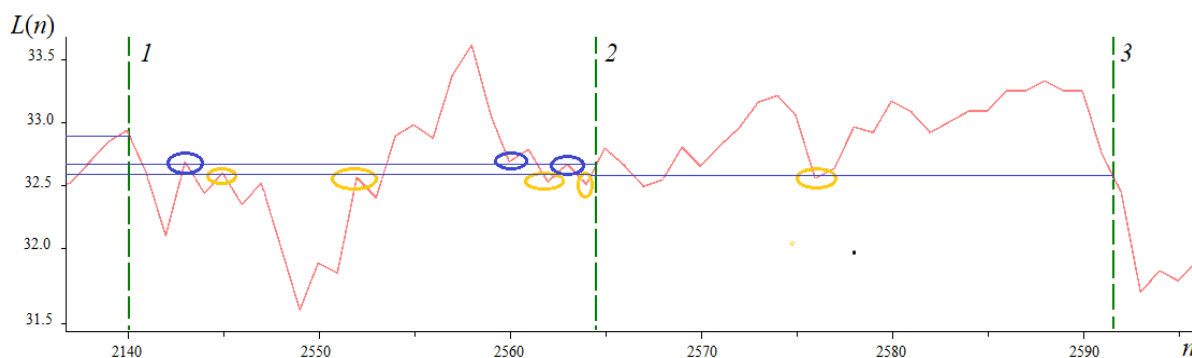


Рис. 3в.

На рис. 3б в виде примера более подробно показан участок, отвечающий указанной выше «пунктирной синей» серии из пяти землетрясений. Здесь зеленая прямая проведена на плоскости $(L(n), n)$ строго горизонтально через координаты точки, отвечающей первому землетрясению данной серии. Как видно из рисунка, эта прямая с большой точностью (отличия $L(n)$ в моменты событий для всей серии значительно меньше 1 %) проходит и через координаты точек, соответствующих остальным четырем землетрясениям данной серии. Кроме того, нижняя синяя прямая отвечает другой серии из двух тектонических событий, см. рис. 3а, и проведена строго горизонтально через точку $(L(n), n)$ первого из них. Различие значений $L(n)$ здесь также существенно меньше 1 %.

На рис. 3в подробно изображена область рис. 1, отвечающая последней из приведенных на рис. 3а серий землетрясений (моментам их возникновения соответствуют три штриховые зеленые прямые, а соответствующие уровни $L(n)$ на рис. 3в отмечены синими горизонтальными линиями с началом в точках графика, отвечающих событиям). Здесь для землетрясений 2 и 3, для которых $n=2564$ и $n=2592$, отмечены предшествующие им критические уровни (критические значения функционала $L(n)$). То есть те экстремумы $L(n)$, которые отличаются от значения L в момент события (в данном слу-

чае $L(2564) = 32,7$ и $L(2592)=32,6$) не более чем на 0,2 %. На рис. 3в эти экстремумы выделены утолщенными эллипсами (синими для землетрясения 2 и оранжевыми для события 3). Такие критические уровни, указывающие на значение L в момент предстоящего события данной серии и поэтому являющиеся предвестниками, предшествуют почти всем землетрясениям (см. также рис. 3б). Будем называть их критическими уровнями первого рода.

Заметим, что значения оператора (3) для серий землетрясений в моменты событий практически совпадают с величинами предшествующих критических уровней, и это же верно для отдельных землетрясений, не входящих в состав какой-либо серии. Поэтому далее для таких значений $L(n)$ также будем применять термин «критические значения (уровни) первого рода» (уточняя при необходимости, идет ли речь о значении функционала (3) в момент события либо в предшествующий ему отрезок времени.)

Рис. 4, как указано выше, соответствует значениям функционала (3) (бордовая кривая), рассчитанным по данным измерений критической частоты ионосферы, проведенных в период 2004–2011 г. итальянским ионозондом Rome (RO 041). Смысл осей координат здесь тот же, что и на рис. 3. В данном случае целью исследования является выявление краткосрочных предвестников катастрофического землетрясения, произошедшего 06.04.2009 г. в г. Аквиле.

На рис. 4а бордовая кривая отвечает собственно значениям $L(n)$ для всего указанного периода измерений, а система вертикальных линий обозначает моменты землетрясений. Здесь отмечены землетрясения в Италии в период с нуля часов 01.01.2008 г. по 1 час 32 минуты 06.04.2009 г. (время UTC), а также еще одно относительно сильное землетрясение 03.11.2010 г. (40,030 с. ш., 13,257 в. д.).

