

Monitoring of seismic process based on entropy potential of seismograms

Lazarev V.¹, Mitin E.²

Мониторинг сейсмических процессов на основе энтропийных потенциалов сейсмограмм

Лазарев В. Л.¹, Митин Е. Е.²

¹Лазарев Виктор Лазаревич / Lazarev Viktor - кандидат технических наук, доцент;

²Митин Евгений Егорович / Mitin Evgenij - аспирант,

кафедра автоматизации биотехнологических и теплофизических процессов,

Университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург

Аннотация: в работе излагается подход к организации мониторинга сейсмических процессов с целью прогнозирования землетрясений. Прогнозирование предлагается осуществлять на основе анализа энтропийных потенциалов сейсмограмм. При этом исследуются параметры, характеризующие энтропийные свойства законов распределения вибраций и их характеристики рассеяния. Аprobация предложенных решений проиллюстрирована на основе сейсмограмм землетрясений, произошедших в Японии в последнее время. Предложены методы реализации полученных решений на практике.

Abstract: the paper sets out an approach to organization of seismic processes monitoring in order to predict earthquakes. Forecasting based on the analyses of seismogram's entropy potentials is offered. Parameters which characterize entropy properties of distributions principles of vibration and measure of dispersion are examine. Approbation of considered solution is shown on recent earthquake seismograms from Japan. Methods of practical realization received solution are suggested.

Ключевые слова: сейсморазведка; мониторинг землетрясений; энтропийные потенциалы сейсмограмм.

Keywords: seismic prospecting; earthquake monitoring; entropy potentials of seismograms.

Введение. Землетрясения и цунами являются результатами протеканий сейсмических процессов. В зависимости от их масштабов и интенсивности могут возникать катастрофы с большими разрушениями и человеческими жертвами. В последнее время наметилась отчетливая тенденция нарастания вулканической и сейсмической активности нашей планеты. Поэтому проблема мониторинга сейсмических процессов с целью прогнозирования таких опасных явлений является крайне актуальной. Об этом также свидетельствуют направленность проводимых исследований и нарастающий поток публикаций [2; 3; 12; 13].

В настоящее время разработан ряд подходов и методов по выявлению предвестников землетрясений, основанных на анализе различных явлений: геологических, гидрологических, метеорологических, биологических и др. Также предпринимаются попытки прогнозирования землетрясений на основании анализа динамики параметров сейсмических процессов. Возможности различных методов, их эффективность, достоинства и недостатки, особенности и перспективы практической реализации и др. рассмотрены и проанализированы, например, в работах [2; 3; 12]. Тем не менее, не существует «абсолютного», универсального метода получения полного прогноза землетрясения, позволяющего определить три базовых компонента:

- место возникновения;
- время начала;
- интенсивность толчков.

Поэтому продолжается совершенствование и интенсивный поиск новых подходов и методов к дальнейшему решению стоящей проблемы.

1. Постановка задачи.

В работе излагается подход к проблеме мониторинга и прогнозирования сейсмических процессов, основанный на использовании методов теории энтропийных потенциалов. Суть состоит в следующем.

Тектонические процессы порождают вибрации земной поверхности, которые также иногда называются «дыханием» или «дрожью» Земли. Эти сейсмические колебания могут быть записаны в виде т.н. сейсмограмм. Характер протекания вибрационных процессов содержит информацию о состоянии системы и намечающихся тенденциях ее дальнейшей эволюции или развития. Эти процессы характеризуются изменениями или вариациями параметров во времени. Поэтому для «стороннего» наблюдателя каждое конкретное значение параметра может рассматриваться как реализация случайной величины, имеющей соответствующую вероятность появления. Другими словами, вариации параметра в вибрационном процессе могут быть охарактеризованы уровнем или состоянием его неопределенности. Указанное обстоятельство создает основу для применения вероятностных и «нечетких» подходов к исследованию сейсмических процессов. Особенно актуальными такие подходы являются при исследовании сложных систем, когда имеет место «наложение» контуров влияния элементов системы, а

взаимосвязи между элементами могут иметь стохастические составляющие. Таковым, в частности, являются тектонические системы, характеризующиеся значительными размерами взаимодействующих элементов (плит, горизонтов и др.) с хаотически изменяющимися профилями взаимодействий и расположениями.

Понятие «состояние неопределенности» является общим и может применяться к описанию систем различной природы: технических, социальных, экологических, биологических, тектонических и др. Существуют различные подходы к описанию этих состояний [8; 10], каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Среди таких разработок следует отметить методы интервальных оценок, методы теории нечетких или размытых множеств, методы, основанные на использовании технологий экспертных систем, искусственных нейронных сетей, методы когнитивных информационных технологий, методы теории энтропийных потенциалов и др. При выборе подхода целесообразно руководствоваться следующими соображениями. Состояния неопределенности должны описываться вещественными функциями. Эти функции должны основываться на использовании характеристик рассеяния рассматриваемых параметров. Сами характеристики должны поддаваться достаточно простому определению и быть компактными. Также целесообразно возможность интеграции различных моделей состояний неопределенности в единые полимодельные комплексы. В наибольшей мере, для решения рассматриваемой проблемы мониторинга сейсмических процессов, предъявляемым требованиям отвечают величины энтропийных потенциалов параметров, которые были введены в рамках теории энтропийных потенциалов - ТЭП [7; 8; 16; 17]. Основные положения и прикладные возможности этой теории, необходимые для понимания предлагаемых решений, приведены ниже.

