

УДК 550.3+551.24

В.С. Захаров¹**ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ GPS И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ РЕГИОНА**

Проанализирована шумовая компонента во временных рядах смещений земной поверхности, полученных по измерениям Глобальной системы позиционирования (GPS) в 19 пунктах. Применены методы, разработанные в теории динамических систем и фрактальных множеств. 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). Выявлена связь фрактальных характеристик исследуемых рядов с сейсмотектоническими особенностями районов, что находит объяснение в динамических характеристиках блоковых моделей и сейсмичности.

Ключевые слова: GPS, фрактальная размерность, спектральный анализ, показатель Херста, фликкер-шум, сейсмичность.

We analyzed the noise in time series of displacement of the terrestrial surface, obtained on measurements of the Global Positional System (GPS) in 19 points. We applied methods of the dynamic systems theory and fractal sets. 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 (flicker-noise). We detect the relation of fractal characteristics of the studied time series with seismotectonic features of the area, which is explained by the dynamic characteristics of the block models and seismicity.

Key words: GPS, fractal dimension, spectral analysis, Hurst exponent, flicker-noise, seismicity.

Введение. Данные Глобальной системы позиционирования (Global Positional System — GPS) в последнее время широко используются в разных областях науки и техники, в том числе в науках о Земле. Так, в геодинамике они позволяют определить «мгновенные» (т.е. усредненные за относительно небольшой, порядка нескольких лет, период наблюдений) относительные смещения и скорость движения литосферных плит и блоков, которые достигают нескольких десятков миллиметров в год. Эти результаты — инструментальное подтверждение важных положений тектоники литосферных плит. Значения скорости GPS сопоставляют со значениями, полученными по геологическим данным, и используют во множестве геодинамических реконструкций и моделей [Хаин, Ломизе, 2005; Sella et al., 2002]. Важную информацию несут также данные о вертикальных движениях блоков [Freymueller, Fletcher, 2000; Захаров, 2006].

Однако, помимо скоростей смещений, которые определяются по трендам во временных рядах измерений GPS, из записей этих временных рядов можно получить информацию о динамических свойствах системы земной коры. Для этого надо рассмотреть короткопериодное «дрожание», наложенное на общий тренд и сезонные колебания, и проанализировать его свойства [Захаров, 2004].

Аналізу временных рядов в науках о Земле посвящено немало работ, в том числе с позиции

теории динамических систем и фрактальных множеств [Горяинов, Иванюк, 2001; Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997]. В них убедительно показано, что в «шумовой» составляющей, которая раньше отбрасывалась как ненужная или даже вредная, содержится весьма важная информация о процессе, а именно то, каким образом сложно построенная нелинейная дискретная геологическая среда реагирует на внешние воздействия, т.е. ее динамические характеристики.

Очень часто наблюдаемые последовательности можно отождествить с фликкер-шумом ($1/f$ -шум), который весьма распространен в природных системах, в том числе геолого-геофизических. Примерами могут служить динамика характеристик конвекции Бенара (скорость течения и др.), изменения уровня реки, скорости водного потока, вариации солнечной активности, электрометрических и сейсмологических характеристик и т.д. [Лукк и др., 1996; Шредер, 2001; Turcotte, 1997].

В работах [Prawirodirdjo, Bock, 2004; Wang et al., 2012], а также в ряде других статей сделан вывод о том, что «дрожание» во временных рядах GPS лучше всего описывается комбинацией белого шума и фликкер-шума. В этих работах определение свойств шумовой составляющей нужно главным образом для того, чтобы наилучшим образом выделить тренды смещения, т.е. подобрать модель скорости.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. физ.-мат. н.; e-mail: vszakharov@yandex.ru

Цель работы — определение динамических характеристик шума во временных рядах GPS на основе фрактального анализа, а также сопоставление этих характеристик с геотектоническими и геодинамическими особенностями регионов.

Были проанализированы свойства самоподобия временных рядов GPS: корреляционная размерность, структура спектра, фрактальная размерность и показатель Херста (R/S -анализ).

Материалы исследований. В качестве исходных данных использованы ряды ежедневного смещения участков земной поверхности, полученные при обработке измерений GPS (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>) в ряде пунктов. Выбор этих пунктов определялся, во-первых, наибольшей длиной анализируемых рядов, а во-вторых, желанием проанализировать точки, относящиеся к разным континентам и геодинамическим обстановкам: принадлежность пунктов наблюдения к сейсмичным или асейсмичным регионам, близость к границам плит и т.д. На рис. 1 представлены измеренные значения горизонтальной скорости, по [Sella et al., 2002], для 19 пунктов GPS, использованных при анализе в данной работе.

На рис. 2, *a* представлен временной ряд ежедневных смещений участков земной поверхности (широтная, долготная и вертикальная компоненты) для пункта YELL (Сев. Америка) за 1992–2003 гг. На графиках хорошо виден общий тренд, по которому вычисляются значения скорости для геодинамических исследований, и сезонные вариации. Кроме того, видны значительные колебания, имеющие хаотический, «шумовой» вид. На рис. 2, *b*, *в*, где представлена трехмерная картина смещений этого же пункта, видно, что движение земной поверхности носит весьма сложный пространственный характер.

Все исследованные временные ряды имеют схожие особенности — в них присутствует значительный хаотический компонент. Для сопоставления положения пунктов GPS с сейсмичностью использован каталог землетрясений NEIC PDE (<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>).