Три сплошные вертикальные линии (желтая, красная и зеленая) соответствуют произошедшим событиям с магнитудой более 5 баллов, а вертикальные прямые, обозначенные штриховым и точечным пунктиром, отвечают имевшим место слабым землетрясениям с магнитудой ниже 5. Красная вертикальная прямая отвечает моменту указанного землетрясения 06.04.2009 г. Красный и черный штриховые, а также зеленый разреженный точечный пунктиры соответствуют сериям (в смысле рис. 3) из двух событий. Для трех землетрясений, отмеченных частым точечным пунктиром, в период 2008–2009 гг. нет «серийных» к ним тектонических событий. Нижней горизонтальной бирюзовой прямой отмечено значение функционала (3) для события 06.04.2009 г., а верхней горизонтальной фиолетовой прямой — для землетрясения 03.11.2010 г. (ему соответствует последняя вертикальная зеленая прямая). Утолщенными эллипсами выделены области, в которых происходит предшествующее данному землетрясению достижение $L(n)$ «своего» критического уровня для события высокой магнитуды 06.04.2009 г. (оранжевые эллипсы) и для относительно сильного землетрясения 03.11.2010 г. (синие эллипсы).

На рис. 4б более подробно приведена часть рис. 4а, отвечающая периоду времени, более приближенному к 06.04.2009 г., а на рис. 4в показана левая половина рис. 4б. Горизонтальной бирюзовой линией отмечено значение $L_A = 11,17$ рассматриваемого функционала $L(n)$, которое имело место в момент указанной катастрофы в Аквиле. Видно, что с начала 2008 г. и вплоть до момента этого землетрясения функционал $L(n)$ три раза достаточно длительное время, порядка одной-двух недель, принимал значения, близкие к значению L_A . Эти области на рис. 4б выделены утолщенными оранжевыми эллипсами.

Область внутри левого эллипса соответствует январю 2008 г. Здесь среднее значение $L(n)$ на интервале между точками 1 и 2 (то есть в зоне быстрых осцилляций длительностью 15 суток с квазисимметричными по амплитуде отклонениями от среднего значения, рис. 4в) составляет $\langle L_{12} \rangle = 11,19$. Практически этой же величине равно и

среднее $\langle L_{34} \rangle = 11.18$ по интервалу между точками 3 и 4 внутри среднего эллипса, отвечающей маю 2008 г. (здесь область осцилляций занимает около 6 суток, рис. 4в). Таким образом, разность между L_A и указанными средними значениями не превосходит 0,2 % от величины L_A . Поэтому имеет смысл говорить о существовании среднего критического уровня, то есть такого значения, колебание значений функционала $L(n)$ вокруг которого хотя бы в течение времени порядка одной-двух недель (рис. 4в) можно рассматривать как предвестник предстоящего сильного землетрясения, которое произойдет в дальнейшем при значении $L(n)$, почти совпадающем с указанным средним критическим уровнем. Принципиально важно, что в рассматриваемом случае средний критический уровень повторяется дважды, в зонах левого и среднего эллипса на рис. 4б. Кроме того, как видно из рис. 4б и 4в, оба случая подобных колебаний сопровождаются малыми землетрясениями. Такие средние критические уровни будем называть критическими уровнями второго рода.

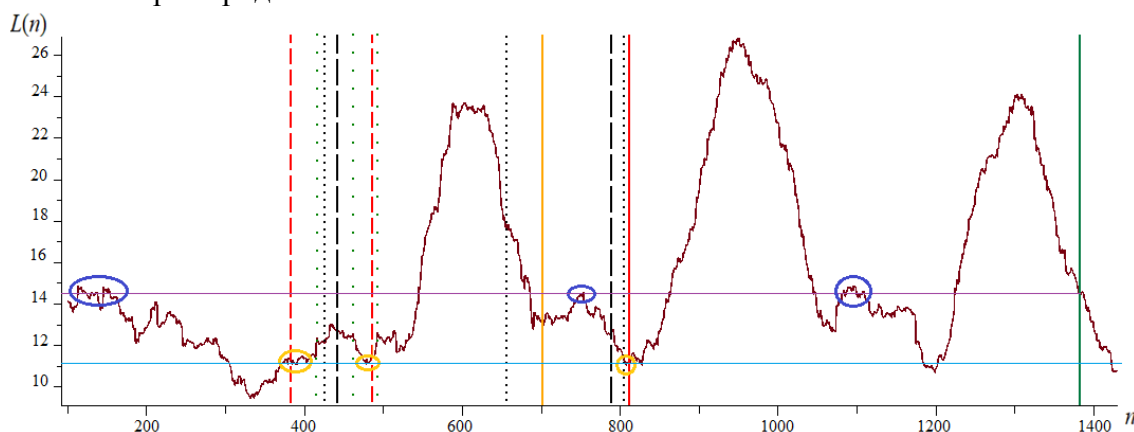


Рис. 4а.

