Электромагнитные волны и электронные системы. 2004, т.9, № 5.

**УДК 550.3+551.24**

# АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ GPS

***В.С.Захаров***

**Введение**. Данные Глобальной системы позиционирования (Global Positional System - GPS) в последнее десятилетие всё более широко используются в различных областях науки и техники, в том числе в науках о Земле. Так, в геодинамике они позволяют определить "мгновенные" (т.е. усредненные за относительно небольшой период наблюдений) относительные смещения и скорости движения литосферных плит и блоков, которые достигают нескольких десятков миллиметров в год. Эти результаты являются инструментальным подтверждением важных положений тектоники литосферных плит. На рисунке 1 представлены измеренные горизонтальные скорости, по [15], для 19 пунктов GPS, используемых при анализе в данной работе. Скорости GPS сопоставляются со скоростями, полученными по геологическим данным, и используются во множестве геодинамических реконструкций и моделей. [10, 15]. Важную информацию несут также данные о вертикальных движениях блоков [14].

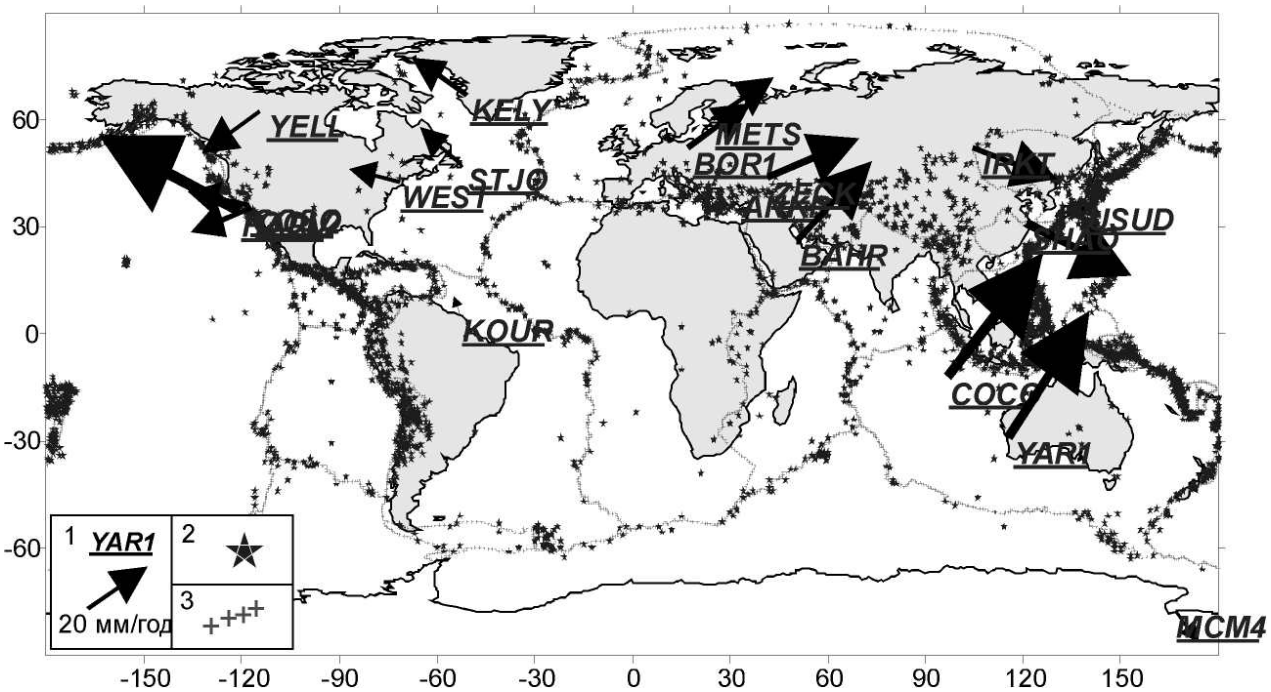


**Рисунок 1.** Расположение анализируемых пунктов GPS и скорости их горизонтального движения. 1 - названия пунктов и их скорости; 2 - эпицентры землетрясений по данным каталога PDE; 3 - границы литосферных плит, по [13].

Однако, помимо глобальных характеристик, из записей временных рядов GPS можно получить информацию о динамических свойствах системы земной коры. На рисунке 2а представлен временной ряд ежедневных смещений участков земной поверхности (широтная, долготная и вертикальная компоненты) для пункта YELL (Сев.Америка) за 1992-2003 гг. (по данным http://sopac.ucsd.edu). На графиках хорошо виден общий тренд, по которому вычисляются скорости для геодинамических исследований, и сезонные вариации. Кроме этого видны значительные колебания, имеющие хаотический, "шумовой" вид. На рисунке 2б, где представлен трехмерная картина смещений этого же пункта, видно, что движение земной поверхности носит весьма сложный пространственный характер.

Целью настоящей работы является определение динамических характеристик системы, генерирующей эти колебания, на основе фрактального анализа временных рядов GPS, а также построение модели, порождающей поведение с подобными характеристиками.

**Подход к проблеме.** В последнее время активно развивается теория динамических систем и фрактальных множеств [11, 12]. При анализе наблюдаемой динамики изменения некоторых измеренных величин во времени достаточно сложно сказать, к какому классу принадлежит данная система. Для анализа временных последовательностей разработаны и успешно применяются различные методы (спектральный анализ, анализ тренда, исследование Марковских цепей, wavelet анализ и т.д.).

Анализу временных рядов в науках о Земле посвящено немало работ, в том числе анализу с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств [1, 7, 15]. В них убедительно показано, что в "шумовой" составляющей, которая раньше отбрасывалось как ненужная или даже вредная, содержится весьма важная информация о процессе, а именно: каким образом сложно построенная нелинейная дискретная геологическая среда реагирует на внешние воздействия, т.е. её динамические характеристики.