Методика анализа самоподобных свойств временных рядов. Подробно методика анализа самоподобных свойств временных рядов геофизических данных описана в [Лукк и др., 1996]. Исходный временной ряд первоначально подвергается обработке, направленной на удаление регулярных составляющих (тренда и т.д.), полагают, что они вызваны внешними причинами по отношению к рассматриваемой системе. 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 от частоты f имеет вид

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

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

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

Если значение β близко к нулю, то исследуемый сигнал имеет «плоский», т.е. не зависящий от частоты, спектр, который генерирует полностью случайная система (так называемый 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

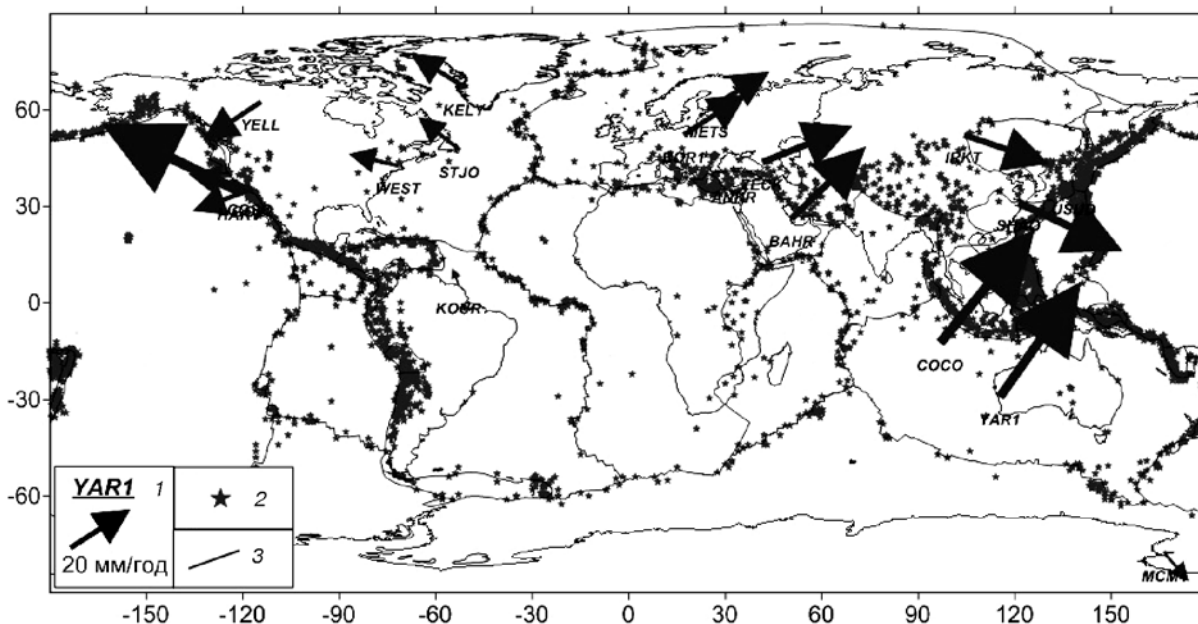


Рис. 1. Расположение анализируемых пунктов GPS и скорость их горизонтального движения: 1 — названия пунктов и их скорость; 2 — эпицентры землетрясений по данным каталога PDE; 3 — границы литосферных плит