Область, выделенная правым эллипсом на рис. 4б, то есть отвечающая интервалу времени непосредственно перед самым землетрясением 6 апреля 2009 г., более подробно рассмотрена на рис. 4г. В данном случае вертикальный бирюзовый пунктир указывает на точки на оси абсцисс, соответствующие обсуждаемым элементам графика, а не является обозначением времени землетрясений. Горизонтальная сплошная бирюзовая прямая указывает на значение функционала $L = L_A$ в момент рассматриваемого тектонического события.

Из анализа рис. 4г следует, что за четверо суток до события, при $n = 808$ (при отсчете времени в сутках работы ионозонда) функционал (3) принял значение, экстремально малое за период с конца января 2008 г. Таким образом, в этот момент геофизическая система в районе Апеннинского полуострова переходит в эксклюзивное состояние. После этого, за трое суток до события, при $n = 809$, $L(n)$ достигает очевидного критического уровня первого рода. Затем, за одни сутки до события, при $n = 811$, функционал (3) принял значение, практически равное величине $L = L_A$ собственно в момент землетрясения. Далее происходит рассматриваемое землетрясение высокой магнитуды. Значение L_A , как отмечено выше, оказалось менее чем на 0,2 % отличающимся от достигнутых также годом ранее критических уровней второго рода $\langle L_{12} \rangle$ и $\langle L_{34} \rangle$. Следовательно, каждый из этих факторов и их сочетание, сопровождающее данное катастрофическое событие, могут рассматриваться как вероятные предвестники надвигающегося сильного землетрясения. Физический смысл критического уровня второго рода будет рассмотрен ниже.

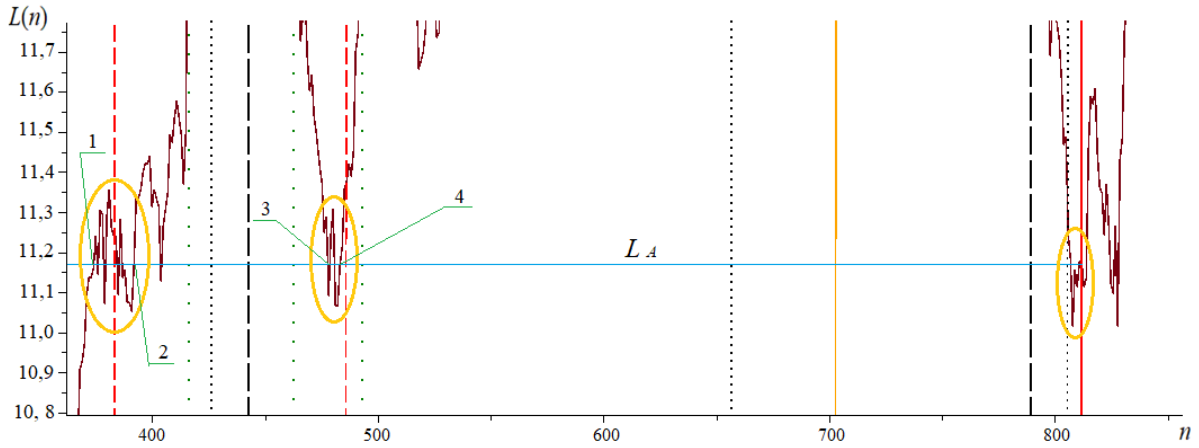


Рис. 4б.

