

КОСМОФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В СПЕКТРЕ АМПЛИТУД ФЛУКТУАЦИЙ В БРОУНОВСКОМ ДВИЖЕНИИ

А.В. Каминский, С.Э. Шноль

Проведено исследование изменений спектров амплитуд флуктуаций – формы соответствующих гистограмм – при измерениях скоростей броуновского движения в суспензии полистириновых шариков. Форма гистограмм изменяется с высокой вероятностью синхронно в двух независимых ячейках, находящихся в одном и том же месте. Эта синхронность сохраняется при расстоянии между ячейками в два метра и расположении ячеек *по меридиану*. При расположении ячеек *по параллели* наблюдается высокая вероятность синхронного изменения формы гистограмм *по местному* времени.

Этот результат соответствует сделанному ранее выводу о зависимости формы гистограмм – спектров амплитуд флуктуаций случайных процессов – от вращения Земли вокруг своей оси.

Ключевые слова: Космофизические факторы, случайные процессы, броуновское движение.

Введение

В ряде работ (см. обзоры в [1–3]) было обнаружено закономерное изменение спектров амплитуд флуктуаций (формы соответствующих гистограмм) при измерениях характеристик различных процессов (скоростей химических и биохимических реакций, шумов в грави-градиентной антенне, шумов в полупроводниковых схемах до радиоактивного распада). В предлагаемой статье представлены результаты аналогичного исследования процесса броуновского движения.

1. Объект. Материалы. Методы

В 2006 году мы исследовали закономерности изменения формы гистограмм, получаемых при измерениях флуктуаций скоростей броуновского движения в водной суспензии ZnO (средний размер частиц порядка 5 мкм). Были получены доказательства синхронного изменения формы гистограмм, построенных по результатам измерений в независимых «генераторах», находящихся рядом на лабораторном столе.

В 2009 году эти опыты были повторены с использованием суспензии полистирольных шариков диаметром 450 нм (полученной от компании Polysciences, Inc.) и более совершенной техники измерений. Для измерения флуктуаций скоростей броуновского движения мы использовали известный метод динамического рассеяния света (dynamic light scattering, DLS) [4]. Метод основан на измерениях флуктуаций когерентного света, рассеянного на ансамбле движущихся частиц. Для этого через образец, представляющий собой стеклянную ячейку с суспензией броуновских частиц, пропускается коллимированный луч лазера. Дифрагированные на взвешенных частицах электромагнитные волны, складываясь на активной площадке фотодетектора в случайных фазах, дают стохастически изменяющийся фототок, с точностью до размерного коэффициента равный

$$i(t) = \langle E(t)E^*(t) \rangle. \quad (1)$$

Здесь угловыми скобками обозначено усреднение по быстрым оптическим осцилляциям.

Упрощенная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В установке реализовалась геометрия «обратного рассеяния» и режим многократного рассеяния света. Использовались две идентичные оптические ячейки (в дальнейшем – «броуновские генераторы» сигналов). Ячейка представляет собой стеклянную кювету с зазором 1 мм, заполненную суспензией, и оптоэлектронную часть, содержащую лазерный диод, фотодиод и предусилитель. Фототоки детекторов $i_1(t)$ и $i_2(t)$ преобразовывались в напряжение в трансимпедансных усилителях с коэффициентом преобразования $r = 10$ МОм. После оцифровки двухканальным 12-разрядным АЦП, работающим на частоте 42 кГц, сигналы записывались на жестком диске персонального компьютера. Детекторы – дифференциальные pin фотодиоды фирмы Hamamatsu. Лазеры – одномодовые структуры VCSEL фирмы RayCap, длина волны $\lambda = 850$ нм, ширина полосы генерации примерно 100 МГц, энергия излучения 1 мВ. Предпринимались специальные меры по исключению возможных синхронных помех. Датчики располагались на амортизирующем основании, в цепях питания лазеров и усилителей осуществлялись разделение и фильтрация. С целью сведения к минимуму возможных синхронных помех, связанных с вибрациями, в тракте усиления применяли высокочастотный фильтр со срезом ниже 30 Гц.