2. Основные положения и прикладные аспекты ТЭП.

Для количественного описания состояний неопределенности используется набор понятий энтропийных потенциалов параметров. Совокупность понятий энтропийных потенциалов (E) в общем виде можно представить коротким множеством и отношений вида

$$E = \langle X, N_E, L_{E,Z}, P_E \rangle \quad (1)$$

В определении (1) использованы следующие обозначения.

X – множество элементов или параметров, используемых для описания состояния рассматриваемого процесса.

N_E – набор отображений для элементов множества X .

P_E – множество характеристик для описания состояний неопределенности.

$L_{E,Z}$ – набор форм отношений для отображения элементов из N_E в P_E .

В частном случае, для описания состояния неопределенности одного параметра x (например, проекции вибрирующей точки системы на какую-либо ось), предложено использовать набор «вложенных» характеристик: величину комплексного энтропийного потенциала (КЭП) L_Δ и величину энтропийного потенциала Δ_e , определяемые следующим образом

$$L_\Delta = \frac{K_e \sigma}{|X_n|} = \frac{\Delta_e}{|X_n|} \quad (2)$$

где K_e – энтропийный коэффициент, характеризующий «дестабилизирующее» влияние закона распределения параметра на предсказуемость появления тех или иных его значений ($0 < K_e \leq 2.07$). Так например, максимальное значение $K_e = 2.07$ соответствует нормальному закону распределения, характеризующемуся «наихудшей предсказуемостью» появлений тех или иных значений параметра. Методики определения величин K_e в различных ситуациях, их значения для ряда типовых законов распределений приведены в специальной литературе [8; 14; 17].

σ – величина средне квадратичного отклонения параметра (СКО).

X_n – базовое значение параметра, на фоне которого рассматривается состояние неопределенности.

Энтропийный потенциал параметра- Δ_e определяется как половина диапазона равномерного распределения $x \in [-\Delta_e, \Delta_e]$, имеющего такую же энтропию $H(x) = -\sum_{(i)} P(X_i) \ln P(X_i)$, (где $P(X_i)$

– вероятность появления значения величины X_i ; $i \in I$), что и закон распределения параметра. При таком определении энтропийный потенциал однозначно выражается через величину энтропии в виде [8; 14]

$$\Delta_e = \frac{1}{2} e^{H(x)} \quad (3)$$

Величина Δ_e также может быть выражена через характеристики рассеяния параметра: величину среднеквадратического отклонения σ и энтропийный коэффициент закона распределения K_e , как это представлено в выражении (2). Использование величины Δ_e для характеристики какого-либо сигнала

позволяет осуществить описание его состояния неопределенности на основе «унифицированных» и информативных характеристик: K_e и σ .

Если базовое значение параметра считать постоянным или оно остается таковым в процессе проведения исследований, то очевидно, что величина L_Δ вырождается в масштабное изображение величины Δ_e . Если также предположить, что $K_e = const$, то есть пренебречь изменением «вариативных» свойств закона распределения параметра, то, в результате такого упрощения, модель состояний неопределенности вырождается в классическую дисперсионную модель. Приведенный пример иллюстрирует принцип «вложения» для частного варианта предложенных понятий. При возрастании уровня состояния неопределённости величины энтропийных потенциалов Δ_e и L_Δ увеличиваются и, наоборот. Величина L_Δ является безразмерной и может использоваться в качестве критерия подобия состояний неопределенности.

Решение задач мониторинга тектонической активности предлагается осуществлять на основе анализа сейсмограмм методами ТЭП. Результаты анализа литературных источников позволили выдвинуть гипотезу о том, что, изменения состояний неопределенности вибрационных процессов связаны с изменениями сейсмической активности. Поэтому сравнительный анализ энтропийных потенциалов и составляющих их величин для последовательных фрагментов сейсмограмм позволит выявить намечающиеся тенденции в развитии сейсмических процессов. Изложенный подход к организации исследований обладает повышенной «чувствительностью», так как позволяет «уловить» особенности изменений сейсмических процессов на уровне изменения законов распределений параметров, даже при постоянстве других характеристик, например, σ и X_n .

Данный подход к организации мониторинга также был успешно апробирован в других сферах: для исследования электрокардиографических сигналов, исследовании экосистем, вибраций различных строительных конструкций и агрегатов (турбоагрегатов, фундаментов, оснований и др.) [4; 6; 7; 11; 13; 18].

3. Методы обработки, исходные данные, результаты.

Реализация поставленной задачи предусматривает организацию вычислений оценок величин энтропийных потенциалов и определяющих их параметров для отдельных фрагментов сейсмограмм. Для этого необходимо осуществить их «оцифровку» или аналого-цифровое преобразование. Последующая обработка «оцифрованного» сигнала осуществляется в соответствии с изложенным подходом.