Очень часто наблюдаемые последовательности могут быть отождествлены с фликкер-шумом ($1/f$ шум), который весьма распространен в природных системах, в том числе геолого-геофизических (конвекция Бенара, изменения уровня реки скорости водного потока, вариации солнечной активности, электрометрические и сейсмологические характеристики и т.д.) [7, 11, 16] . В настоящей работе анализируются свойства самоподобия временных рядов GPS: проводится анализ корреляционной размерности, определяются структура спектра, фрактальная размерность и показатель Херста (R/S анализ).

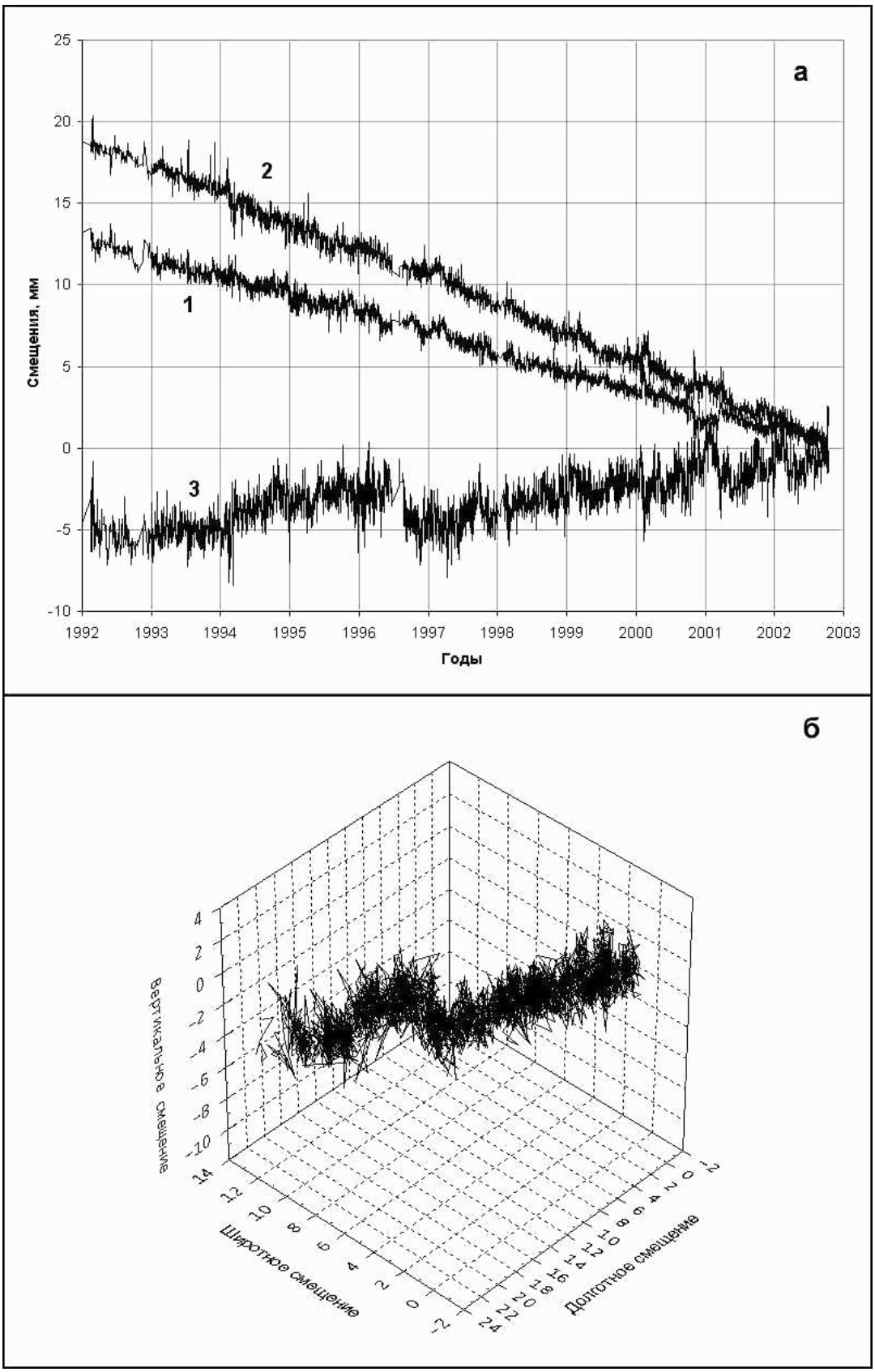


**Рисунок 2.** Смещения земной поверхности по данным GPS для пункта YELL (С.Америка). (а) ряды ежедневных измерений трех компонент смещений (1 - вертикальная, 2 - долготная и 3 - широтная компоненты); (б) трехмерная картина смещений этого пункта. Величина смещения дана в мм.

**Восстановление размерности вложения на основании анализа корреляционной размерности.** Одной из методик, направленных на решение поставленной задачи, является восстановление размерности вложения m**,** которая соответствует числу независимых переменных, однозначно определяющее установившееся движение динамической системы, на основании вычисления корреляционной размерности $D_c$ фазового портрета системы [1, 12, 16]. Алгоритм расчёта $D_c$ основан на вычислении корреляционного интеграла, в качестве которого выступает функция *C(r))*, для каждого *r* равная нормированному числу пар точек рассматриваемого множества (объекта), расстояние между которыми не превосходит *r* :

$$C(r) = \frac{1}{n^2} \sum \boldsymbol{H}\left(s - \left|y_i - y_j\right|\right) \qquad (1)$$

для всех пар значений *i* и *j*, если $i \neq j$. Здесь $|y_i - y_j|$ - абсолютная величина расстояния между точками множества, *i*, *j* = 1,2,3,...,n, где n - количество точек,

$$H(x) = \begin{cases} 0, x \le 0 \\ 1, x > 0 \end{cases}$$ - функция Хевисайда.

Величина суммы зависит от s, причем $C(r) \sim r^{-Dc}$, где $D_c$ - корреляционная размерность.