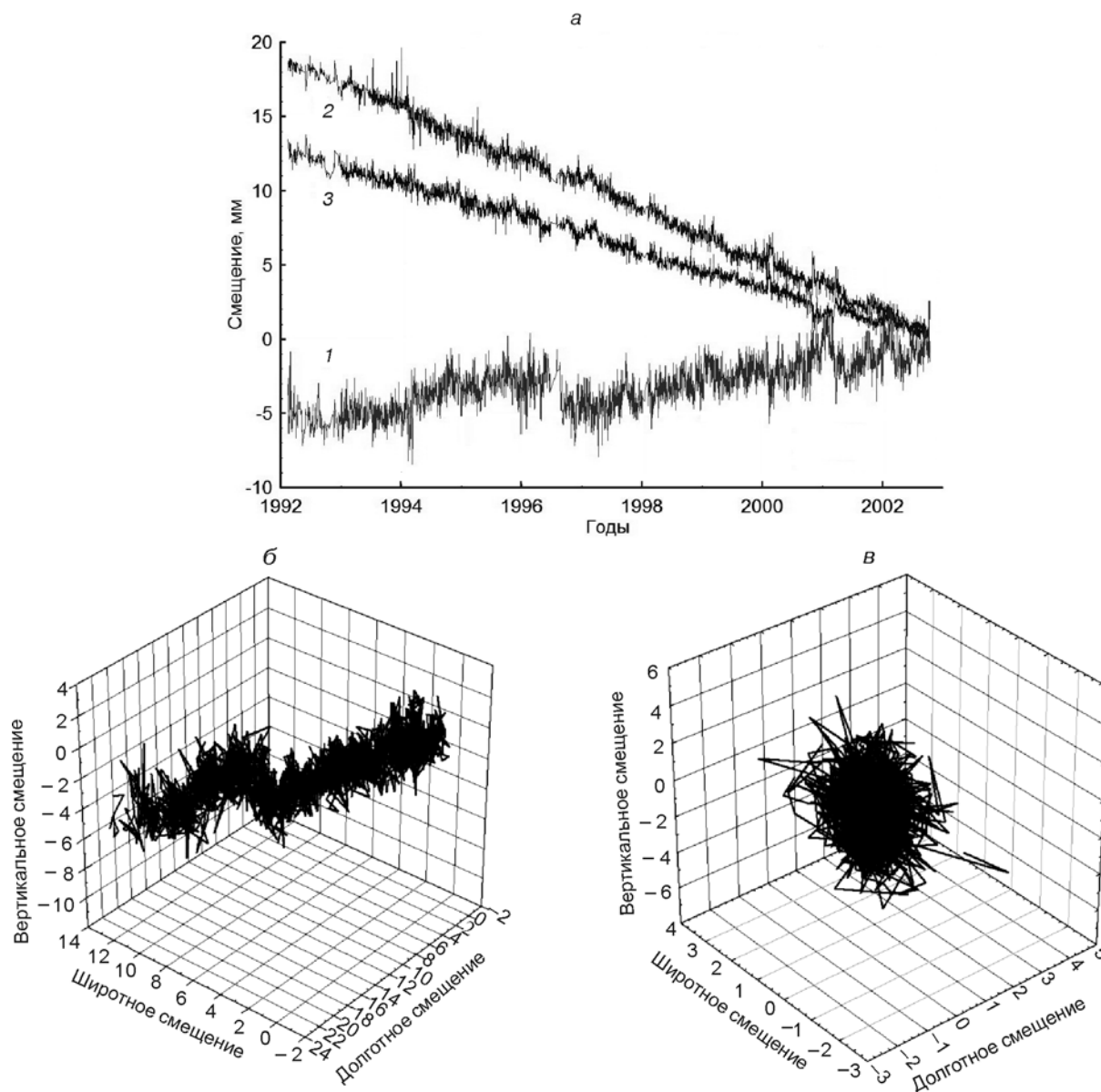


Рис. 2. Смещения земной поверхности по данным GPS для пункта YELL (Сев. Америка): а — ряды ежедневных измерений трех компонент смещений (1 — вертикальная, 2 — долготная, 3 — широтная компоненты); б — трехмерная картина смещений этого пункта; в — трехмерная картина смещений со снятым трендом. Величина смещения — в мм

к 1, исследуемый временной ряд можно отнести к фликкер-шуму. Выявление фликкер-шума в системе указывает на наличие памяти, хотя и ограниченной во времени, — система «забывает» свое 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 разные, в том числе дробные, значения. Иногда шум с $\beta = 2$ называют коричневым, с $\beta = 1$ — розовым, а при $\beta > 2$ — черным [Шредер, 2001]. Чем больше β , тем большей памятью обладает генерирующая такой сигнал система (т.е. становится более детерминированной, предсказуемой).

Еще одна часто используемая характеристика самоподобия временного ряда — показатель Херста (H). Он вычисляется в результате анализа соотношения

R/S [Лукк и др., 1996; Федер, 1991; Turcotte, 1997], здесь R — «размах» временного ряда, т.е. 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

$$R/S \sim \tau^H, \quad (1)$$

где H — показатель Херста. Методика вычисления показателя H по зависимости R/S от τ аналогична описанной выше для определения скейлингового параметра β для спектра. Значения показателя Херста позволяют отличить временные зависимости, обладающие устойчивой тенденцией к изменению (персистентностью) при $H > 0,5$, от тех, которые

характеризуются отсутствием устойчивости (антиперсистентностью) при $H < 0,5$.

Получены соотношения, связывающие значения скейлингового параметра β для спектра ряда с фрактальной размерностью (D) самого временного ряда, а также с показателем Херста (H) [Turcotte, 1997]:

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

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

В [Лукк и др., 1996] приводится уточненное соотношение

$$D = 2,28 - 0,38 \beta \text{ (при } 0,5 < \beta < 3), \quad (4)$$

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 разным осям неравноправны (в данном случае — смещение и время).

Изложенные выше методики были применены при анализе временных смещений земной поверх-

ности по данным GPS для разных точек наблюдения. Спектральный анализ проводился при помощи пакета STATISTICA, вычисление фрактальной размерности (D), показателя Херста (H) и анализ корреляционной размерности проводились при помощи авторского программного обеспечения FraTiS [Захаров, 2004].

Результаты анализа. На рис. 3 представлен пример спектров, рассчитанных по рядам смещений для пункта YELL в двойном логарифмическом масштабе. На спектрах видны два 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.

Для всех остальных проанализированных временных рядов результаты были аналогичны, они представлены в табл. 1, где приведены фрактальные характеристики рядов GPS — рассчитанные независимыми методами спектральный скейлинговый параметр (β), фрактальная размерность (D) и показатель Херста (H). Значения показателя Херста уточнены по сравнению с предыдущими результатами [Захаров, 2004]. При аппроксимации области скейлинга прямой (в двойном логарифмическом масштабе) вычислялись коэффициент корреляции (R) и статистическая значимость по критерию Стьюдента (t).

Значения $R > 0,8$ и $t > 10$ подтверждают статистическую достоверность полученных характеристик. Стандартные ошибки параметров: $\delta_\beta \leq 0,1$; $\delta_H \leq 0,1$; $\delta_D \leq 0,3$.

Анализ полученных результатов определенно показывает, что исследуемые временные ряды GPS проявляют фрактальные свойства в диапазоне более одного порядка по частоте ($\sim 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-1} \text{ сут}^{-1}$). По характеристикам они сходны не с гауссовым шумом (хотя он также присутствует, что выявляется по горизонтальному участку спектра в области высоких частот), а с обобщенными броуновскими функциями.