Одним из ключевых моментов обработки сейсмограмм является выбор периода дискретизации T_d . Увеличение периода дискретизации позволяет уменьшить количество измерений X_i ($i \in I$), результаты которых используются для вычислений значений величин ЭП и, следовательно, уменьшить затраты на обработку информации. При этом возрастает вероятность того, что представление исходного параметра набором «редких» дискретных значений X_i приведет к частичной потере информации об изменениях параметра. Следовательно, оценки величин энтропийных потенциалов и определяющих их параметров, рассчитанные на основании этих дискретных значений, не будут объективными. И наоборот, повышение частоты дискретизации будет способствовать устранению этих недостатков, а, следовательно, повышению эффективности мониторинга, а также повышению себестоимости исследований. Отсюда и возникает вышеуказанная проблема выбора периода дискретизации сейсмических сигналов. При проведении исследований выбор величины T_d осуществлялся на основании теоремы Котельникова. Эта теорема описывает условие, при котором исходный сигнал может быть представлен дискретными отсчетами без потери информации. Суть состоит в следующем. Для неискаженного представления информации, содержащейся в сигнале $x(t)$, дискретными отсчетами $X_i = x(iT_d)$; ($i \in I$), необходимо чтобы величина периода дискретизации удовлетворяла условию

$$T_d \leq \frac{\pi}{\omega_{max}} = \frac{1}{2f_{max}} \quad (4)$$

где ω_{max} и f_{max} максимальная круговая и циклическая частоты спектрального состава этого сигнала, $\omega = 2\pi f$ [1; 9; 14]. Если спектр сигнала является бесконечным или достаточно большим, то в качестве ω_{max} может быть выбрана т. н. эффективная ширина спектра.

Для обеспечения идентичности условий проводимых исследований во всех случаях, моделирование плотностей вероятностей распределения перемещений осуществлялось путем разбиения соответствующих диапазонов вибраций на одинаковое количество равных интервалов. Количество интервалов разбиений выбиралось исходя из методических рекомендаций ВНИИМ. В качестве базовых значений X_n на каждом этапе использовались величины средних значений перемещений - m_x . При расчетах значений величин Δ_e для каждого из фрагментов сейсмограмм вводилась поправка на смещение от недостаточно большого числа наблюдений, попадающих в каждый интервал гистограммы в соответствии с [14].

Изложенный подход к организации и обработке наблюдений оказался состоятельным при проведении исследований систем различной природы [5; 9; 18].

При апробации предлагаемого подхода к мониторингу сейсмических процессов были исследованы сейсмограммы трех значительных землетрясений, произошедших в последнее время на территории Японии. Конкретный выбор объектов был обусловлен тем, что эти землетрясения также изучались исследователями из разных стран с использованием различных подходов и методов. Это обстоятельство создает предпосылки для проведения сравнительного анализа эффективности предложенного подхода. Исходные сейсмограммы были получены из данных проекта Full Range Seismograph Network of Japan (F-net), разработчик - National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) [15].

Обработка сейсмограмм была осуществлена на основе вышеизложенных соображений по дискретизации сигналов, обусловивших выбор следующих параметров: длительность каждого анализируемого фрагмента сейсмограммы-156 с., количество точек на одном фрагменте-101, количество интервалов разбиений при построении гистограмм-9. Все выбранные фрагменты сейсмограмм не имеют налагающихся участков и расположены последовательно во времени по мере их приближения к началу землетрясений. Выбор конкретных фрагментов на временной оси был осуществлен из соображений обеспечения наглядности иллюстраций. Причем акцент делался на выявление характерных тенденций-«предвестников землетрясений». Поэтому большинство выбранных фрагментов предшествуют началу землетрясений. Объем выборки наблюдений для каждого фрагмента сейсмограммы составляет 101 элемент, что позволяет получать представительные оценки величин энтропийных потенциалов Δ_e и L_Δ и их определяющих параметров X_n , K_e и σ , характеризующихся солидной статистической определенностью.

Результаты исследований представлены ниже. По каждому объекту исследования (землетрясению) там же приведена соответствующая информация о расположении, интенсивности, времени начала и др.

1. Результаты анализа сейсмограммы землетрясения в р-не г. Намиэ 18. 05. 2013, в 5:48 (05:47:59) UTC (всемирному координированному времени). Основные характеристики: магнитуда 6.0, глубина источника 34.3 км по координатам 37.745 северной широты, 141.494 восточной долготы (37°44'42.0"N 141°29'38.4"E). Код станции KSN, по координатам 38.9762 северной широты 141.5301 восточной долготы (38°58'34.3"N 141°31'48.4"E).

Таблица 1. Результаты анализа сейсмограммы землетрясения в р-не г. Намиэ в пространстве параметров энтропийных потенциалов

Время исследования Параметр	17.05.13 15:00 (за 14:48 до начала)	18.05.13 1:00 (за 4:48 до начала)	18.05.13 3:00 (за 2:48 до начала)	18.05.13 5:00 (за 0:48 до начала)	18.05.13 10:00 (4:12 после начала)
№	1	2	3	4	5
m_x	2.01	1.84	2.07	2.13	2.06
$\min(x)$	0	0	1	1	1
$\max(x)$	4	3	3	3	3
σ	0.86	0.66	0.59	0.58	0.46
Δ_e	0.82	0.46	0.28	0.27	0.23
K_e	0.94	0.70	0.48	0.48	0.49
L_Δ	0.39	0.25	0.13	0.13	0.11

Наряду с вышеупомянутыми величинами энтропийных потенциалов и их определяющими характеристиками, в табл. 1 также представлены значения минимальных и максимальных для данного фрагмента сейсмограммы величин перемещений, обозначенных $\min(x)$ и $\max(x)$, характеризующих диапазон вибраций. На рис. 1 и 2 представлены графики, наглядно иллюстрирующие представленные в табл. 1 результаты. На рис. 1 представлены значения величины L_Δ по времени наблюдений, начиная от первого наблюдения. Сами наблюдения обозначены точками с номерами от № 1 до № 5 и также представлены в таблице в первой строке. Время проведения соответствующих наблюдений приведено в заголовках столбцов с привязкой к моменту начала землетрясения.