Существует методика - алгоритм Гроссбергера и Прокачча , - позволяющая восстановить некоторые свойства аттрактора (например, m и $D_c$) по временной последовательности одной из составляющих *X(t)*. Методика основана на построении псевдо-аттрактора, где в качестве компонент вектора служит сама измеренная последовательность, но взятая с некоторой временной задержкой $\mathbf{X_p}(t) = \{X(t), X(t+\tau), X(t+2\tau)\ldots, X(t+(m-1)\tau)\}$. Последовательно добавляя компоненты псевдовектора $\mathbf{X_p}(t)$ и при каждом m = 2,3,… вычисляют корреляционную размерность $D_c(m)$. Размерность m в пространстве, начиная с которой $D_c$ перестаёт изменяться, есть минимальная размерность вложения, т.е. наименьшая целая размерность пространства, содержащего весь аттрактор.

**Методика анализа самоподобных свойств временных рядов**. Подробно методика анализа самоподобных свойств временных рядов геофизических данных описана в [7]. Исходный временной ряд первоначально подвергается обработке, направленной на удаление регулярных составляющих (тренда и т.д.), которые полагаются вызванными внешними по отношению к рассматриваемой системе причинами. Оставшиеся после этой процедуры вариации временного ряда вызваны внутренней динамикой исследуемой геодинамической системы, а не только ошибками измерения. Затем вычисляется спектральная мощность (СМ) исследуемого сигнала. Спектр

анализируется с целью определения области скейлинга, т.е. выявляется участок, на котором зависимость спектральной мощности $S(f)$ от частоты $f$ имеет вид

$$S(f)=a f^{-\beta},$$

где a - константа, или, при построении в двойном логарифмическом масштабе

$$\log S(f)= -\beta \log f + a.$$

Для определения параметра самоподобия β этот участок спектра аппроксимируется линейной функцией методом наименьших квадратов, тогда β - коэффициент в полученной зависимости.

Если значение β близко к 0, то исследуемый сигнал имеет "плоский", т.е. не зависящий от частоты спектр, который генерирует полностью случайная система (т.н. "белый", или гауссов шум). Белый шум означает отсутствие какой-либо связи между историей системы и ее состоянием в следующий момент (отсутствие "памяти"). Если же параметр  близок к 1, исследуемый временной ряд может быть отнесен к фликкер-шуму. Выявление в системе фликкер-шума указывает на наличие памяти, хотя и ограниченной во времени - система забывает своё прошлое, но не сразу. Спектральная структура фликкер-шума занимает промежуточное положение между белым шумом и упорядоченными колебаниями. Вообще, следует говорить об обобщенном шуме  типа $1/f^{\beta}$, где β может принимать различные, в том числе дробные значения. Иногда шум с $\beta=2$ называют "коричневым", с $\beta=1$ - "розовым", а при $\beta > 2$ - "черным" [11]. Чем больше β, тем большей памятью обладает генерирующая такой сигнал система (т.е. становится более детерминированной, предсказуемой).

Ещё одной часто используемой характеристикой самоподобия временного ряда является показатель Херста (Hu). Он вычисляется в результате анализа соотношения R/S (R/S - анализ) [7, 16]. Здесь R - "размах" временного ряда - разность наибольшего и наименьшего накопленного отклонения от текущего среднего (на данном интервале времени τ); S - стандартное отклонение ряда на том же интервале. Установлено, что для многих природных процессов устойчиво выполняется соотношение $R/S \sim \tau^{Hu}$ , где Hu - показатель Херста. Методика вычисления показателя Hu по зависимости R/S от τ аналогична описанной выше для определения скейлингового параметра β для спектра. Значения показателя Херста позволяют отличить в ременные зависимости, обладающие устойчивой тенденцией (персистентность), при $Hu > 0.5$ , от тех, которые характеризуются отсутствием устойчивости (антиперсистентность), при $Hu < 0.5$.

Временные ряды, характеризующиеся самоподобием, обычно сопоставляют с обобщенным броуновским движением $B_h(t)$ [7, 11, 16], для которого выполняется соотношение

$$<(B_h(t) - B_h(t_o))^2> \sim (t-t_o)^{2h},$$

где h - скейлинговый параметр ряда, < > означает усреднение. Из анализа броуновских функций получены соотношения, связывающие значения скейлингового параметра β для спектра ряда с величиной скейлингового параметра h и фрактальной размерности D самого временного ряда, а также показателя Херста Hu [16]:

$$\beta \approx 2Hu - 1 \text{ при } -1 < \beta < 1;\ Hu \approx 0 \text{ при } \beta < -1;\ Hu \approx 1 \text{ при } \beta > 1; \quad (2)$$

$$\beta \approx 2h + 1 \text{ при } 1 < \beta < 3;\ h \approx 0 \text{ при } \beta < 1;\ h \approx 1 \text{ при } \beta > 3; \quad (3)$$

$$D = 2 - h \text{ или } D \approx (5- \beta)/2 \text{ при } 1<\beta <3. \quad (4)$$

В [7] приводится уточненное соотношение

$$D = 2.28 - 0.38\ \beta \text{ (при } 0.5<\beta <3), \quad (5)$$

основанное на численных экспериментах.

Следует отметить, что говорить о фрактальной размерности временного ряда следует с некоторой оговоркой, поскольку, строго говоря, временной ряд отличается от множества точек (для которого сформулировано понятие фрактальной размерности) тем, что координаты по различным осям неравноправны (в данном случае - смещение $X(t)$ и время $t$).

**Результаты анализа.** Изложенные выше методики были применены при анализе временных смещений земной поверхности по данным GPS для различных точек наблюдения (http://sopac.ucsd.edu). Выбор данных точек определялся, во-первых, наибольшей длиной анализируемых рядов, а во-вторых, желанием проанализировать точки, относящиеся к разным континентам и геодинамическим обстановкам: принадлежность пунктов наблюдения к сейсмическим или асейсмическим регионам, близость к границам плит и т.д. (см. рисунок 1). Все исследуемые временные ряды имеют схожий характер (рисунок 2) - в них присутствует значительная хаотическая компонента.