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, причем тем большей, чем больше β или H (и чем

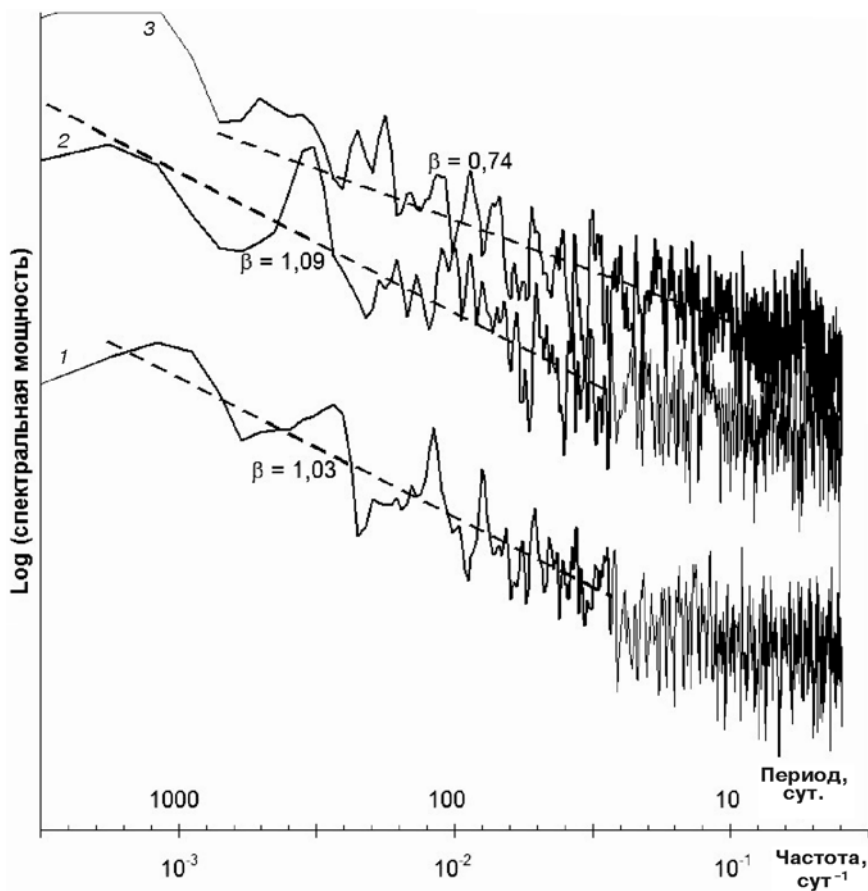


Рис. 3. Зависимость спектральной мощности (СМ) от частоты в двойном логарифмическом масштабе для рядов (пункт YELL), приведенных на рис. 2: 1 — для вертикальной, 2 — для долготной, 3 — для широтной компоненты. Для наглядности графики спектров смещены по вертикальной оси. Области скейлинга аппроксимированы линейной зависимостью, рядом приведены значения параметра β

Таблица 1

Фрактальные характеристики временных рядов смещений GPS

Пункт	Длина ряда, сут.	Литосферная плита	«Жесткость»	Сейсмичность	Широтное смещение			Долготное смещение			Вертикальное смещение		
					β	D	H	β	D	H	β	D	H
ANKR	1946	Анатолийская	<i>r</i>	<i>s</i>	1,25	1,89	0,83	1,05	1,89	0,84	0,97	1,94	0,76
MCM4	3238	Антарктическая	<i>n</i>	<i>n</i>	0,49	1,98	0,74	0,78	1,98	0,79	0,90	1,96	0,79
BAHR	2048	Аравийская	<i>r</i>	<i>n</i>	1,12	1,93	0,85	1,02	1,96	0,78	1,15	1,93	0,85
YAR1	3030	Австралийская	<i>r</i>	<i>n</i>	1,16	1,86	0,86	1,04	1,92	0,79	1,05	1,94	0,74
BOR1	2716	Евразийская	<i>r</i>	<i>n</i>	0,82	1,97	0,75	1,06	1,95	0,80	0,93	1,97	0,76
IRKT	2160		<i>n</i>	<i>s</i>	1,25	1,92	0,88	1,25	1,90	0,88	0,94	1,93	0,85
METS	2468		<i>r</i>	<i>n</i>	0,76	2,00	0,69	1,09	1,99	0,73	1,09	1,96	0,85
ZECK	1434		<i>n</i>	<i>s</i>	1,15	1,98	0,74	1,02	1,97	0,76	1,06	1,95	0,78
COCO	1814	Индийская	<i>n</i>	<i>n</i>	1,41	1,80	0,89	1,31	1,89	0,79	0,90	1,95	0,78
COSO	2070	Северо-Американская	<i>n</i>	<i>s</i>	1,40	1,87	0,90	1,39	1,84	0,93	1,36	1,86	0,94
GOL2	2340		<i>n</i>	<i>s</i>	0,96	1,92	0,87	1,30	1,89	0,85	0,85	1,97	0,79
KELY	2036		<i>r</i>	<i>n</i>	0,79	1,97	0,69	0,86	1,97	0,67	1,08	1,95	0,74
STJO	3334		<i>r</i>	<i>n</i>	1,21	1,95	0,83	1,00	1,96	0,80	1,02	1,96	0,79
WEST	1730		<i>r</i>	<i>n</i>	1,25	1,94	0,78	1,07	1,96	0,81	0,98	1,96	0,74
YELL	3574		<i>n</i>	<i>n</i>	1,03	1,93	0,78	1,09	1,95	0,78	0,74	1,93	0,86
HARV	2296		Тихоокеанская	<i>n</i>	<i>s</i>	0,83	1,96	0,84	1,12	1,91	0,87	1,31	1,98
KOUR	2690	Южно-Американская	<i>r</i>	<i>n</i>	1,15	1,95	0,85	0,70	2,00	0,76	0,92	1,98	0,76
SHAO	2262	Китайская	<i>r</i>	<i>s</i>	1,02	1,94	0,87	1,09	1,95	0,85	1,09	1,95	0,78
USUD	3142	Охотская	<i>r</i>	<i>s</i>	1,03	1,94	0,80	0,82	1,96	0,77	0,99	1,95	0,78

меньше фрактальная размерность D соответственно). Значения показателя Херста, существенно превосходящие 0,5, указывают на персистентность изучаемых движений.