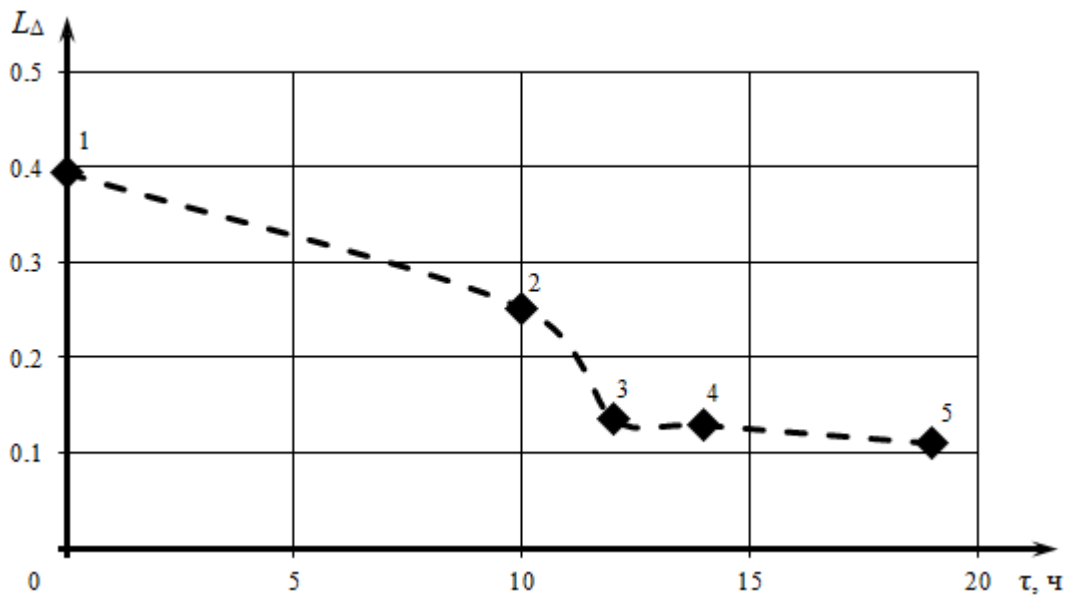


Рис. 1. Распределение значений величин КЭПов по наблюдениям сейсмограммы землетрясения в р-не г. Намиэ

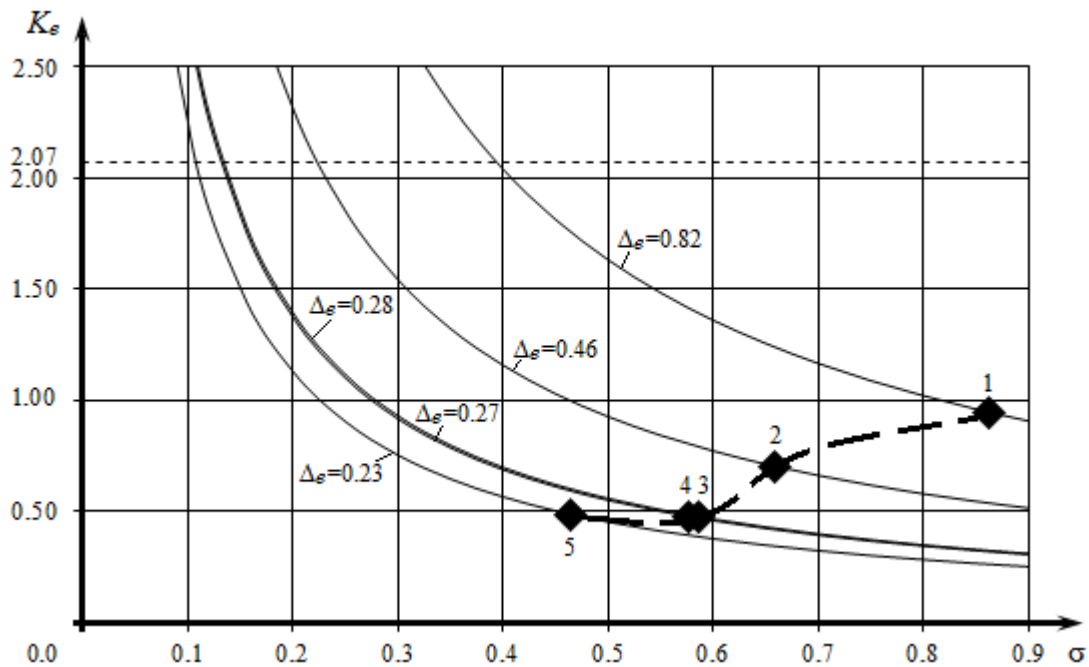


Рис. 2. Траектория перемещений изображающей точки в пространстве параметров ЭПов по наблюдениям сейсмограммы землетрясения в р-не г. Намиэ

На рис. 2 пунктирной линией показана траектория изменения состояний неопределенности сейсмических перемещений (вибраций) для вышеуказанных наблюдений в прямоугольной системе координат σ и K_ϵ . Через каждую точку, соответствующую отдельному наблюдению, проведены т.н. «изотропы» - линии постоянного энтропийного потенциала, соответствующие условию $\Delta_\epsilon = K_\epsilon \sigma = const$. Перемещение изображающей точки по изотропе свидетельствует о неизменности состояния неопределенности анализируемого параметра. Переход изображающей точки на «верхнюю» изотропу соответствует возрастанию состояния неопределенности, и, наоборот. Максимально возможное значение величины энтропийного коэффициента $K_{\epsilon max} = 2.07$ соответствует нормальному закону распределения параметра, обозначено на рис. 2 горизонтальной пунктирной прямой.

