

УДК 550.343

**ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ В КАТАЛОГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
И В ИЗМЕРЕНИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОГО И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ШУМА**

**В.Н. Сычев**

Рассмотрен каталог землетрясений с позиций неравновесной термодинамики с использованием статистики Тсаллиса. Представлены результаты исследования записей сейсмического и сейсмоакустического шума с применением метода структурных функций, предложенного А.Н. Колмогоровым для изучения статистических свойств турбулентности в инерционном и диссипативном интервале [1].

*Ключевые слова:* землетрясение; корреляция; нелинейная динамика; энтропия; структурные функции.

**LONG-RANGE CORRELATIONS IN CATALOGUES OF EARTHQUAKES  
AND IN MEASUREMENTS OF SEISMIC AND SEISMOACOUSTIC NOISE**

**V.N. Sychev**

It is considered the catalog of earthquakes from positions of nonequilibrium thermodynamics with use of Tsallis statistics. It is presented the results of research of records of seismic and seismoacoustic noise with application of the method of structural functions offered by A.N. Kolmogorov for studying of statistical properties of turbulence in an inertial and dissipative interval [1].

*Keywords:* earthquake; correlation; nonlinear dynamics; entropy; structural functions.

Современные исследования показывают, что землетрясения обнаруживают признаки динамически сложных систем, которые можно отнести к системам с дальними корреляциями. К описанию таких систем можно подойти с точки зрения методов статистической физики и теории вероятностей. Первым и наиболее широко известным соотношением является закон Гуттенберга – Рихтера:

$$P(E) \sim E^{-\gamma}. \quad (1)$$

Однако это распределение является эмпирическим и не может быть выведено из положений равновесной термодинамики. Для описания статистических систем, подобных идеальному газу, традиционно использовалась статистика Больцмана, которая предполагает отсутствие взаимодействий отдельных частей системы. На практике при исследовании землетрясений, имеем дело с динамически сложными системами, в которых имеется сильное взаимодействие между всеми частями системы. Это приводит к нарушению термодинамической аддитивности, поэтому их не удается описать статистикой и термодинамикой Больцмана. Тсаллис обобщил статистику Больцмана, введя

в выражение для энтропии параметр  $q$ , характеризующий степень неаддитивности [2, 3]:

$$S_q = k \frac{1}{1-q} \left( 1 - \sum_{i=1}^N p_i^q \right), \quad (2)$$

где  $p_i = \frac{N_i}{N(\varepsilon)}$ ,  $N_i$  – число элементов системы, приходящихся на  $i$ -элемент  $\varepsilon$ -разбиения;  $N(\varepsilon)$  – полное число элементов заданного  $\varepsilon$  покрытия;  $k$  – размерная константа. Статистика Больцмана соответствует пределу  $q \rightarrow 1$ . Случай  $q < 1$  соответствует наличию предела по высоким событиям. А  $q > 1$  указывает на наличие дальних корреляций в неравновесной системе, когда аддитивность нарушается. Соответствующее выражение для магнитуд землетрясений, например в [3], принимает следующий вид:

$$\log \left( \frac{N(m > M_{th})}{N} \right) = \left( \frac{2-q}{1-q} \right) \log \left[ 1 - \left( \frac{1-q}{2-q} \right) \left( \frac{10^{M_{th}}}{a^{2/3}} \right) \right]. \quad (3)$$

На рисунке 1 представлено распределение относительного количества землетрясений с магнитудой  $m > M_{th}$ , построенного для каталога землетрясений сети KNET.

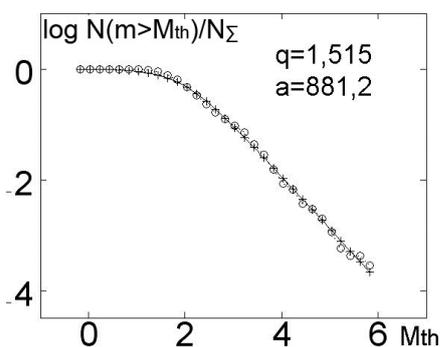


Рисунок 1 – Распределение относительного количества землетрясений с магнитудой  $m > M_{th}$  и значения параметров  $q$  и  $a$ . Окружности – построения по каталогу KNET, крестики – аппроксимирующая кривая (1)

Видно, что функция распределения, построенная по каталогу KNET, хорошо описывается аналитической функцией с параметрами  $q=1,515$  и  $a=881,2$ . Как уже отмечалось, значение  $q > 1$  соответствует системам, в которых есть сильные корреляции, т. е. наблюдается сильное взаимодействие между частями системы.

Для того чтобы описать процесс, в первую очередь необходимо определить его функцию распределения. Флуктуации амплитуд тривиального случайного процесса описываются гауссовой статистикой или нормальным законом распределения, например, такое распределение будет иметь классическое броуновское движение. Однако такие распределения не всегда встречаются на практике. К примеру, рассмотрим землетрясение ( $K=11,62$ , 28.11.2012, 05:30(UTC),  $41,89^\circ$  с.ш.,  $77,7^\circ$  в.д.), произошедшее на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) (рисунок 2а). Показана компонента ННЗ, станция ААК сети KNET.