В настоящее время есть разные модели систем, генерирующих фликкер-шум. Одна из таких моделей — самоорганизованная критичность (СОК) [Горяинов, Иванюк, 2001; Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997]. Возможно также возникновение фликкер-шума в системе, на которую воздействует множество периодических процессов со случайными амплитудами и фазами. Еще один важный класс систем, порождающих фликкер-шум, — такие системы, в которых перемежаемость обусловлена нелинейным характером взаимодействия элементов внутри системы, из-за чего ее отклик даже на постоянное воздействие становится весьма сложным, с хаотично распределенными всплесками.

Поскольку значения β , D и H рассчитаны независимо, они позволяют, в пределах ошибок, подтвердить обоснованность применения уравнений (2)–(4), полученных по модельным броуновским функциям, при оценке фрактальных характеристик природных временных рядов. Особенно хорошее соответствие модельным соотношениям наблюдается для соотношений между β и H для широтных и долготных компонент смещений. Для радиальных компонент достоверность значительно меньше, но тут следует отметить, что и точность вертикальных определений методом GPS в несколько раз ниже.

Обсуждение результатов. Таким образом, в результате анализа установлено, что «шумовая», «хаотическая» компонента в исследуемых рядах GPS в значительной степени не является вредной, подлежащей удалению, напротив, она несет весьма ценную информацию о характеристиках системы земной коры, генерирующей такие сложные блоковые движения.

Автором сопоставлены фрактальные и геодинамические характеристики исследуемых рядов. В качестве таковых использованы сейсмическая активность района, в котором расположен пункт GPS, а также принадлежность его к так называемым жестким (условное название) блокам.

Жесткими здесь вслед за [Sella et al., 2002] считаются такие наборы пунктов GPS, которые принадлежат к «стабильным» областям плит, двигаются наиболее согласованным образом и поэтому используются для наилучшего определения эйлеровых параметров вращения плит (полусы вращения, значения угловой скорости). Соответственно пункты, не принадлежащие к жестким блокам, относятся к зонам границ плит или к областям развития внутренних деформаций.

Отнесение анализируемых пунктов GPS к сейсмически активным районам проводилось на основе вычисления поверхностной плотности эпицентров землетрясений. Плотность за период времени, соответствующий исследуемым временным рядам (1992–2001), вычислялась по каталогу PDE в скользящем окне с использованием авторской программы