2. Результаты анализа сейсмограммы землетрясения в р-не города Токио 13.06.2010 в 3:33 (03:32:54) UTC. Основные характеристики: магнитуда 6.1, глубина источника 7.7 км по координатам 37.405 северной широты, 141.602 восточной долготы (37°24'18.0"N 141°36'07.2"E). Код станции HRO по координатам 37.2246 северной широты, 140.8777 восточной долготы (37°13'28.6"N 140°52'39.7"E).

Аналогичные данные по сейсмограмме землетрясения в р-не г. Токио приведены в табл. 2. Соответствующие иллюстрации с аналогичными обозначениями представлены на рис. 3 и рис. 4.

Таблица 2. Результаты анализа сейсмограммы землетрясения в р-не г. Токио в пространстве параметров энтропийных потенциалов

Время исследования Параметр	12.06.10 3:00 (за 24:33 до начала)	13.06.10 2:00 (за 1:33 до начала)	13.06.10 3:00 (за 0:33 до начала)	13.06.10 4:00 (0:27 после начала)
№	1	2	3	4
m_x	3.42	4.31	3.20	4.34
$min(x)$	0	2	2	1
$max(x)$	7	7	5	10
σ	1.61	1.04	0.82	1.90
Δ_e	2.55	1.22	0.58	3.22
K_e	1.58	1.17	0.70	1.69
L_Δ	0.75	0.28	0.18	0.74

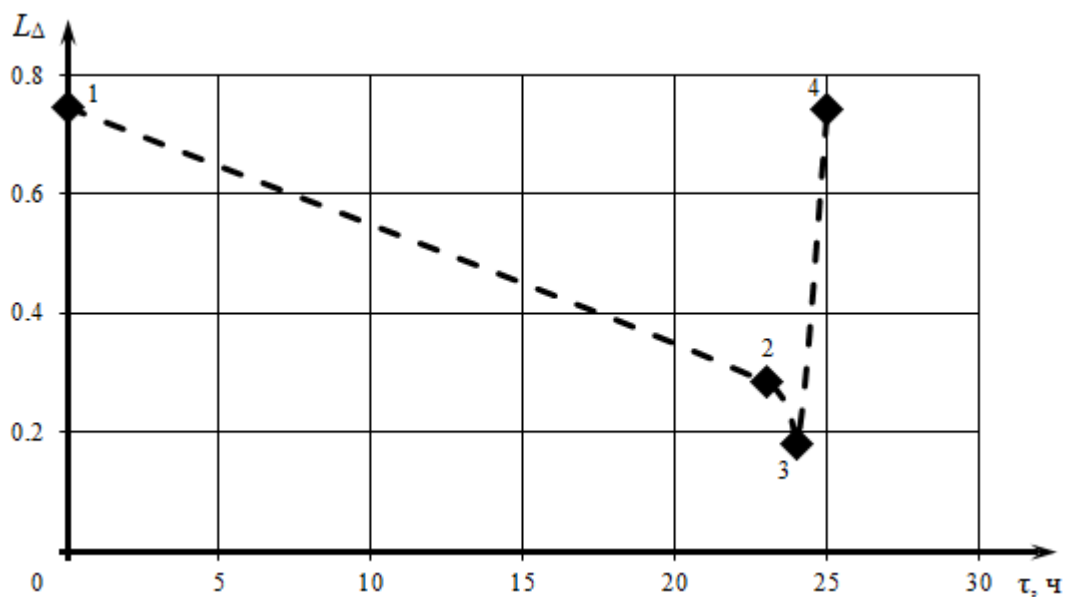


Рис. 3. Распределение значений величин КЭПов по наблюдениям сейсмограммы землетрясения в р-не г. Токио