Спектральный анализ проводился при помощи пакета STATISTICA, вычисление фрактальной размерности D и анализ корреляционной размерности $D_c(m)$ проводилось при помощи авторского программного обеспечения, при вычислении показателя Херста Hu использовалась свободно распространяемая программа Fractan 4.2 (автор В.В.Сычев, http://impb.psn.ru/~sychyov/).

В работе [3] приведённая выше методика анализа корреляционной размерности $D_c$ применялась для вертикальных смещений земной поверхности по GPS измерениям.

Результаты, полученные для временных рядов различных пунктов, весьма схожи. Типичная зависимость $D_c(m)$ для радов GPS не достигается насыщения в рассмотренном диапазоне значений m (от 1 до 10), а близка к линейной, т.е. зависимости, характеризующей случайную систему.

Дальнейшая работа в этом направлении подтвердила этот результат: система, порождающая подобные смещения, является если и не случайной, то управляемой большим числом параметров. Более определённый вывод требует большей длины временного ряда.

На рисунке 3 представлены спектры, рассчитанные по рядам смещений для пункта YELL в двойном логарифмическом масштабе. На спектрах выявляется два различных участка: горизонтальный (высокочастотный), который свидетельствует о наличии "белого" шума, и линейно падающий (область скейлинга) в области более низких частот, который является признаком самоподобия процесса в данном диапазоне.

Результаты анализа для всех пунктов представлены в таблице 1 [4]. Здесь приведены фрактальные характеристики рядов GPS и модельных рядов: рассчитанные независимыми методами спектральный скейлинговый параметр $\beta$, фрактальная размерность D и показатель Херста Hu. При аппроксимации области скейлинга прямой (в двойном логарифмическом масштабе) вычислялись коэффициент корреляции r и статистическая значимость по критерию Стьюдента St. Значения $R > 0.8$ и $St > 10$ подтверждают статистическую достоверность полученных характеристик. Стандартные ошибки параметров: $\delta_\beta \le 0.1$, $\delta_{Hu} \le 0.3$, $\delta_D \le 0.3$.

Кроме рядов GPS в работе анализировались модельные (синтезированные) ряды: гауссов (белый) шум, обобщенные (дробные) броуновские функции с параметрами самоподобия $h = 0$ и $h = 0.25$, а также ряд движений блоков земной коры, полученные в модели NLO (см. ниже) [5, 2], результаты представлены в нижней части таблицы.

Анализ полученных результатов определенно показывает, что исследуемые временные ряды GPS проявляют фрактальные свойства в диапазоне более чем один порядок по частоте ($\sim 10^{-3} \div 3\cdot10^{-1}$ 1/сут.). По своим характеристикам они сходны не с гауссовым шумом (хотя он также присутствует, что выявляется по горизонтальному участку спектра), а с обобщенными броуновскими функциями. Поскольку значения $\beta$, D и Hu рассчитаны независимо, они позволяют, в пределах ошибок, подтвердить обоснованность применения соотношений (2)-(5), полученных по модельным броуновским функциям, при оценке фрактальных характеристик природных временных рядов.