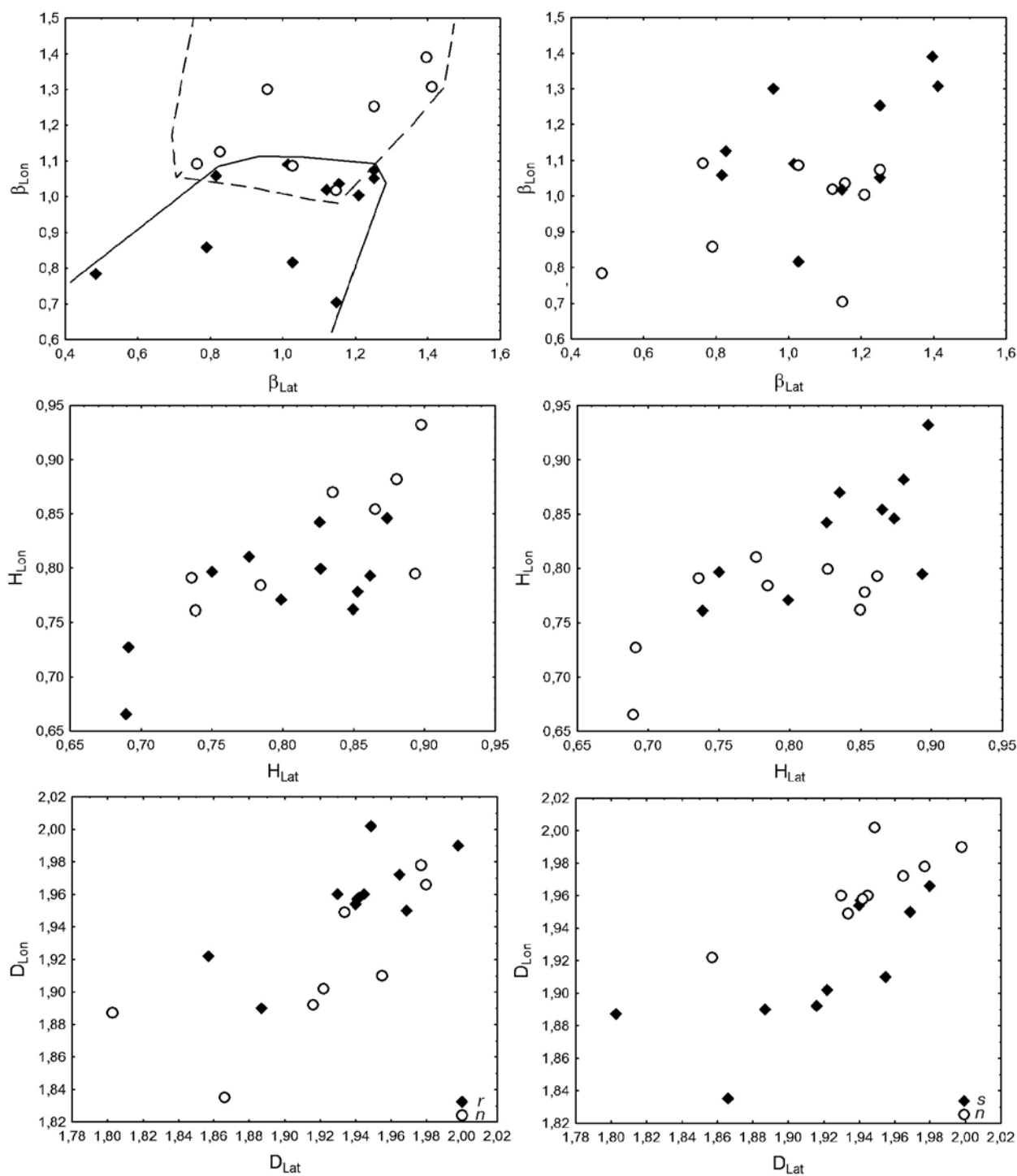


Рис. 4. Диаграммы фрактальных характеристик для горизонтальных компонент смещения. В левой колонке — по «жесткости» (r — жесткий и n — нежесткий блоки), в правой — по сейсмической активности (s — сейсмичный и n — несейсмичный районы)

FrAnGeo [Захаров, 20116], здесь считали пороговым значением одно событие на 10^4 км².

Обе характеристики для простоты рассматриваются как бинарные: r — жесткий, n — нежесткий блоки; s — сейсмичный, n — несейсмичный районы, эти параметры представлены в табл. 1.

Диаграммы для фрактальных характеристик горизонтальных компонент с учетом указанных выше параметров (r и s) представлены на рис. 4. На первый взгляд они не позволяют непосредственно вы-

делять кластеры (скопления) точек с одинаковыми характеристиками. Можно приблизительно выделить области для пунктов, принадлежащих жестким и нежестким блокам по параметру β (рис. 4, вверху слева). По остальным параметрам можно только оценочно сказать, что точки, соответствующие изучаемым характеристикам, в целом лежат на диаграмме выше или ниже в зависимости от значений параметров r и s . Однако это группирование (достаточно условное) носит систематический характер. Для уточнения про-

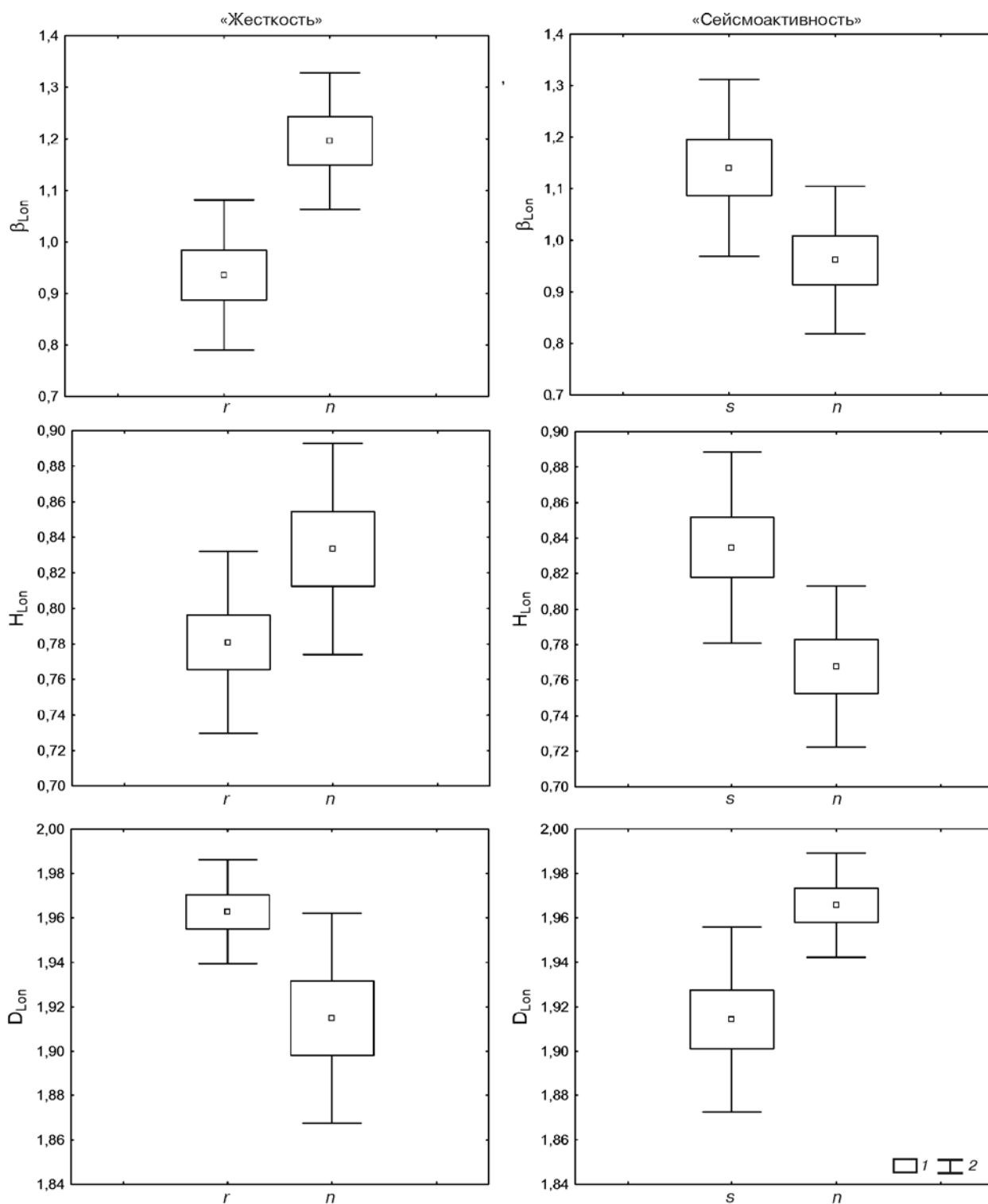


Рис. 5. Диаграмма средних значений фрактальных характеристик. В левой колонке — по «жесткости» (*r* — жесткий и *n* — нежесткий блоки), в правой — по сейсмической активности (*s* — сейсмичный и *n* — несейсмичный районы); 1 — стандартная ошибка среднего; 2 — стандартное отклонение совокупности