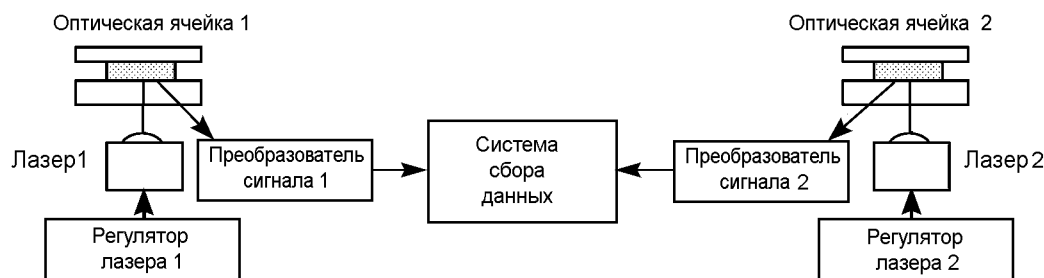


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной установки

На рис. 2 приведен фрагмент временного ряда фототока $i_1(t)$ одного из броуновских генераторов. Внешний вид сигнала типичен для персистентных сигналов. Автокорреляционная функция этого сигнала для не слишком больших τ описывается экспонентой $c(\tau) = \exp(-q^2 D \tau)$ со временем затухания, определяемым геометрией рассеяния и коэффициентом диффузии $D = kT/(3\pi\eta d)$ (формула Стокса-Эйнштейна, где k – постоянная Больцмана, T – температура, η – вязкость, d – диаметр частицы). Величина q определяет перенос импульса фотона при рассеянии на броуновских частицах. Спектр мощности сигнала Лоренцев $S(\bar{\omega}) \sim \bar{\omega}_0/(\bar{\omega}_0^2 + \bar{\omega}^2)$, где $\bar{\omega}_0 = 1/T_0$ – частота релаксации. При $\bar{\omega} \gg \bar{\omega}_0$ спектр аппроксимируется степенной зависимостью. Аналогично при переходе к временному представлению – корреляционная функция может аппроксимироваться степенной зависимостью в области $\tau \ll T_0$.

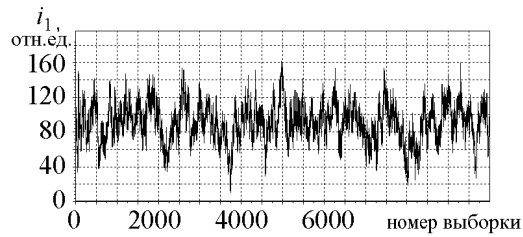


Рис. 2. Результаты измерений DLS-сигнала (фрагмент временного ряда) в генераторе № 1. Число измерений 10000, каждое длительностью $1/8000 = 1.2 \cdot 10^{-4}$ с

В нашем случае DLS-сигнал описывается моделью обобщенного броуновского движения (fractional Brownian motion) [5]. В области высоких частот (больших 100 Гц) сигнал самоподобен и асимптотическое поведение корреляционной функции при $\tau' = q^2 D \tau \rightarrow 0$ имеет степенной характер $C(\tau) = 1 - |\tau'|^\alpha$ (здесь α – скейлинговый параметр, связанный с фрактальной размерностью $D = 2 - \alpha/2$). На низких частотах $\tau \rightarrow \infty$, $C(\tau) = |\tau'|^{-\beta}$, где β – скейлинговый параметр, связанный с коэффициентом Херста $\beta = 2 - 2H$.

Для DLS-сигнала от броуновских генераторов получены следующие характеристики временных рядов: $\alpha \approx 0.7$, $D \approx 1.65$, $H = 0.82 \pm 0.1$.

На рис. 3, а приведена автокорреляционная функция сигнала одного из каналов $g_{11} = \langle i_1(t)i_1(t + \tau) \rangle$, а на рис. 3, б кросскорреляционная функция между каналами $g_{12} = \langle i_1(t)i_2(t + \tau) \rangle$. Из рис. 3, б видно, что ни какой значимой физической связи, которая могла бы привести к отличному от нуля корреляционному моменту, между каналами нет. Незначительные колебания кросскорреляционной функции g_{12} около нулевой линии стремятся к нулю при увеличении статистики.