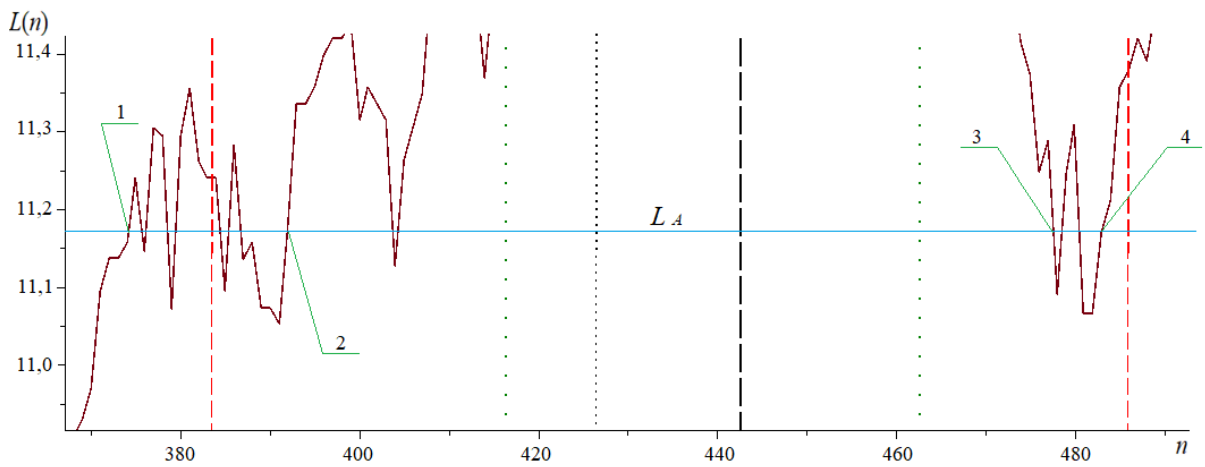


Рис. 4в.

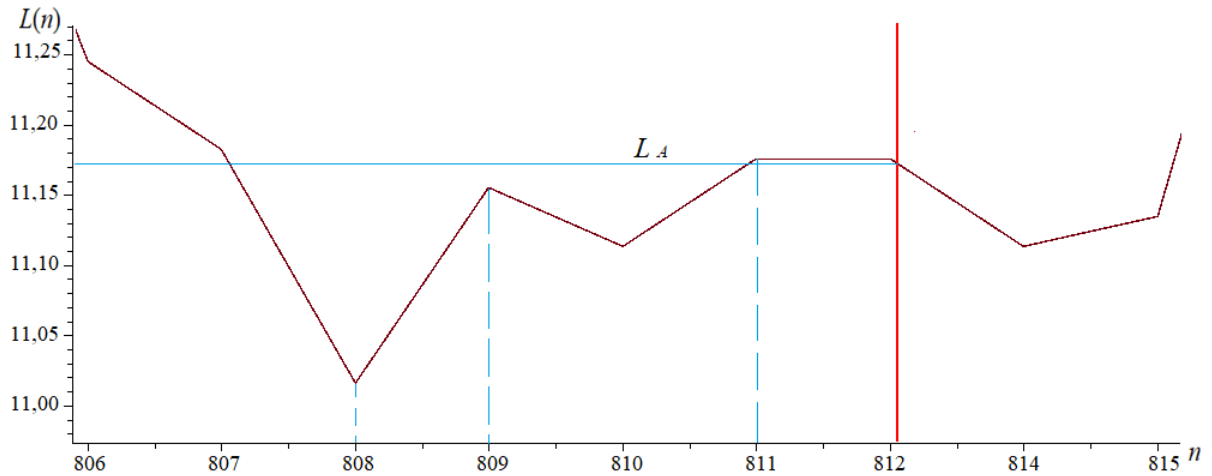


Рис. 4г.

Укажем также, что, как видно из рис. 4а, после 6 апреля 2009 г. бирюзовая горизонтальная линия далее проходит вблизи минимумов функционала $L(n)$, хотя и на удалении, большем того, что соответствовало бы критическому уровню. Это свидетельствует об устойчивости свойств геофизической системы. Для относительно сильного землетрясения 03.11.2010 г. с магнитудой $\mathcal{M}=5,15$ (правая вертикальная зеленая прямая), как следует из данного рисунка, тоже существует свой критический уровень (первого ро-

да), через который проходит отвечающая данному событию фиолетовая горизонтальная прямая.

Отметим также, что выявление землетрясений, которым предшествуют почти одинаковые критические уровни первого и второго рода, а также серий землетрясений, для которых значения $L(n)$ почти совпадают между собой и с величинами данных критических уровней, позволяет сделать вывод о феномене сейсмического квантования тектонических процессов.

Возможное феноменологическое объяснение полученных результатов

Как показали результаты численного счета, применение функционала (3) приводит к выявлению ряда краткосрочных предвестников тектонических событий. Сюда относятся повторение значений функционала $L(n)$ для серий сильных землетрясений и существование критических уровней первого и второго рода. В совокупности эти явления могут быть интерпретированы как проявления эффектов сейсмического квантования.