ведено сопоставление средних (понимая всю ограниченность и недостатки усреднения) характеристик по каждой из компонент в зависимости от исследуемых геодинамических параметров.

Результаты для долготной компоненты показаны на рис. 5. Для остальных компонент результаты носят такой же характер и представлены в табл. 2. Такое представление результатов позволяет выявить

систематический характер зависимости от геодинамических параметров, хотя и не является абсолютно достоверным, так как диапазоны средних значений с учетом стандартных ошибок не перекрываются, но с учетом стандартных отклонений перекрываются. Гипотеза о различии средних значений по обеим группировочным (*r* и *s*) переменным (*t*-критерий) достоверно подтверждается ($p \leq 0,05$) для всех харак-

Таблица 2

Средние значения фрактальных характеристик по компонентам смещения в зависимости от исследуемых геодинамических параметров

Характеристика	Компонента	«Жесткость»		Сейсмическая активность	
		r (11)	n (8)	s (10)	n (9)
β	Lat	1,03	1,10	1,11	1,00
	Lon	0,95	1,20	1,14	0,96
	Rad	1,01	1,03	1,04	0,99
H	Lat	0,80	0,83	0,84	0,79
	Lon	0,78	0,83	0,83	0,77
	Rad	0,78	0,82	0,80	0,79
D	Lat	1,94	1,92	1,92	1,94
	Lon	1,96	1,91	1,91	1,97
	Rad	1,95	1,94	1,94	1,95

теристик, определенных по долготным компонентам, но для широтных и вертикальных достоверность различий меньше.

Выявленная закономерность носит следующий характер. Для пунктов с признаком r (т.е. принадлежащих жестким блокам) средние значения параметров β и H меньше, чем для нежестких, а средние значения параметра D , наоборот, больше. Как указано выше, меньшие значения β и H и соответственно большие значения D свидетельствуют о меньшей доле определенности, детерминированности процесса. Таким образом, результаты указывают, что временные ряды смещения пунктов, принадлежащих жестким блокам, несут меньшую степень детерминизма и большую степень стохастичности. Для признака s ситуация обратная: средние значения параметров β и H больше, а D — меньше для пунктов, лежащих в сейсмически активных районах. Таким образом, временные ряды пунктов в сейсмически активных районах, а также в пунктах, принадлежащих к нежестким блокам, характеризуются большей степенью детерминизма, чем для неактивных районов и жестких блоков. Приведенные выше результаты выглядят несколько парадоксально и нуждаются в объяснении.

Прежде всего отметим, что выделенные группы (жесткость и сейсмоактивность) в значительной мере не независимы: 7 точек из 19 относятся одновременно к жестким блокам и несейсмичным районам, а 6, напротив, — одновременно к нежестким блокам и сейсмичным районам; 4 точки из оставшихся 6 относятся к жестким блокам и сейсмичным районам, а 2 — к нежестким блокам и несейсмичным районам. Такое разделение на две группы большинства точек (13 из 19, т.е. 68%) позволяет приблизительно считать, что нежесткие блоки соответствуют сейсмичным, а жесткие блоки — несейсмичным районам. Это разделение можно объяснить следующим образом. Нежесткие блоки не являются однородными, они состоят из блоков меньшего масштаба, которые могут совершать дифференцированные движения. Взаимодействие по краям этих разномасштабных блоков

проявляется в наблюдаемой картине сейсмичности [Захаров, 2011а].

Пункты GPS, принадлежащие к жестким блокам, участвуют в достаточно согласованном совместном движении (именно эта согласованность и служит критерием их отбора для определения эйлеровых параметров движения плит). Однако так как мы анализируем временные ряды со «снятым» трендом, то эта общая, наиболее детерминированная компонента из рассмотрения исключена. Оставшаяся компонента содержит в значительной степени хаотический случайный сигнал, что и отражается в значениях фрактальных характеристик. Для пунктов, не принадлежащих к жестким блокам, нет такой значительной общей компоненты, которая снимается вместе с трендом. Однако в этих районах возможна сложная динамика блоков меньшего масштаба. Выявление и анализ таких движений проведены для ряда регионов в работе [Захаров, Симонов, 2010]. Подобные сложные внутриблоковые движения также обладают детерминированно-хаотическими свойствами. Видимо, эта степень детерминизма и проявляется в значениях исследуемых фрактальных характеристик. Возможные модели таких процессов, где значительную роль играет механизм «сухого» трения, обеспечивающий положительную обратную связь, и их свойства рассмотрены в работах [Захаров, 2004, 2011а].

Для сейсмически активных районов выявлена определенная степень детерминизма. Это неплохо согласуется с данными работы автора [Захаров, 2010], где проанализированы временные ряды сейсмической энергии и показано, что они обладают свойствами самоподобия в диапазоне более одного порядка по времени и по частоте. Сейсмический процесс очень сложен и далек от полного детерминизма, однако не совершенно случаен (стохастичен). В то же время для районов со слабой сейсмичностью и асейсмичных нет общего процесса переработки энергии, и значительную роль играет воздействие большого числа факторов, а также сильнее проявляется вклад случайных помех. Это и проявляется в значениях исследуемых фрактальных характеристик.