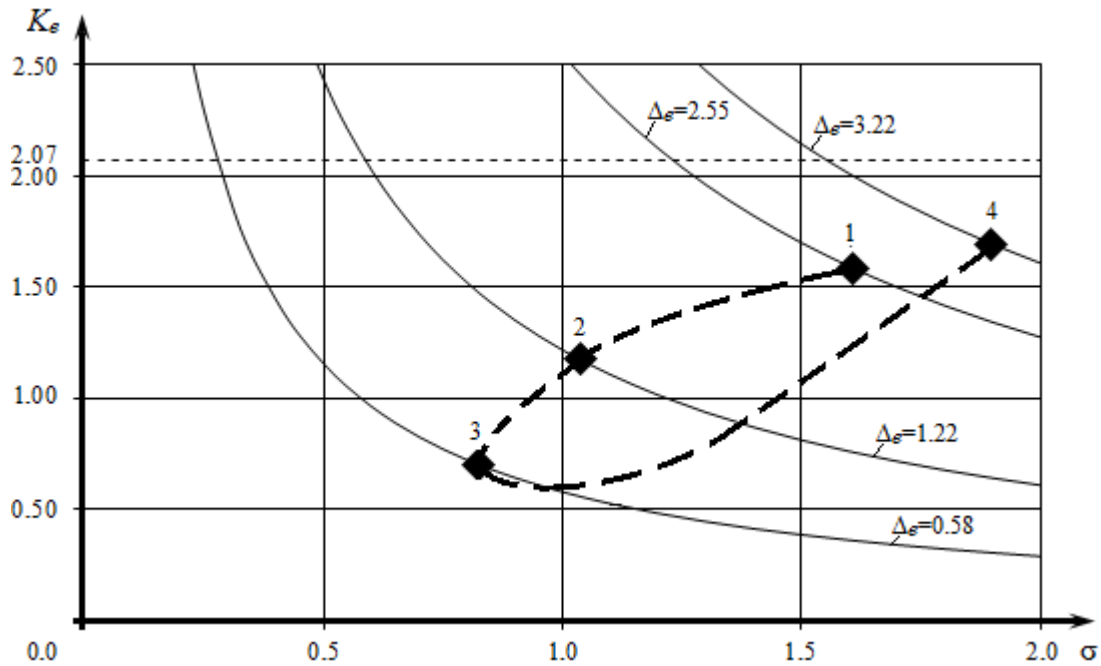


Рис. 4. Траектория перемещений изображающей точки в пространстве параметров ЭПов по наблюдениям сейсмограммы землетрясения в р-не г. Токио

3. Результаты анализа сейсмограммы землетрясения в р-не восточного побережья острова Хонсю 02.10.2011 в 16:49 (16:49:02) UTC. Основные характеристики: магнитуда 5.3, глубина источника 14.9 км по координатам 37.3583 северной широты, 141.422 восточной долготы (37°21'29.9"N 141°25'19.2"E). Код станции HRO по координатам 37.2246 северной широты, 140.8777 восточной долготы (37°13'28.6"N 140°52'39.7"E).

Данные по сейсмограмме землетрясения в р-не восточного побережья острова Хонсю приведены в табл. 3. Соответствующие иллюстрации с аналогичными обозначениями представлены на рис. 5 и рис. 6.

Таблица 3. Результаты анализа сейсмограммы землетрясения в р-не восточного побережья острова Хонсю в пространстве параметров энтропийных потенциалов

Время исследования Параметр	1.10.11 16:00 (за 24:49 до начала)	2.10.11 15:00 (за 1:49 до начала)	2.10.11 16:00 (за 0:49 до начала)	2.10.11 17:00 (0:11 после начала)	2.10.11 18:00 (1:11 после начала)
N_e	1	2	3	4	5
m_x	4.04	4.67	4.05	4.68	4.90
$\min(x)$	1	3	2	0	3
$\max(x)$	6	7	6	10	9
σ	0.85	0.94	0.90	2.06	1.29
Δ_e	0.96	0.88	0.85	4.26	1.76
K_e	1.13	0.94	0.94	2.07	1.36
L_Δ	0.24	0.19	0.21	0.91	0.36

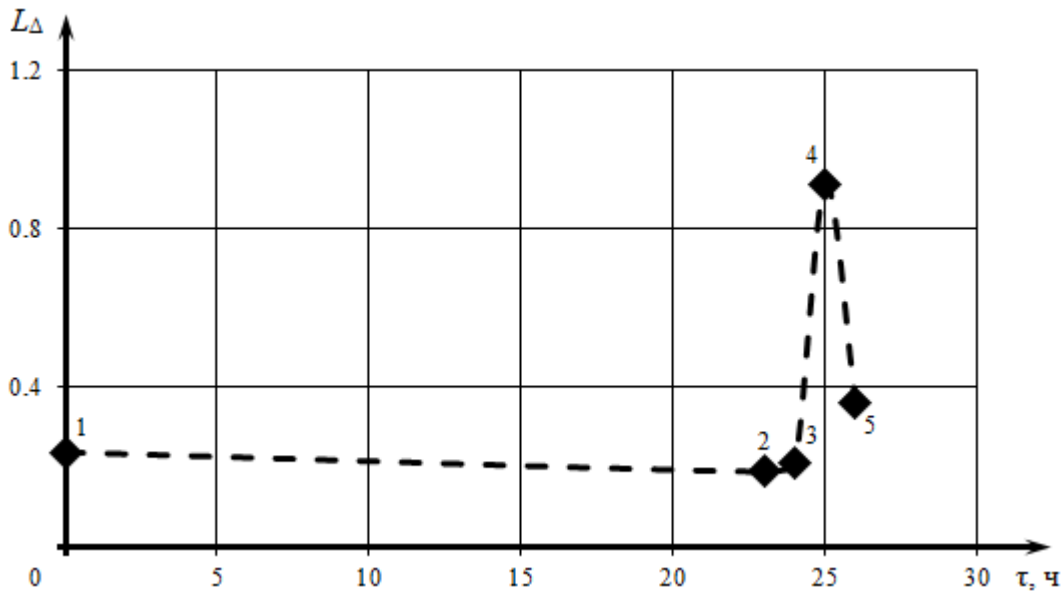


Рис. 5. Распределение значений величин КЭПов по наблюдениям сейсмограммы землетрясения в р-не восточного побережья острова Хонсю