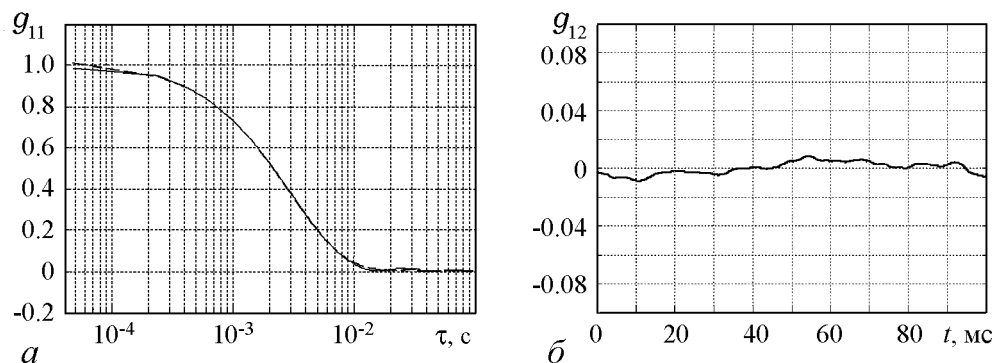


Рис. 3. Автокорреляционная (а) и кросскорреляционные (б) функции для сигналов двух броуновских генераторов в нашем опыте

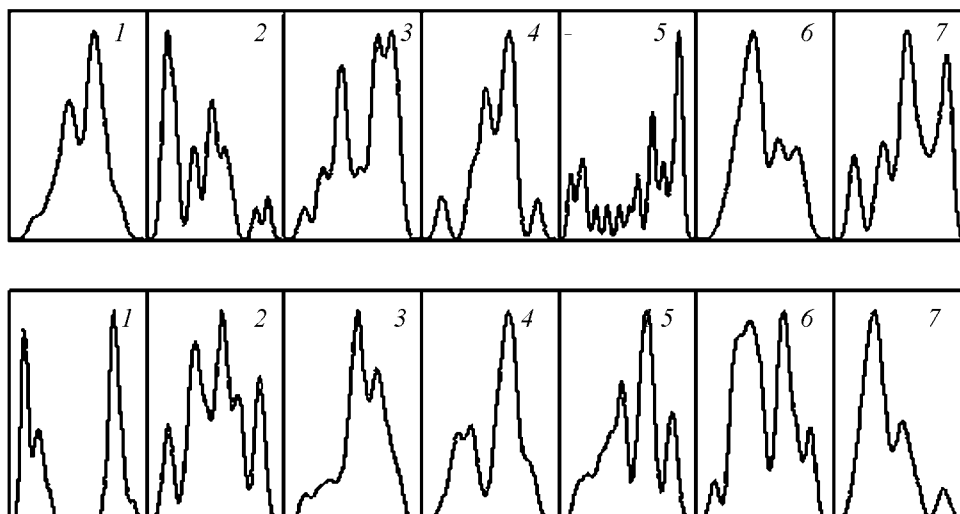


Рис. 4. Последовательности гистограмм (фрагмент компьютерного архива), построенных по результатам измерения броуновского движения в двух независимых броуновских генераторах. Оси абсцисс каждой гистограммы – величины фототока при измерениях броуновского движения (в относительных единицах). Оси ординат – числа сходных пар, соответствующих данным величинам фототока. Гистограммы сглажены 17-кратным скользящим суммированием

2. Построение гистограмм и исследование их формы

По отрезкам временных рядов длиной по 30 или по 60 измерений строили гистограммы распределения амплитуд. Для удобства визуального сравнения эти гистограммы сглаживали скользящим суммированием. Все процедуры построения, сглаживания, масштабирования гистограмм осуществляли посредством компьютерной программы Эдвина Пожарского «Histogram Manager» [1].