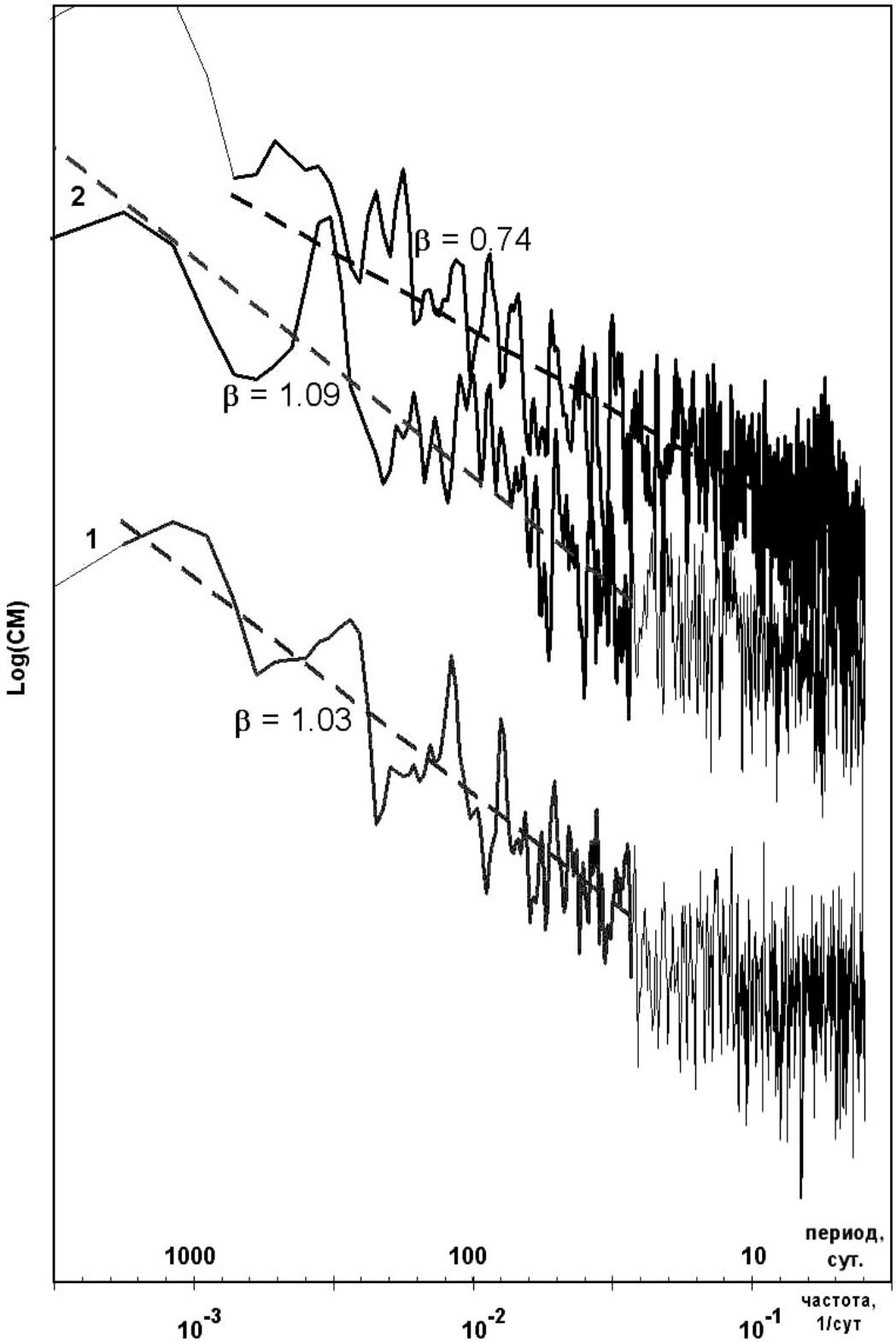


**Рисунок 3.** Зависимость спектральной мощности (СМ) от частоты в двойном логарифмическом масштабе для рядов, приведенных на рис.2 (1 - для вертикальной, 2 - для долготной и 3 - для широтной компоненты). Для наглядности графики спектров смещены по вертикальной оси. Область скейлинга аппроксимирована линейной зависимостью, рядом приведены значения скейлингового параметра β.

Вычисленные количественные характеристики самоподобия (близость значений параметра самоподобия β к 1) указывают на то, что эти ряды относятся к классу фликкер-шума (шум мерцания, или перемежаемости). Это означает, что система, генерирующая такие сигналы, не является полностью случайной (стохастической), а характеризуется определенной степенью детерминированности и наличием "памяти" о предыдущих состояниях - тем большей, чем больше β или Hu (или чем меньше фрактальная размерность D). Близость значений показателя Херста Hu к 1 указывает на персистентность изучаемых движений.

Такие динамические процессы изучаются в теории детерминированного хаоса. В настоящее время существуют различные модели систем, генерирующих фликкер-шум. Одной из таких моделей является самоорганизованная критичность (СОК) [1, 7, 16]. Возможно также возникновение фликкер-шума в системе, на которую воздействует большое количество периодических процессов со случайными амплитудами и фазами.

Ещё один важный класс моделей порождающих фликкер-шум - модели, в которых перемежаемость обусловлена нелинейным характером взаимодействия элементов внутри системы, из-за которого её отклик даже на неизменное воздействие становится весьма сложным, с хаотично распределёнными всплесками.

В работах [5, 2] предложена модель блоковой динамики в предгорных зонах NLO, которая включает нелинейное ("сухое") трение.

**Модель блоковой динамики NLO.** Одной из основных особенностей пространственного распределения современных вертикальных движений земной поверхности больших территорий является неоднородность: можно выделить области (блоки) относительно однородных движений, разделённые протяжёнными узкими зонами аномально высоких градиентов движений (разломы). Сопоставление с геофизическими данными (аномалии силы тяжести, данными глубинного сейсмического зондирования и т.д.) позволяет установить пространственное совпадение выделяемых различными методами блоков и разделяющих их разломных зон [8].

Так, анализ измерений современных вертикальных движений в предгорных зонах указывает на их контрастно-неоднородный характер. Чередование поднятий и опусканий блоков в различные эпохи измерений происходит по-разному. Наряду с периодами относительно однородного деформирования есть периоды, когда общая картина распадается на отдельные активизированные элементы. При этом отдельные зоны ведут себя достаточно автономно: для некоторых выявляется временной тренд, для других он отсутствует.

Одним из наиболее существенных выводов, сделанных в [8], является вывод о том, что локальная компонента движений не определяется приложенным региональным полем напряжений, характерным для конкретных геодинамических обстановок осадочных бассейнов. Источником современных знакопеременных вертикальных движений земной поверхности в зонах разломов осадочных бассейнов являются процессы, имеющие автоколебательный характер [6]. При этом большое значение имеют свойства самой среды в разломных зонах. Всё это является отражением процессов самоорганизации в открытой геодинамической системе, которая перерабатывает поступающую энергию.

Для описания блоковой динамики в предгорных зонах предлагается следующая модель. Характерная для этих зон раздробленность объясняется коллизионным взаимодействием жестких плит, когда при достижении предела прочности происходит хрупкое разрушение коры (или её верхних слоёв). Субвертикальные разломы раздробляют верхний коровый слой на отдельные блоки, которые, будучи относительно слабо связанными друг с другом (в основном силами трения), «плавают» на вязком основании – нижней коре, находясь в состоянии, близком к равновесию. Наименьшие размеры блоков (до 10 км) относятся к зоне наибольших напряжений, где сосредоточены основные деформации, т.е. к коллизионному поднятию. Области, примыкающие к этой зоне, расчленяются на более крупные блоки разломами - сдвигами под некоторым углом к оси орогена. Эти блоки связаны с краем плиты и представляют собой своеобразные «клавиши» (рисунок 4а). В динамике таких блоков, помимо сил трения и плавучести, значительную роль играют силы упругости, возникающие при их изгибе. Область блоков, соответствующая области предгорных прогибов, отделяется разломами от орогена. Воздымающийся (вследствие нагнетания нижнекорового материала) ороген за счет сил трения передает свое вертикальное движение соседним блокам. Они также начинают подниматься, однако из-за сложной структуры, а также из-за нелинейности сил трения, характер движения получается весьма сложным.