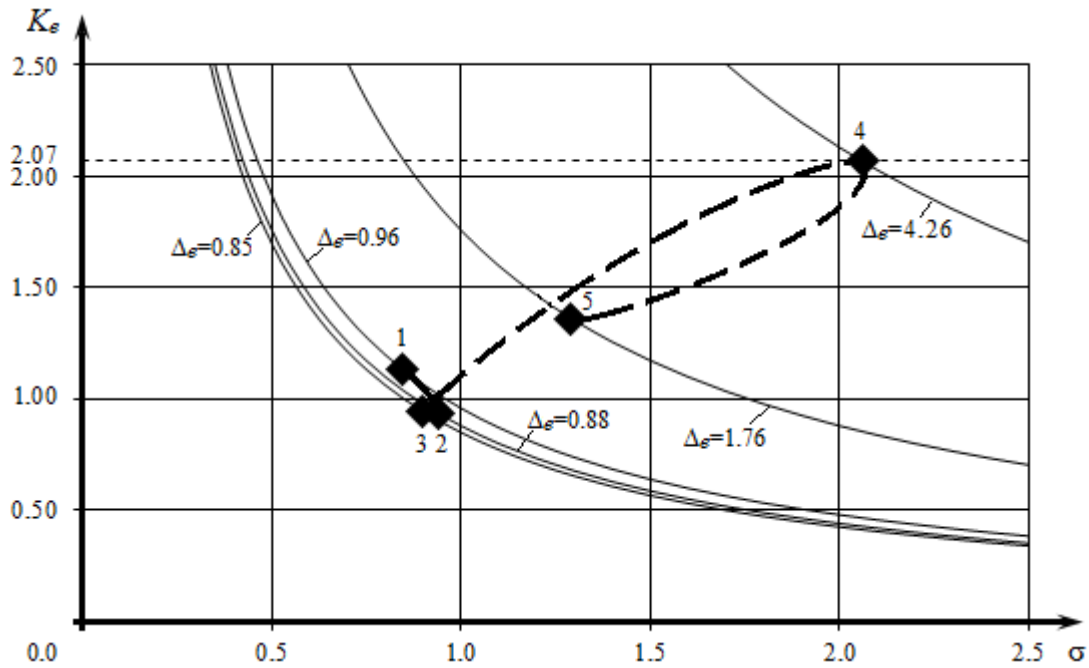


Рис. 6. Траектория перемещений изображающей точки в пространстве параметров ЭПов по наблюдениям сейсмограммы землетрясения в р-не восточного побережья острова Хонсю

4. Обсуждение результатов.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы о возможности мониторинга сейсмических процессов с использованием методов ТЭП.

1. Прогнозирование сейсмических процессов по динамике изменения величины L_{Δ} во времени.

Из полученных данных и соответствующих иллюстраций, представленных на рисунках 1, 3 и 5, следует, что началу землетрясений предшествует возрастание скорости изменения величины

комплексного энтропийного потенциала. Другими словами имеет место тенденция: $\left| \frac{dL_{\Delta}}{dt} \right| \rightarrow \max$.

Такая тенденция отчетливо просматривается между точками 2 и 4 на рис. 1, между точками 2 и 3, а также между точками 3 и 4 на рис. 3 и между точками 3 и 4 на рис. 5. Вполне естественно, что время задержки между моментом достижения экстремума скорости изменения L_{Δ} и началом землетрясения не является постоянным. Значение этой величины определяется свойствами объекта: глубиной залегания источника

землетрясения, расположением относительно станции наблюдения, особенностями строения тектонических структур в данном районе и др.

2. Прогнозирование сейсмических процессов по траекториям в пространстве параметров энтропийных потенциалов.

Анализ траекторий перемещений изображающей точки в пространстве параметров энтропийных потенциалов σ и K_e позволяет сделать следующие выводы.

Существуют области состояний неопределённости, соответствующие режимам «нормальной» сейсмической активности. Общий вид такой области приведен на рис. 7 и обозначен штриховкой.

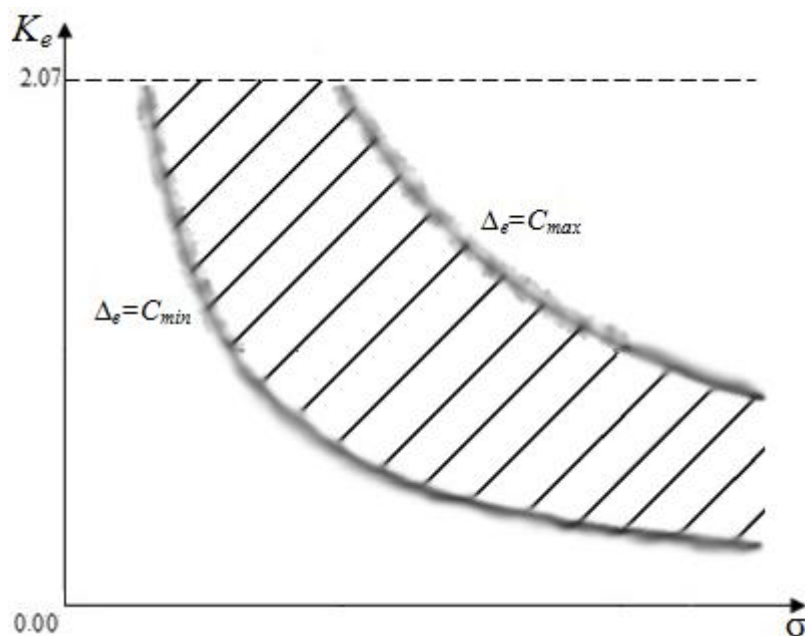


Рис. 7. Общий вид фазового пространства с областью «нормальных» состояний неопределенности сейсмических режимов