Гистограммы мы считаем сходными, если путем допустимых операций растяжения и зеркального отражения достигается визуальное сходство их форм. Другими словами, формой гистограммы мы называем инвариант подгруппы аффинных преобразований на плоскости, включающий операции масштабирования, параллельного переноса и отражения по оси абсцисс.

Методы построения и исследования формы гистограмм с необходимой детальностью представлены в ранее опубликованных работах [1].

На рис. 4 изображен фрагмент компьютерного архива – последовательности гистограмм, построенных по результатам измерения броуновского движения в двух независимых броуновских генераторах. Гистограммы построены каждая по 30 результатам измерений и сглажены 17 раз. Верхняя строка – гистограммы для генератора № 1, нижняя – № 2. Указаны номера последовательных гистограмм. Общее число гистограмм в таких рядах составляло несколько тысяч.

3. Синхронное изменение формы гистограмм при измерениях броуновского движения в независимых генераторах в одном и том же географическом пункте

На рис. 5 приведен фрагмент компьютерного архива с парами синхронных гистограмм, построенных по результатам независимых измерений в двух установках и

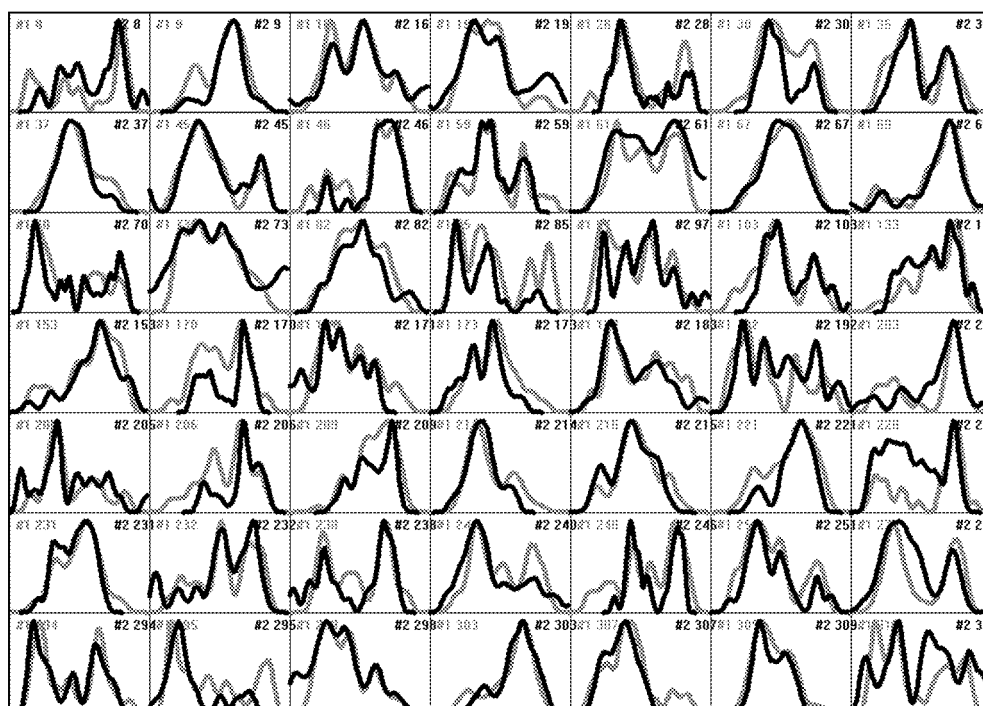


Рис. 5. Пары гистограмм (фрагмент журнала), построенных по результатам синхронных измерений в двух независимых броуновских генераторах, признанные сходными при экспертном сравнении. Указаны номера гистограмм во временных рядах. Оси как на рис. 4

признанных экспертами сходными. Указаны номера гистограмм во временных рядах. Видно, что сходными оказываются синхронные гистограммы разной формы.

При построении распределений числа сходных пар гистограмм по величинам разделяющих их интервалов обнаружено, что некоторым интервалам соответствует особо большое число сходных пар. Именно в этом и состоит основное свидетельство неслучайности сходства гистограмм в независимых процессах.