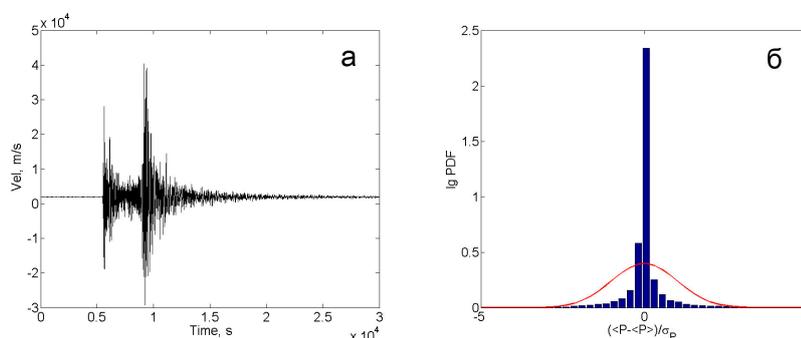


Рисунок 2: а – событие: 28.11.2012, 05:30(UTC),  $41,89^\circ$  с.ш.,  $77,7^\circ$  в.д.,  $K=11,62$ ; б – функция распределения плотности вероятностей и аппроксимация нормальным распределением

В качестве параметра выбрана флуктуация безразмерной величины:  $(P - \langle P \rangle) / \sigma_P$ , где скобки  $\langle \rangle$  означают осреднение по времени,  $\sigma_P = \left( \langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2 \right)^{1/2}$  – среднеквадратичное отклонение. Функция распределения плотности вероятностей и ее аппроксимация нормальным распределением представлены на рисунке 2.

Рисунок 2, б демонстрирует, что для данного случая характерен негауссовый характер распределения, поэтому потребуется исследовать совокупность всех статистических моментов исследуемой величины. Для наблюдаемых процессов разрушения при землетрясении требуются уже другие законы распределения, способные описывать случайные процессы с памятью и дальними корреляциями.

Для определения характеристик случайных процессов со стационарными приращениями, А.Н. Колмогоров ввёл [1] функции, названные структурными. Если случайная функция задана рядом  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , то структурная функция порядка  $q$  определяется формулой

$$S(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} |x_{k+i} - x_i|^q. \quad (4)$$

В инерционном диапазоне, который  $\gg$  диссипативного и  $\ll$  глобального, теория А.Н. Колмогорова предсказывает степенной закон зависимости структурной функции (момента порядка  $q$ ) от масштаба. В отличие от пространственных корреляционных моментов, характеризующих внутреннюю связь между возмущениями всех пространственных масштабов, структурные функции определяют среднее значение возмущений определенного масштаба, который по порядку величины не превосходит расстояние между двумя точками рассматриваемых полей.

На рисунке 3, а показано поведение структурных функций порядков  $1 \div 9$  для события рисунка 2, а. Структурные функции при расчетах нормированы на функцию распределения. На рисунке 3, б представ-

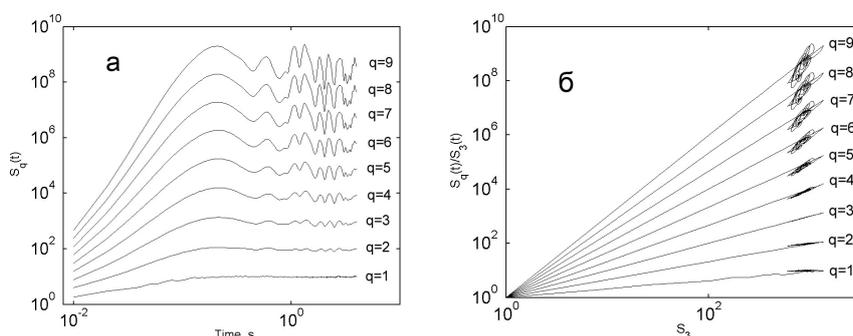


Рисунок 3: а – структурные функции порядков  $q = 1 \div 9$ ;  
б – зависимость моментов структурных функций от структурной функции третьего порядка

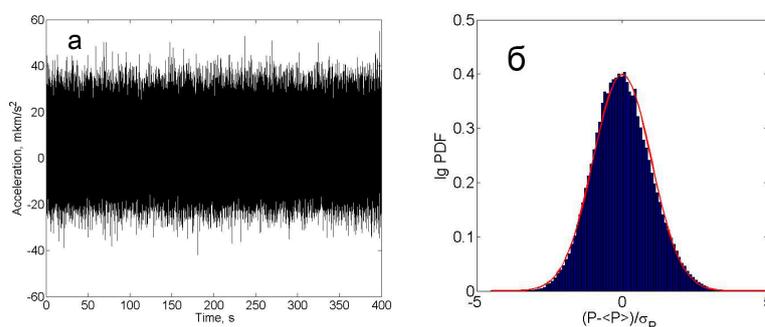


Рисунок 4: а – сейсмоакустический шум вблизи диполя;  
б – функция распределения плотностей вероятностей и аппроксимация нормальным распределением

лены отношения моментов структурных функций к структурной функции третьего порядка.