Таким образом, результаты, полученные автором при сопоставлении фрактальных и геодинамических характеристик, имеют вполне логичное объяснение в рамках подходов, применяемых в теории динамических систем и работ автора.

Следует отметить, что исследуемые динамические характеристики горизонтальных компонент достаточно хорошо согласованы, на что указывает «диагональный» характер распределения точек на диаграммах (рис. 4). Они ближе между собой, чем с аналогичными характеристиками вертикальной компоненты, что подтверждают результаты кластерного анализа.

При этом важно отметить, что, несмотря на указанные различия, размах и динамические характеристики хаотической компоненты колебаний для вертикальной и горизонтальных компонент смещения

близки между собой. Контрастный знакопеременный характер вертикальных движений значительной интенсивности выявлен достаточно давно по геодезическим измерениям (повторные нивелировки и др.) [Кузьмин, 1989; Сидоров, Кузьмин, 1989], а для горизонтальных движений обычно отмечается именно их направленный характер [Хаин, Ломизе, 2005]. Однако анализ рядов GPS-измерений, проведенный автором, показывает, что контрастность и осциллирующий характер движений проявляются также и для горизонтальной компоненты.

Наличие фликкер-шумовой компоненты в исследованных временных рядах смещений со значениями спектрального показателя β в диапазоне 0,7–2 и показателя Херста в диапазоне 0,7–0,9 можно объяснить двояким образом.

Во-первых, выявленный шум — это обобщенный броуновский процесс, в котором на каждом следующем шаге система получает некоторое смещение под воздействием большого количества случайных внешних факторов и, кроме того, происходит некоторая релаксация (возможно, нелинейная) ранее накопленной шумовой компоненты. Временной ряд такого типа как раз характеризуется значениями спектрального показателя $\beta = 1 \pm 2$ (вообще говоря, до 3).

Во-вторых, система, генерирующая наблюдаемый ряд, относится к классу детерминированно-хаотических. Примером таких систем являются предложенные и исследованные в работах [Захаров, 2004, 2011a] модели блоковой динамики с сухим трением, играющим роль положительной нелинейной обратной связи, механизм которой приводит к хаотизации (как в

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.

Захаров В.С. Анализ динамических характеристик временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. № 5. С. 13–20.

Захаров В.С. Современные вертикальные движения земной коры // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 1. М.: Научный мир, 2006. С. 626–643.

Захаров В.С. Динамические и фрактальные характеристики временных рядов выделения сейсмической энергии // Нелинейный мир. 2010. № 4. С. 234–242.

Захаров В.С. Модели сейсмодетекторных систем с сухим трением // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011a. № 1. С. 22–28.

Захаров В.С. Вычисление фрактальных характеристик речных сетей и сейсмичности с помощью программы FRANGEО на примере полярных и приполярных областей Евразии // Научная конференция «Ломоносовские чтения». Сек. Геология. М.: МГУ, 2011б. URL: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1186049&uri=zaharov.html> (дата обращения: 31.01.2013).

Захаров В.С., Симонов Д.А. Анализ современных дискретных движений блоков земной коры геодинамически активных областей по данным GPS // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 3. С. 25–31.

Кузьмин Ю.А. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений // Прогноз землетрясений. 1989. № 11. С. 52–60.

моделях, так и в природе). Указанные системы имеют динамические характеристики, близкие по значению к полученным автором, в частности, установлен тот же диапазон значений спектрального показателя β от 0,9 до 2 и показателя Херста от 0,8 до 0,9 (табл. 2). Дискретная динамическая система земной коры таким образом (самоподобно) перерабатывает поступающую энергию. Динамика систем с подобными характеристиками предполагает, что на фоне относительно небольших изменений происходят значительные (на порядок большие) всплески. При этом величина этих выбросов и промежутки времени, их разделяющие, нерегулярны и не могут быть предсказаны.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что анализ и прогноз в сейсмодетекторных и геодинамических системах (землетрясения, сильные движения и т.д.) должен осуществляться адекватными методами, которые разрабатываются в теории динамических систем и фракталов.

Представляется, что на основании полученных результатов нельзя сделать однозначный выбор конкретных моделей, это требует более детального анализа. Однако выявленная корреляция между динамическими параметрами исследуемых рядов смещений и геотектоническими и геодинамическими характеристиками районов (жесткость блоков и сейсмоактивность) указывает на то, что детерминированно-хаотический процесс (наряду со случайным) вносит свой вклад в наблюдаемые временные ряды смещений.

Автор глубоко признателен М.В. Родкину за плодотворную дискуссию в ходе работы над статьей.

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. 210 с.

Сидоров В.А., Кузьмин Ю.А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М.: Наука, 1989. 183 с.

Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.

Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.

Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Ижевск: РХД, 2001. 528 с.

Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.

Frey Mueller J.T., Fletcher H.J. Spatial variations in present-day deformation, Kenai Peninsula, Alaska, and their implications // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. D4. P. 8070–8101.

Prawirodirdjo L., Bock Y. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. B08405. doi:10.1029/2003JB002944.

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. doi:10.1029/2000JB000033.

Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.

Wang W., Zhao B., Wang Q., Yang S. Noise analysis of continuous GPS coordinate time series for CMONOC // Advances in Space Res. 2012. Vol. 49. P. 943–956. doi:10.1016/j.asr.2011.11.032.

Поступила в редакцию
23.10.2012