На рис. 6 изображено распределение числа сходных пар гистограмм, построенных по результатам измерений скоростей броуновского движения в двух независимых генераторах (опыт от 24.09.2009). Видно, что число синхронных пар сходных гистограмм явно превышает «фон». Высота центрального пика равна 89 парам при 720 гистограмм в рядах, то есть составляет около 12% от максимально возможного. В других интервалах высота столбиков составляет около 2.5% от максимально возможного. При оценке достоверности вывода о синхронности изменения формы гистограмм в независимых броуновских генераторах достаточно воспользоваться мажорирую-

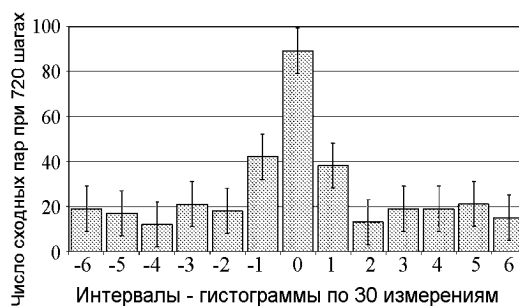


Рис. 6. Форма гистограмм в независимых броуновских генераторах изменяется синхронно. Распределение числа пар сходных гистограмм по разделяющим их интервалам времени. Гистограммы построены по 30 результатам измерений каждая. Ось абсцисс – величины интервалов времени, разделяющие сходные гистограммы. Один интервал равен $3.6 \cdot 10^{-3}$ с

шей оценкой по критерию \sqrt{N} (здесь N – распределение Пуассона). На рисунке видно, что высота центрального пика отличается от «фона» примерно на $6\sqrt{N}$, что соответствует вероятности случайного получения такого результата не выше $1 \cdot 10^{-11}$.

Как видно из рис. 5, гистограммы, образующие центральный пик на рис. 6 и свидетельствующие о синхронности изменений формы гистограмм в независимых процессах, не имеют явных отличий от гистограмм, соответствующих другим интервалам. Иными словами, нет определенной формы гистограмм, соответствующей именно синхронным изменениям их формы. Однако среди гистограмм, соответствующих центральному пику, есть несколько относительно редких, «экзотических» форм. Пары таких гистограмм могут быть использованы для дополнительной оценки достоверности основных выводов.

Подчеркнем, мы исходили из того, что реализация гистограммы сложной формы само по себе маловероятное событие. Одновременное появление редких событий в независимых измерениях еще менее вероятно. Эта оценка оказалась очень убедительной. Иллюстрация такой оценки дана на рис. 7 и в таблице. На рис. 7 изображены 5 пар гистограмм редкой формы, синхронно реализовавшихся в опыте от 24.09.2009. (Всего сходных синхронно пар было 89.) Мы видим, например, что гистограмм формы № 8 в первом массиве было 6, а во втором – 5 из 720 возможных. Это составляет, соответственно, 0,008 и 0,007 от максимальных величин, что и является оценками вероятности случайной реализации данной формы гистограммы именно на данном месте. Общая вероятность недостоверности утверждения о синхронном появлении сходных форм гистограмм в двух независимых рядах измерений равна произведению этих частных вероятностей. Для приведенного примера – пяти редких форм гистограмм – эта общая вероятность составляет, судя по первому

Таблица

Частота реализации гистограмм данной формы при измерениях в двух независимых броуновских генераторах в опыте от 24.09.2009

Номера синхронных гистограмм в двух массивах	N_1 – число таких гистограмм в первом массиве	$N_1/720$	N_2 – число таких гистограмм во втором массиве	$N_2/720$
8	6	0.008	5	0.007
59	1	0.001	3	0.004
232	4	0.006	6	0.008
294	17	0.024	7	0.010
457	2	0.003	13	0.018
		$P_1 = 3 \cdot 10^{-12}$		$P_2 = 4 \cdot 10^{-11}$