Для камчатского региона было получено, что для каждой серии землетрясений в итоге удастся определить несколько, от двух до семи, временных интервалов порядка одних суток, в течение одного из которых с вероятностью, близкой к единице, произойдет сильное землетрясение. Этот же результат может быть подтвержден при помощи рассмотрения критических уровней $L(n)$, после нескольких приближений к которым происходит землетрясение высокой магнитуды.

С целью формулирования гипотезы, объясняющей такие результаты, отметим, что, как было показано выше, с увеличением ширины распределения $\rho_2(w)$ случайного процесса $x_2(t)$, связанного с влиянием подготовки землетрясения, с большой вероятностью должны уменьшаться значения модуля характеристической функции, построенной по статистике случайной величины $\sin[x(t)] = \sin[x_1(t) + x_2(t)]$ для соответствующего отрезка реализации. В первом приближении можем полагать, что такое увеличение ширины плотности вероятности $\rho_2(w)$, вызывающее убывание функционала (3), также должно возрастать по мере усиления сдавливания литосферных плит.

При достижении порога прочности гранитных и базальтовых слоев, формирующих такие плиты на участках соприкосновения, в них начинается процесс трещинообразования и разрушения. Это приводит к уменьшению давления, что отражается в сокращении ширины распределения $\rho_2(w)$ и, следовательно, в возрастании значений $L(n)$. Указанное спадание давления позволяет системе выдержать очередной цикл сдавливания, в ходе каждого из которых тектоническое давление (для рассмотренных регионов Камчатки и Италии) увеличивается и уменьшается с эффективным интервалом между однотипными экстремумами порядка 200 суток, см. рис 3 и 4. Затем процесс многократно повторяется, и в итоге происходит полное разрушение пород вдоль линии формирования разлома, сопровождаемое собственно землетрясением.

Представляется логичным предположение, что всякий раз для одной и той же локальной тектонической зоны такое разрушение происходит при практически одном и том же уровне сдавливания, отвечающем порогу разрушения пород литосферных блоков в месте наиболее сильного сжатия. Достижению данного уровня соответствуют почти одинаковая ширина распределения $\rho_2(w)$ и, следовательно, очень близкие значения функционала (3). Именно такой механизм, вероятно, способен приводить к появлению критических уровней значений функционала (3), одинаковых для каждой серии землетрясений и отвечающих очередному этапу трещинообразования и разрушения сдавливаемых участков литосферных плит.

Для необходимого усложнения модели укажем, что порядка половины сильных тектонических событий происходят на возрастающей ветви кривой $L(n)$ либо вообще в точках ее максимума, см. рис. 3а и 3б. Другими словами, критический уровень функци-

онала (3) в моменты сильных землетрясений в этих случаях отвечает уменьшению сдавливания литосферных плит в данном регионе. Этот факт может объясняться процессами адгезии, приводящей к усилению прочности взаимодействующих участков литосферных плит за счет их взаимного слипания. Степень такого слипания прямо пропорциональна внешнему давлению. Поэтому, как видно из рис. 3а, именно при сбрасывании избыточного давления, что отвечает возрастанию $L(n)$, в таких условиях может быть достигнут критический уровень и произойти само событие.

С учетом предлагаемой гипотезы становится понятным различие между критическими уровнями первого и второго рода, фиксируемыми до землетрясения. Как видно из рис. 4б и 4в, критический уровень второго рода соответствует колебаниям $L(n)$ вокруг среднего значения, которое с большой точностью равно величине этого функционала в момент предстоящего события. Это может быть объяснено непрерывным поступлением в период данных осцилляций в систему внешней энергии, которая не находит выхода. После этого в тектонической системе возникает колебательный (возможно, автоколебательный) процесс. Он сопровождается, по мере прихода указанной энергии, несколькими этапами разрушения соприкасающихся участков литосферных плит. Каждому такому этапу отвечает пересечение графиком $L(n)$ критического значения, равного среднему $\langle L_{12} \rangle \approx \langle L_{34} \rangle \approx L_A$. Однако при этом не происходит никаких процессов (достаточно большого разрушения пород, мелких землетрясений и т.д.) которые привели бы к значительному уменьшению давления. Это означает сохранение накопленной энергии, которая, после серии слабых землетрясений и одного относительно более высокого по магнитуде, наконец разряжается в 1.32 UTC 6 апреля 2009 г. в районе Аквилы. Таким образом, в предположении справедливости данной теории, появление критических уровней второго рода является признаком подготовки сильного землетрясения, требующим особого внимания.