Для исследования характерных особенностей динамики системы построим следующую модель. Рассмотрим линейную цепочку N жестких блоков (рисунок 4б), имеющих массу $m_i$ (i – номер блока) плотности $\rho_1$, плавающих в вязкой жидкости (вязкость $\eta$) плотностью $\rho_2$ ($\rho_1<\rho_2$). Полагаем, что каждый блок прикреплен к пружине жесткостью $k_i$ (что соответствует упругости, характеризующей каждую “клавишу”), таким образом, что в состоянии гидростатического равновесия пружина не растянута. Каждый блок соприкасается с соседними боковыми поверхностями , а сцепление обеспечивается силой трения. Все блоки соприкасаются и взаимодействуют силами трения с одним

общим ведущим блоком, соответствующему воздымающемуся горному сооружению, который двигается вертикально со скоростью $U_o$. Таким образом, предлагаемая модель описывает поведение автоколебательной системы, в которую энергия поступает от процессов большего масштаба.

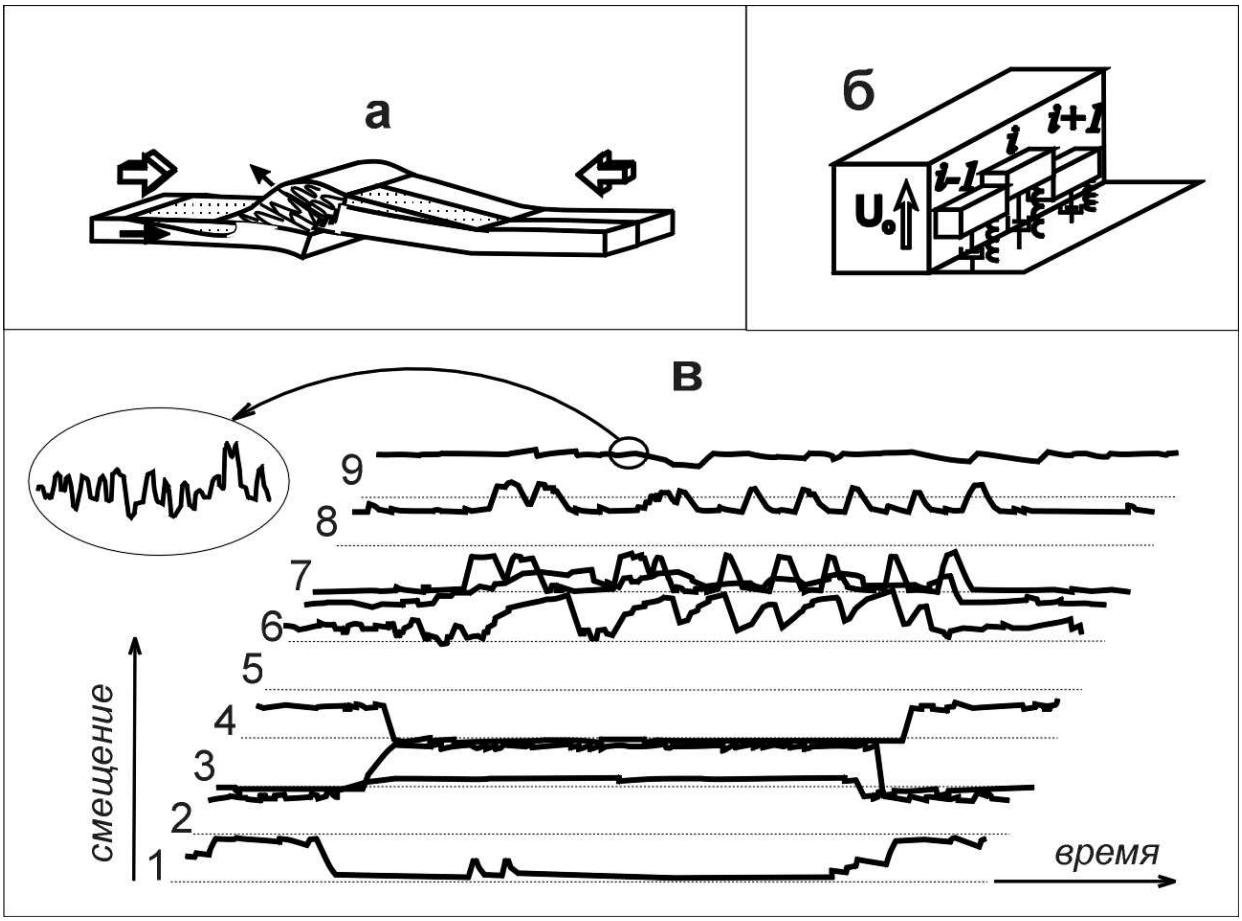


**Рисунок 4.** Модели блоковой динамики NLO [5, 2]. (а) Принципиальная схема динамики предгорных зон; (б) Модель блоковой структуры; (в) Результаты моделирования динамики системы 9 блоков.

Динамика каждого блока определяется балансом действующих на него силы тяжести, силы Архимеда, силы упругости, сил трения со стороны соседних и ведущего блоков, силы вязкого сопротивления. Уравнения, описывающее движение блоков имеют вид:

$$m_i x_i^{//} = - k_i x_i + F_{Ai} - m_i g - F_i - F_{i-1} - F_{i+1} - C v_i ,$$

где $x_i$ – вертикальное смещение i-го блока (i = 1,…,N) относительно положения равновесия, $v_i$ – его скорость, $C$ – коэффициент вязкого сопротивления, $F_{Ai}$ - архимедова сила, $F_i$ , $F_{i-1}$ , $F_{i+1}$ – силы “сухого” трения, действующие на i -й блок со стороны ведущего блока, левого и правого соседей соответственно, двумя штрихами обозначена вторая производная по времени. Особенность "сухого" трения в том, что зависимость коэффициента трения от скорости является нелинейной. При относительной скорости,

равной нулю, коэффициент трения принимает любое значение от нуля до некоторого максимального значения. При малых значениях относительной скорости коэффициент трения уменьшается при увеличении скорости, затем становится постоянным, а при дальнейшем увеличении скорости может снова возрастать.