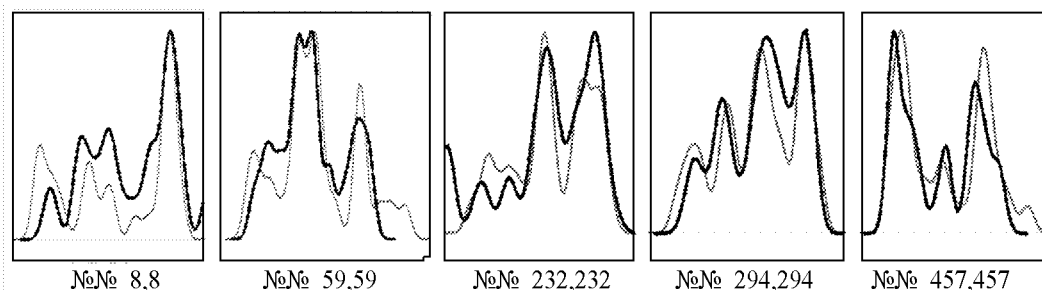


Рис. 7. Примеры сходства синхронных гистограмм редких форм, частота реализации которых представлена в таблице

массиву, $P_1 = 3 \cdot 10^{-12}$, а по второму $P_2 = 4 \cdot 10^{-11}$, то есть исчезающие малые величины. При этом следует иметь в виду, что число синхронных пар разных редких форм гистограмм существенно больше. Таким образом, достоверность утверждения о синхронности реализации сходных форм гистограмм в независимых броуновских генераторах доказывается оценкой двух видов.

4. Синхронность в разных географических пунктах

Свидетельством обусловленности изменения формы гистограмм вращением Земли вокруг своей оси является сходство формы гистограмм, получаемых при независимых измерениях в разных географических пунктах в одно и то же местное время. Ранее мы получили такие свидетельства в опытах с измерениями радиоактивности при почти максимально возможных расстояниях между лабораториями – при измерениях в Пушкино (Подмосковье, 54° с.ш. и 37° в.д.) и на станции Новолазаревская (Антарктида, 70° ю.ш. и 11.5° в.д.) – расстояние около 14000 км. В работах [6–9] при измерениях шумов в полупроводниковых схемах «эффект местного времени» был получен на расстоянии порядка 100 см. Мы осуществили аналогичные измерения с использованием броуновских генераторов.

На рис. 8 и 9 приведены результаты опытов поставленных 11.10.2009 в городе Реховот (Израиль, 31.89° с.ш. и 34.80° в.д.). Два броуновских генератора, разнесен-

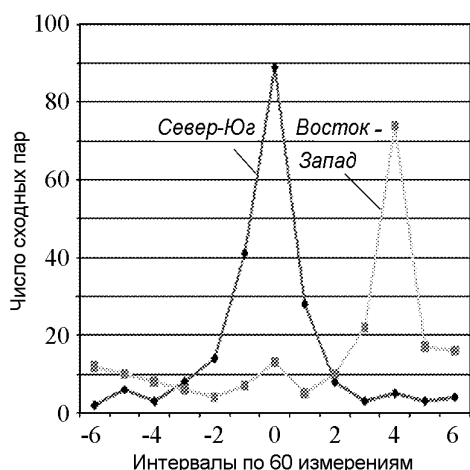


Рис. 8. Распределения по интервалам числа сходных пар гистограмм, построенных по результатам 60 измерений в двух независимых броуновских генераторах, находящихся на расстоянии 200 см в Северном полушарии. Сходные гистограммы при расположении по меридиану реализуются в двух генераторах одновременно. При расположении по параллели сходные гистограммы в западном генераторе реализуются на 4 интервала (11.6 мс) позже их реализации в восточном генераторе