Заметим, что для разных серий землетрясений критические уровни функционала $L(n)$ различны, что может объясняться отличающимися условиями сжатия в различных точках региональной геофизической системы, разной твердостью соответствующих пород и т. д.

Выводы

В результате проведенных вычислений и анализа их результатов были получены следующие выводы.

1. Имеют место многократные повторения значений функционала (3) в моменты реализации сильных тектонических событий. Это дает возможность определения нескольких (по камчатским измерениям, в среднем порядка пяти-шести) интервалов времени длительностью порядка одних суток (и менее), в течение одного из которых произойдет следующее в данной серии землетрясение с магнитудой $M \geq 5,5$.

2. Значительной части таких землетрясений предшествует достижение указанным функционалом критических уровней (критических значений) первого рода, представляющих собой экстремумы $L(n)$, отличающиеся от его значения в момент события не более чем на 0,2 %. Эти экстремумы могут отстоять по времени от даты ближайшего к ним события, входящего в соответствующую серию землетрясений, на величину от нескольких часов до одного года и более.

3. Подобные экстремумы могут предшествовать также и первому (либо вообще единственному) землетрясению в соответствующей серии. В этом случае на значение функционала (3) в момент реализации предстоящего тектонического события указывают почти совпадающие значения таких экстремумов (с разностью модулей порядка 0,2–0,4 % для соседних критических значений).

4. Как показал анализ катастрофического землетрясения 6 апреля 2009 г. в Аквиле, ему за время порядка одного года предшествовали двукратное (за 15 месяцев и за 11 месяцев до события) достижение функционалом (3) критического уровня второго рода. То есть прохождение $L(n)$ двух областей многократных квазисимметричных осцилляций продолжительностью порядка 18 и 6 суток, усреднение по которым дает значение данного функционала, менее чем на 0,2 % отличающееся от его величины в момент рассматриваемого землетрясения. При этом минимальные значения $L(n)$ в областях обеих осцилляций почти совпадают и наименьшее из них является экстремально малым для всего периода от января 2008 до начала апреля 2009 г., то есть вплоть до непосредственного преддверия тектонического катаклизма.

Сочетание двух этих факторов, то есть наличие двух или более областей квазисимметричных осцилляций, экстремально расположенных на графике зависимости $L(n)$ и обладающих фактически совпадающими средними значениями при усреднении по зоне колебаний, может быть интерпретировано как возникновение критического уровня второго рода. Это может помочь предсказать время ожидаемого тектонического события с точностью до 24 часов, см. рис. 4.

5. Землетрясению в Аквиле предшествовал переход геофизической системы региона в эксклюзивное состояние, что подтверждает принятие функционалом (3) за 4 дня до события, 2 апреля, экстремально малого значения за период наблюдений с начала января 2008 г. Далее столь малое значение было с отклонением не более 0,01 % повторено 21 апреля, спустя 15 суток, и затем вторично достигнуто на нисходящем участке $L(n)$ только два года спустя, 19 апреля 2010 г. Таким образом, возникновение эксклюзивно малых (или эксклюзивно больших) величин функционала (3) с существенной вероятностью может рассматриваться как предвестник близкого события высокой магнитуды.

6. Все краткосрочные предвестники предстоящего сильного землетрясения согласно предлагаемой методике оказываются связанными с констатацией приближения свойств геофизической системы к параметрам, сформировавшимся за время порядка одного или нескольких лет до момента ожидаемого события.

7. В работе предпринята попытка феноменологического объяснения полученных результатов, позволяющих говорить о явлении сейсмического квантования значений статистических функционалов наподобие (3), вычисляемых по измерениям критической частоты слоя F2 ионосферы в сейсмоопасных регионах. Предлагаемая гипотеза сводится к тому, что одинаковые значения механического напряжения, при котором начинается разрушение пород литосферных плит, приводят к совпадающим значениям указанных функционалов в соответствующие моменты времени.

Далее авторы планируют рассмотреть возможность увеличения временной точности соответствующего прогноза, в частности путем изменения алгоритма формирования совокупности отрезков реализации, изменения вида функционала (3), а также проведения расчета на основе статистики других физических полей, измеряемых в сейсмоактивных регионах.

Авторы выражают признательность Мировому центру данных по физике твердой Земли за предоставление данных по землетрясениям в регионе Камчатки.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания (проект 3.8070.2017/БЧ).

Литература

1. Коган Л. П. Изменение статистических функционалов от критической частоты слоя F2 ионосферы перед сильными землетрясениями. //Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С. 525–539.