Наличие линейного участка на рисунке 3, а, б демонстрирует тривиальную автоматичность. В свою очередь, по полученным графикам можно определить характерный размер корреляций. Инвариантность наблюдается на масштабах  $0,01 \div 1$  сек. Если скорость распространения волн составляет  $2-8$  км/с, то это соответствует линейному размеру  $0,1 \div 2$  км. По Ю.В. Ризниченко [4] этому классу землетрясения соответствует радиус очага  $0,97$  км, что хорошо согласуется с полученной оценкой линейного размера корреляций для данного события. Таким образом, использование структурных функций позволяет оценить характерные масштабы корреляций в наблюдаемой системе.

Продemonстрируем применение этого метода к анализу еще одного сигнала, сейсмоакустического шума (рисунок 4, а), предварительно пояснив, с чем этот сигнал связан.

Для проведения глубинных электромагнитных зондирований с целью мониторинга кажущегося сопротивления на НС РАН разработана и используется генераторная установка ЭРГУ-600-2, развивающая ток в активной нагрузке  $600$  А. В качестве нагрузки

используется диполь-излучатель, расположенный в центральной части Бишкекского геодинимического полигона, ориентированный в направлении север-юг. В ряде работ [5–7] показана возможность влияния электромагнитных импульсов на сейсмогенные структуры. Отложенная, многоэтапная реакция среды с длительной задержкой во времени, до сих пор не объяснена и требует дополнительных исследований. Для решения этих задач в непосредственной близости от излучающего диполя на территории НС РАН оборудован измерительный пункт – подземный бункер, где размещены приемники сигналов сейсмоакустической эмиссии (САЭ) и сейсмического шума.

На рисунке 4, а представлен результат регистрации такого САЭ во время проведения режимных зондирований на территории БГП: понедельник, 09.06.2014, первый сеанс зондирования. Функция распределения плотностей вероятностей и ее аппроксимация нормальным распределением представлены на рисунке 4, б.

На рисунке 5, а показано поведение структурных функций порядков  $1 \div 9$  для события рисунка 4, а. На рисунке 5, б представлены отношения моментов структурных функций к структурной функции третьего порядка.

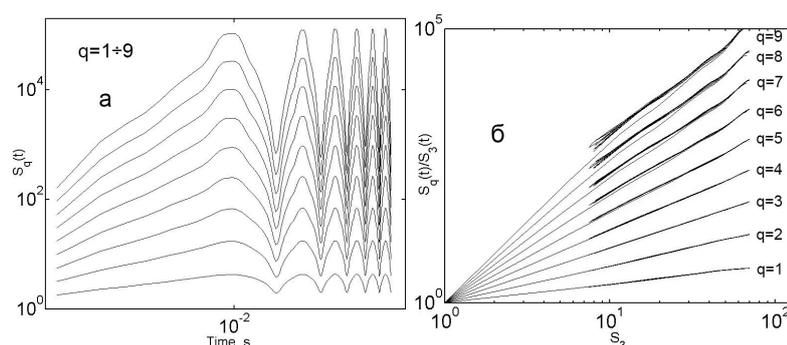


Рисунок 5: а – структурные функции порядков  $q=1 \div 9$ ;  
б – зависимость моментов структурных функций от структурной функции третьего порядка

Определим также характерный размер корреляций. Инвариантность наблюдается на масштабах менее 0,01 сек. Если скорость распространения волн составляет 2–8 км/с, то это соответствует линейному размеру первых десятков метров, т. е. режимные зондирования вызывают изменение на структурах порядка первых десятков метров.

Таким образом, проведен анализ каталога землетрясений и записей сейсмологических событий и сейсмоакустического шума как сигналов системы с медленной динамикой: получены функции распределения, построены структурные функции порядков от 1 до 9, произведены оценки масштабов корреляций.

Исследование осуществлено в рамках выполнения государственного задания ИС РАН, тема № 78, а также частично поддержано грантом РФФИ № 15-05-06857.

#### Литература

1. Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности / А.Н. Колмогоров // ДАН СССР. 1941. № 32. № 1. С. 19–21.
2. Silva R. Nonextensive models for earthquakes / R. Silva, G.S. Franca, C.S. Vilar, J.S. Alcanis // Phys. Rev. E 2006. 73. 026102.
3. Telesca L. Tsallis-Based Nonextensive Analysis of the Southern California Seismicity / L. Telesca // Entropy. 2011. 13. P. 127–1280.
4. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды / Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1985. Т. 1. 408 с.
5. Богомолов Л.М. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности / Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, В.Н. Сычев // Изд. дом: Lambert academic press, Saarbrücken: reha gmbh, 2011, 408 p. (Электронная книга).
6. Сычев В.Н. К вопросу о возможности влияния пусков МГД генераторов на вариации слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня / В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева // Геодинамика и геозкология высокогорных регионов в XXI в. Вып. 3. Москва–Бишкек, 2008. С. 172–186.
7. Сычев В.Н. Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона / В.Н. Сычев Л.М. Богомолов, А.К. Рыбин, Н.А. Сычева // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: Геос, 2010. С. 316–325.