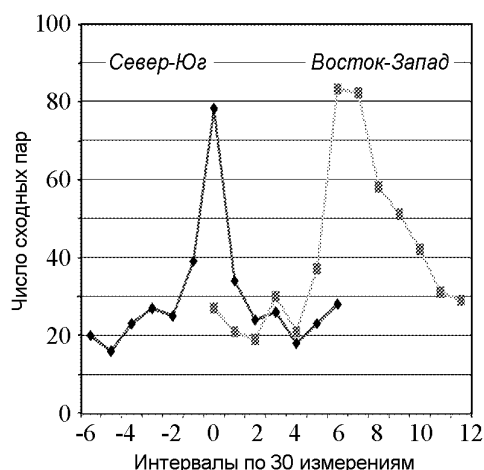


Рис. 9. Распределения по интервалам числа сходных пар гистограмм, построенных по результатам 30 измерений в двух независимых броуновских генераторах, находящихся на расстоянии 200 см в Северном полушарии. Синхронность по местному времени еще более четко проявляется при построении гистограмм по результатам 30 измерений. При расположении независимых генераторов по меридиану сходные гистограммы реализуются одновременно. При расположении по параллели гистограммы при измерениях с западным генератором появляются на 7–8 интервалов позже их появления в восточном генераторе

ные на расстояние $\Delta L = 200$ см, ориентировались сначала по меридиану, затем по параллели. Сигналы записывались в течение 4 мин. Задержка местного времени для указанной широты при ориентации базы Восток–Запад составляет $\Delta T = \Delta L/V$ с, где $V \approx 2\pi \cdot 6378000 \cos(31.89\pi/180)/86400$ м/с – скорость точки с указанными координатами на поверхности Земли. При частоте выборки 42 кГц эта величина задержки соответствует 3.6 гистограммам, построенным по 60 точкам, и 7.1 гистограммам, построенным по 30 точкам. Как видно из приведенных рисунков, интервалы времени, где найдено наибольшее число сходных по форме гистограмм, близки рассчитанным.

Обсуждение

Исследование броуновского движения методом динамического рассеяния света показало, что тонкая структура распределений амплитуд флуктуаций скоростей броуновских частиц (формы соответствующих гистограмм) меняется синхронно по местному времени. То есть броуновскому движению свойственны те же закономерности, что обнаружены ранее при исследовании стохастических процессов другой природы, а именно, химических реакций, тепловых флуктуаций в резисторах, радиоактивного распада и др. Таким образом, сходные закономерности проявляются в процессах, в которых диапазон изменений энергии различается на много порядков [11, 12]. Единственным общим для них остается их осуществление в одном и том же пространстве-времени. Из этого обстоятельства был сделан вывод, в соответствии с которым наблюдаемые закономерности объясняются флуктуациями пространства-времени, обусловленными, в свою очередь, движением Земли в неоднородном гравитационном поле [1–3].

Мы благодарны профессору П.С. Ланде, за весьма ценное обсуждение и ее трактовку представленных результатов [13]. Мы благодарны заведующему кафедрой биофизики Физического факультета МГУ профессору В.А. Твердислову и сотруднику Лаборатории физической биохимии Института теоретической и экспериментальной биофизики РАН профессору Д.П. Харакозу за весьма ценное обсуждение. Мы чрезвычайно признательны Анне Андреевне Андреевой, выполнившей работу «второго независимого эксперта» при сравнении гистограмм в этом исследовании.

Библиографический список

1. *Шноль С.Э.* Космофизические факторы в случайных процессах / Ред. Д.Д. Рабунский. Stockholm: Svenska Fisikarkivat, 2009.
http://www.ptep-online.com/index_files/books.html
<http://sfa.ptep-online.com/>
2. *Панчелюга В.А., Коломбет В.А., Каминский А.В., Панчелюга М.С., Шноль С.Э.* Эффект местного времени в шумовых процессах // Вестник Калужского университета. 2006. № 2. С. 3.
3. *Shnoll S.E. and Rubinstein I.A.* Regular changes in the fine structure of histograms revealed in the experiments with collimators which isolate beams of alpha-particles flying at certain directions // Progress in Physics. 2009. Vol. 2, № 4. P. 83.