В результате численного решения системы получены функции изменения смещений и скоростей для каждого из блоков с течением времени. На рисунке 4в приведены временные развертки для смещений $x_i(t)$. для набора из 9 блоков. Рассматриваемая система участвует в довольно сложном колебательном движении, где наряду с осцилляциями, определяемыми собственной частотой каждого блока (видны на увеличенном участке графика), возникают непериодические колебания со значительно большим (до нескольких порядков) характерным временем. Поведение отдельных блоков обнаруживает колебания вокруг одного, двух, иногда трех положений равновесия, перескоки между которыми разделены различными промежутками времени. В такой системе отдельные блоки, участвуя в общем процессе переработки поступающей энергии, могут вести себя то коллективно, то относительно независимо: соседние блоки могут участвовать в «перескоках» и в одинаковом, и в противоположных направлениях.

В целом в поведении системы, при абсолютно точном задании всех параметров, обнаруживаются элементы хаоса (детерминированный хаос). Сходная по виду картина наблюдается и при некотором разбросе параметров. Однако любое малое изменение параметров скорости и трения приводит к тому, что поведение каждого блока может измениться (т.е. моменты «перескоков» становятся другими), но при этом сохраняется общий режим.

Спектры, рассчитанные по рядам смещений блоков, обнаруживают свойства самоподобия. Скейлинговый параметр спектра β варьируется от 1 до 2, результаты приведены в нижней части таблицы 1. Таким образом, модель NLO, при неизменном воздействии генерирует последовательность смещений блоков, которая имеет характер фликкер-шума. Следует отметить, что для разных модельных реализаций значения вычисляемых характеристик имеют некоторый разброс.

**Выводы и обсуждение**. Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что "шумовая", "хаотическая" компонента в исследуемых рядах GPS, в значительной степени не является вредной, подлежащей удалению. Напротив, она несёт весьма ценную информацию о характеристиках системы земной коры, генерирующей такие сложные блоковые движения.

Выявление фликкер-шумовой компоненты позволяет отнести эту систему к типу детерминировано-хаотических. Динамика систем с такими характеристиками предполагает, что на фоне относительно небольших изменений происходят значительные (не порядок большие) всплески. При этом величина этих выбросов и промежутки времени, их разделяющие, нерегулярны и не могут быть предсказаны. Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать вывод, что, анализ и прогноз (землетрясения, сильные движения и т.д.) в сейсмотектонических и геодинамических системах должен осуществляться адекватными методами, которые разрабатываются в теории динамических систем и фракталов.

На основании того набора точек, который использован в настоящем исследовании, не удаётся выявить какую-либо связь между полученными фрактальными характеристиками и геодинамическими характеристиками. Возможно, это является следствием недостаточного количества анализируемых пунктов. Однако, возможно, что здесь проявляется некоторая глобальная закономерность - дискретная система земной коры повсеместно таким образом (самоподобно) перерабатывает поступающую энергию.

Интересно отметить, что размах и динамические характеристики хаотической компоненты колебаний примерно одинаковы для вертикальной и горизонтальных компонент смещения. Контрастный знакопеременный характер вертикальных движений значительной интенсивности выявлен достаточно давно по "обычным" (повторные нивелировки и др.) геодезическим измерениям [6, 8], а для горизонтальных движений обычно отмечается именно их направленный характер [10]. Однако анализ рядов GPS-измерений, проведенный в нашей работе показывает, что контрастность и осциллирующий характер движений проявляется также и для горизонтальной компоненте.

Предложенная в данной работе модель блоковой динамики NLO демонстрирует сходные динамические характеристики, в ней также происходят спонтанные непредсказуемые перескоки и всплески. Однако выбор конкретных моделей требует более детального анализа.

Автор глубоко признателен В.Н.Вадковскому за плодотворную дискуссию в ходе работы над статьей.