Перемещение изображающей точки внутри такой области не предвещает возрастания вероятности возникновения аномальных сейсмических режимов-землетрясений, и, наоборот. Основными границами такой области являются две изотропы: $\Delta_e = K_e \sigma = C_{min} = const$ и $\Delta_e = K_e \sigma = C_{max} = const$. Приближение изображающей точки к нижней граничной изотропе является своего рода аналогом ситуации «затишье перед бурей». То есть, в системе нарастает некое доминирующее возмущение, которое «перекрывает» все остальные, вследствие чего снижаются их дестабилизирующие проявления, что приводит к уменьшению значения величины K_e и, соответственно, к снижению величины Δ_e . Такая ситуация хорошо видна на рис. 2. Приближение изображающей точки к «верхней» граничной изотропе связано с появлением возмущений с нарастающей «энергетикой». Их действие напрямую дестабилизирует состояние системы, что приводит к возрастанию величины Δ_e . Такая ситуация имеет место при перемещении изображающей точки из положения 3 в положение 4 на рисунках 4 и 6. Перемещение изображающей точки в обратном направлении из положения 4 в положение 5 на рис. 6 имеет место после окончания землетрясения, когда уже произошел «разряд» возмущения и система возвращается в «нормальное» состояние. Значения величин C_{min} и C_{max} зависят от вышеперечисленных факторов, и их целесообразно определять для каждой станции наблюдения. В данном, обобщенном случае «нечеткость» их значений обозначена «размытостью» обеих граничных изотроп на рис. 7.

Во всех случаях, фиксируемые с использованием предложенных методов аномалии в развитии сейсмических процессов, проявляются в краткосрочной перспективе, в пределах до 1-2 часов до начала землетрясений.

Изложенный подход к исследованию сейсмических процессов и выбору «реперных» признаков (в виде скоростей изменения величины L_Δ или границ областей «нормальных» состояний) был успешно апробирован для мониторинга вышеупомянутых систем иной природы и масштаба.

Заключение.

В работе изложен подход к мониторингу и прогнозированию сейсмических процессов, основанный на использовании методов теории энтропийных потенциалов. С использованием предложенных методов появляется возможность осуществлять превентивную диагностику развития сейсмических процессов, предсказывать тенденции нарастания вероятностей возникновения землетрясений. И, что особенно важно, появляется возможность краткосрочного прогнозирования (в пределах от нескольких минут до

нескольких сотен минут) высоких вероятностей возникновения землетрясений. Внедрение предлагаемого метода мониторинга в систему предупреждения о надвигающихся землетрясениях предусматривает пополнение системы только на уровне прикладного программного обеспечения для обработки сейсмических сигналов по изложенным алгоритмам и не требует затрат на модернизацию или замену технических средств. Получаемые при этом прогнозы будут являться дополнением к результатам, получаемым с использованием существующих методов диагностирования подобных явлений. В этом смысле предлагаемый подход следует рассматривать как «инструмент» в арсенале методов для проведения исследований сейсмических процессов.

Литература

1. *Айфичер Э. С., Джарвис Б. У.* Цифровая обработка сигналов: практический подход. Второе издание. Пер. с англ. М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. 992 с.
2. *Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Савиных В. П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
3. *Добровольский И. П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 240 с.
4. *Каминская В. И.* Оптимизация проектных решений и технологии возведения намывных сооружений. «Стройиздат Северо-Запад». СПб., 2011. 163 с.
5. *Лазарев В. Л.* Квалиметрия систем на основе энтропийных потенциалов параметров. Прикладные аспекты для пищевой промышленности и нанотехнологий. // Вестник Международной академии холода, 2009. № 4, с. 48-52.
6. *Лазарев В. Л., Митин Е. Е.* Мониторинг процессов термообработки жидких продуктов на основе методов теории энтропийных потенциалов // Вестник Международной академии холода, 2013. № 2. с. 43.
7. *Лазарев В. Л.* Исследование систем на основе энтропийных и информационных характеристик. //Журнал технической физики, 2010. № 2. с. 1-7.
8. *Лазарев В. Л.* Теория энтропийных потенциалов. С-Пб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 127 с.
9. *Лазарев В. Л., Митин Е. Е.* Исследование электрокардиографических сигналов с использованием методов теории энтропийных потенциалов. / Сб. докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2012. В 2-х томах. С-Пб., 2012. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Т. 2. с. 123-126.
10. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
11. *Кулаков В. Г., Лазарев В. Л., Федюлин В. А.* Энтропийные модели в исследовании социальных систем. // Вопросы статистики, 2010. № 10. С. 47-50.
12. *Соболев Г. А., Пономарев А. В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
13. Управление в условиях неопределенности / С. В. Прокопчина, М. Ю. Шестопалов, Л. В. Уткин, М. С. Куприянов, В. Л. Лазарев, Д. Х. Имаев, В. Л. Горохов, Ю. А. Жук, А. В. Спесивцев. Под общ. ред. С. В. Прокопчиной. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 304 с.
14. Электрические измерения неэлектрических величин. А. М. Туричин, П. В.Новицкий, Е. С. Левшина и др. / Под ред. П. В. Новицкого. Л.: «Энергия», 1975. 576 с.
15. Сайт базы данных National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. [Электронный ресурс]: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (дата обращения: (30.11.2014).
16. *Lazarev V. L.* An entropy approach to monitoring and control. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2005. Vol. 44, № 6, pp. 893-899.
17. *Lazarev V. L.* The Theory of Entropy Potentials, Basic Concepts, Results and Applications.// Pattern Recognition and Image Analysis, (Advances in Mathematical Theory and Application.), 2011. Vol. 21, № 4, pp. 637-648.
18. *Lazarev V. L.* Vibromonitoring of difficult systems on the basis of models of conditions uncertainty parameters. European Science and Technology [Text]: materials of the IV international research and practice conference. Vol. 1, Munich, April 10th-11th, 2013 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg-Munich-Germany, 2013-776 p. Pp. 251-255.