4. *Goldburg W.I.* Dynamic light scattering // *Am. J. Phys.* 1999. Vol. 67, № 12.
5. *Beran J.* Statistics for long-memory processes. New York: Chapman & Hall, 1994.
6. *Schroeder M.* Fractals, chaos, power laws. Minutes from Infinite Paradise. New York: W.H. Freeman and Company, 1991.
7. *Panchelyuga V.A., Kolombet V.A., Pancheluga M.S., and Shnoll S.E.* Local-time effect on small space-time scale // *Space-Time Structure collected papers*. M.: Tetru, 2006. P. 344.
8. *Panchelyuga V.A., Kolombet V.A., Pancheluga M.S., and Shnoll S.E.* Experimental investigation of the existence of a local-time effect on the laboratory scale and the heterogeneity of space-time // *Progress in Physics*. 2007. Vol. 1, № 1. P. 64.
9. *Kaminsky A.V., Shnoll S.E.* The study of synchronous (by local time) changes of the statistical properties of thermal noise and alpha-activity fluctuations of a 239-Pu sample. <http://arxiv.org/abs/physics/0605056>.
10. *Shnoll S.E.* The «scattering of the results of measurements» of processes of diverse nature is determined by the Earth's motion in the inhomogeneous space-time continuum. The effect of «half-year palindromes» // *Progress in Physics*. 2009. Vol. 1. P. 3.
11. *Mandelbrot B.B., van Ness J.W.* Fractional Brownian motion, fractional noises and applications // *SIAM Review*. 1968. Vol. 10, № 4. P. 422.
12. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
13. *Ланда П.С., Власов В.А.* Аналитическое рассмотрение влияния космических факторов на функции скоростей броуновских частиц // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2011. Т. 19, № 2 (в печати).

Elfi-tech Ltd. Rehovot, Israel
Московский госуниверситет
ИТЭБ РАН, Пуццино
Пуцинский госуниверситет

Поступила в редакцию 26.01.2010

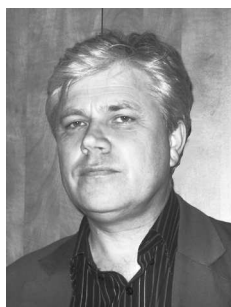
COSMOPHYSICAL FACTORS IN THE FLUCTUATIONS AMPLITUDE SPECTRUM OF BROWNIAN MOTION

A.V. Kaminsky, S.E. Shnoll

Phenomenon of the regular variability of the fine structure of the fluctuation in the amplitude distributions (shapes of related histograms) for the case of Brownian motion was investigated. We took an advantage of the dynamic light scattering method to get a stochastically fluctuated signal determined by Brownian motion. Shape of the histograms is most likely to vary, synchronous, in two proximally located independent cells containing Brownian particles. The synchronism persists in the cells distant at 2 m from each other, and positioned meridionally. With a parallel-wise positioning of the cells, high probability

of the synchronous variation in the shape of the histograms by local time has been observed. This result meets the previous conclusion about the dependency of histogram shapes («fluctuation amplitudes» of the spectra of stochastic processes) upon rotation of the Earth.

Keyword: Cosmophysical factors, fluctuation of Brownian motion.



Каминский Александр Викторович – родился в 1957 году в Тбилиси. Окончил Тбилисский государственный университет (1979). После окончания учебы работал в области нелинейной химической кинетики и лазерного разделения изотопов. В настоящее время является сотрудником компании Elfi-tech Ltd. (Израиль), работающей в области биомедицинской физики. Автор более 30 научных статей.

Elfi-tech Ltd., Rekhovot, Israel
E-mail: kaminskii@gmail.com



Шноль Симон Эльевич – родился в 1930 году в Москве. Окончил Московский государственный университет (1951). Работает в качестве главного научного сотрудника в Институте теоретической и экспериментальной биофизики РАН и в качестве профессора кафедры биофизики физического факультета МГУ. Диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук (1957) и доктора биологических наук (1970) посвящены исследованиям колебательных режимов и флуктуаций скоростей биохимических и физико-химических реакций. Автор около 250 статей и 5 книг, в том числе книги «Космофизические факторы в случайных процессах».

119992 Москва
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
142290 Пущино Московской обл.
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
E-mail: shnoll@mail.ru