**Таблица 1. Фрактальные характеристики временных рядов смещений GPS и модельных функций.**

| Пункт | Длина ряда, дней | Литосферная плита | Широтное смещение | | | Долготное смещение | | | Вертикальное смещение | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | β | D | Hu | β | D | Hu | β | D | Hu |
| ANKR | 1946 | Anatol. | 1.25 | 1.89 | 1.13 | 1.05 | 1.89 | 1.14 | 0.97 | 1.94 | 1.23 |
| BAHR | 2048 | Arab. | 1.12 | 1.93 | 0.78 | 1.02 | 1.96 | 0.69 | 1.15 | 1.93 | 0.96 |
| BOR1 | 2716 | Eurasia | 0.82 | 1.97 | 0.95 | 1.06 | 1.95 | 1.16 | 0.93 | 1.97 | 0.93 |
| COCO | 1814 | India | 1.41 | 1.80 | 0.99 | 1.31 | 1.89 | 0.95 | 0.90 | 1.95 | 1.01 |
| COSO | 2070 | N.America | 1.40 | 1.87 | 1.17 | 1.39 | 1.84 | 1.25 | 1.36 | 1.86 | 1.04 |
| GOL2 | 2340 | N.America | 0.96 | 1.92 | 0.89 | 1.30 | 1.89 | 0.94 | 0.85 | 1.97 | 0.86 |
| HARV | 2296 | Nubia | 0.83 | 1.96 | 0.91 | 1.12 | 1.91 | 0.95 | 1.31 | 1.98 | 0.64 |
| IRKT | 2160 | Eurasia | 1.25 | 1.92 | 1.03 | 1.25 | 1.90 | 0.99 | 0.94 | 1.93 | 0.90 |
| KELY | 2036 | N.America | 0.79 | 1.97 | 1.04 | 0.86 | 1.97 | 0.70 | 1.08 | 1.95 | 0.89 |
| KOUR | 2690 | S.America | 1.15 | 1.95 | 1.08 | 0.70 | 2.00 | 0.86 | 0.92 | 1.98 | 0.84 |
| METS | 2468 | Eurasia | 0.76 | 2.00 | 0.69 | 1.09 | 1.99 | 0.90 | 1.09 | 1.96 | 0.96 |
| MCM4 | 3238 | Antarct | 0.49 | 1.98 | 0.85 | 0.78 | 1.98 | 0.72 | 0.90 | 1.96 | 1.16 |
| SHAO | 2262 | S.China | 1.02 | 1.94 | 1.11 | 1.09 | 1.95 | 0.97 | 1.09 | 1.95 | 0.67 |
| STJO | 3334 | N.America | 1.21 | 1.95 | 0.90 | 1.00 | 1.96 | 1.02 | 1.02 | 1.96 | 1.02 |
| USUD | 3142 | Okhotsk | 1.03 | 1.94 | 1.10 | 0.82 | 1.96 | 0.88 | 0.99 | 1.95 | 0.73 |
| WEST | 1730 | N.America | 1.25 | 1.94 | 0.95 | 1.07 | 1.96 | 1.05 | 0.98 | 1.96 | 0.85 |
| YAR1 | 3030 | Australia | 1.16 | 1.86 | 1.03 | 1.04 | 1.92 | 0.92 | 1.05 | 1.94 | 0.79 |
| YELL | 3574 | N.America | 1.03 | 1.93 | 0.68 | 1.09 | 1.95 | 0.64 | 0.74 | 1.93 | 1.15 |
| ZECK | 1434 | Eurasia | 1.15 | 1.98 | 0.62 | 1.02 | 1.97 | 0.82 | 1.06 | 1.95 | 0.80 |
| NLO | | модель | 0.92 | 1.93 | | 2.03 | 1.51 | | 1.84 | 1.58 | |
| Gauss | | гауссов "белый" шум | | | | -0.02 | | 0.51 | | | |
| BrM0 | | броуновская функция (h =0) | | | | 1.06 | 1.88 | 1 | | | |
| BrM25 | | броуновская функция (h =0.25) | | | | 1.50 | 1.71 | 1.01 | | | |

## Литература


1. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. М., ГЕОС, 2001, 312 с.
2. Захаров В. С. Модель блоковой динамики в предгорных зонах. // Современные процессы геотектоники. Сборник научных трудов. М., Научный мир, 2001, с.106-109.
3. Захаров В.С. Поиск детерминизма в наблюдаемых геолого-геофизических данных: анализ корреляционной размерности временных рядов. // Современные процессы геологии. М., Научный мир, 2002, с.184-187.
4. Захаров В.С. Анализ фрактальных характеристик временных рядов GPS. // Современные процессы геологии. Сборник научных трудов. М., Научный мир, 2003, с.147-151.
5. Короновский Н.В., Захаров В.С. Колебания блоков земной коры южного края Скифской плиты (северное Предкавказье), в связи с образованием передовых прогибов. // Материалы XXXIII тектонического совещания, М., 2000, с.232-235.
6. Кузьмин Ю.А. Современные геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений. // Прогноз землетрясений. 1989. №11. С.52-60.
7. Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М., ОИФЗ РАН, 1996, 210с.
8. Сидоров В.А., Кузьмин Ю.А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М. 1989. 183 с.
9. Федер . Фракталы. М., Мир, 1991.
10. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М., Изд-во МГУ, 1995, 480 с.
11. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Ижевск, 2001, 528 с.
12. Шустер Г. Детерминированный хаос. М., Мир, 1988.
13. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochem. Geophys. Geosyst., 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252, 2003.
14. Freymueller J. T., Fletcher H.J. Spatial variations in present-day deformation, Kenai Peninsula, Alaska, and their implications. // J.Geoph.Res., 2000, vol 105, № D4, pp.8070-8101.
15. Sella G.F., Dixon T.H., Mao A. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy. // J. Geophys. Res., 2002, vol.104, B4.
16. Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

УДК 550.3+551.24

# АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ GPS

***В.С.Захаров***

**Аннотация**. В работе анализируются временные ряды смещений земной поверхности, полученные по измерениям Глобальной системы позиционирования (GPS) в 19 пунктах, в которых выявляется хаотическая компонента. Применяются методы, разработанные в теории динамических систем и фрактальных множеств, для анализа этих временных последовательностей и определения их динамических характеристик. Анализируются самоподобные свойства временных рядов: корреляционная размерность, спектральный скейлинговый параметр, фрактальная размерность ряда и показатель Херста. Установлено, что исследуемые временные ряды GPS проявляют фрактальные свойства в диапазоне более чем один порядок по частоте (фликкер-шум). Предлагается модель блоковой динамики NLO, которая демонстрирует сложное поведение и имеет сходные динамические характеристики

# THE ANALYSIS of DYNAMIC CHARACTERISTICS of TIME SERIES OF DISPLACEMENT of the EARTH SURFACE ON GPS DATA

***V.S.Zakharov***

**Abstract**. We analyzed time series of displacement of the terrestrial surface, obtained on measurements of the Global Positional System (GPS) in 19 points in which the chaotic component was detect. We applied methods of the dynamic systems theory and fractal sets for the analysis of these time series and detection of their dynamic characteristics. The parameters we analyzed are: correlation dimension, spectral scaling parameter, fractal dimension and Hurst exponent. We detect that GPS time series have fractal properties in a range more than one order on frequency ($1/f$ noise). The model of block dynamics NLO is offered. This model demonstrates complicated behavior and has comparable dynamic characteristics.

**Захаров Владимир Сергеевич**
к.ф.-м.н., доцент кафедры динамической геологии Геологического ф-та МГУ им.Ломоносова,
Москва, Ленинские горы, 119992
т. (095) 939 25 51 (р.)
e-mail: zakharov@dynamo.geol.msu.ru

**Область научных интересов**: геодинамика, физика Земли, геофизика, моделирование, динамические системы, фракталы.