***Известия ГАО РАН**, СПб, 1998, № 213, с. 269-272. (полная версия)*

О ПЕРСИСТЕНТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ ЗЕМЛИ

В.Л.Горшков, Н.О.Миллер, А.Н.Баушев, В.М.Воротков

Метод нормализованного размаха был применен для исследования рядов параметров ориентации Земли. Показатель персистентности этих рядов после снятия основных гармонических составляющих оказался очень велик, что, скорее всего, свидетельствует о присутствии в рядах низкочастотных составляющих.

В 50-х годах Хёрстом (1957) был предложен метод нормированного размаха (метод Хёрста в дальнейшем) для исследования временных рядов. Суть метода проста и состоит в исследовании накопленных за интервал времени τ отклонений процесса $y(t)$ от среднего значения. Пусть для дискретного ряда $\tau = n$ и $\hat{y}_n$ - среднее процесса, тогда накопленное отклонение процесса в момент $t = j$ равно:

$$Y(j,n) = \Sigma^{j}_{i=1} (y_i - \hat{y}_n).$$

Размах этой величины для n значений ряда равен:

$$R(n) = max_{1<j<n} Y(j,n) - min_{1<j<n} Y(j,n).$$

Хёрст исследовал нормированный размах $r = R/S$, где S – стандартное уклонение процесса от среднего $\hat{y}_n$.

За прошедшее с тех пор время этим методом были исследованы десятки эмпирических рядов, характеризующих самый широкий спектр атмосферных, гидрологических, геологических и даже астрономических (числа Вольфа) рядов. При этом оказалось, что величина r хорошо аппроксимируется степенной зависимостью $r(\tau) \sim (\tau)^H$, где H – показатель Хёрста.

Для случайного процесса с независимыми приращениями и конечной дисперсией, как это было показано Федером, $H \rightarrow 0.5$ при $n \rightarrow \infty$ (Feder, 1988).

Согласно терминологии, предложенной Мандельбротом (Mandelbrot, 1982), гауссовский случайный процесс $B_H(t)$ с нулевым средним и корреляционной функцией

$$k(s,t)=0.5(s^{2H}+t^{2H} - |s-t|^{2H})$$

называется дробным броуновским движением ($0 \leq H \leq 1$). Значению $H=0.5$ отвечает обычное броуновское движение (процесс с независимыми приращениями). Если $H \neq 0.5$, то приращения процесса $B_H(t)$ на непересекающихся временных интервалах стохастически зависимы, причем значениям $H > 0.5$ отвечает положительная корреляция приращений, а значениям $H < 0.5$ – отрицательная. В первом случае говорят о персистентности приращений (persistent - устойчивый, инертный), а во втором – об антиперсистентности.

Персистентность свидетельствует о наличии в системе процессов, поддерживающих (в целом) наметившиеся тенденции к изменению её состояния, а антиперсистентность, наоборот, о процессах, препятствующих изменению состояния системы.

Отметим, что для временного ряда, полученного из процесса $B_H(t)$ показатель Хёрста равен параметру H, фигурирующему в формуле для корреляционной функции.

Оказывается, что показатель Хёрста является устойчивым (робастным) по отношению к варьированию типа распределения приращений процесса $y(t)$. На этом основании по оценке H показателя Хёрста, полученного для временного ряда, делают вывод о наличии персистентности ($H > 0.5$), её отсутствии ($H=0.5$) или о наличии антиперсистентности ($H < 0.5$) в данном временном ряде.

Применения метода ко многим естественным процессам, в частности, для всех вышеупомянутых процессов показало, что этот параметр в среднем равен $H = 0.73$, то есть является некоторой универсальной постоянной. При исследовании длительных эмпирических рядов значения $H > 0.5$ свидетельствуют о наличии в них долговременных самоподдерживающих тенденций (персистентности), то есть текущее состояние процесса в значительной степени зависит от его предыдущих состояний. Можно говорить об эффектах памяти в таких рядах или об их фрактальности. В работе (Mandelbrot, 1982) действительно была показана линейная зависимость между фрактальной размерностью ряда и показателем Хёрста.

При использовании метода Хёрста необходимо помнить о некоторых условиях, которым должны удовлетворять исследуемые ряды:

– необходима большая их продолжительность, т.к. существует отмеченная выше возможность асимптотической сходимости $H \rightarrow 0.5$,

– необходимо отсутствие значимых периодичностей и трендов в них, что приводит к завышенным значениям H.

Однако, исследуя зависимость $r(\tau)$, можно приближенно оценить эти неявные периодичности в ряде и, более того, определить временные интервалы, в которых фрактальная размерность ряда может оказаться различной (Feder, 1988). Метод Хёрста в сильной степени робастный метод и отсутствие персистентности ряда ($H \approx 0.5$) не означает нормальности распределения $y(t)$.

Следует отметить, что метод Хёрста не может быть отнесен к мощным методам исследования временных рядов ввиду качественности достигаемых с его помощью выводов.

Цель данной работы испытать возможности метода Хёрста на рядах параметров ориентации Земли (ПОЗ). Для исследования использованы ряды ПОЗ, полученные в рамках проекта «ПОЗ в системе HIPPARCOS» группой под руководством д-ра Я.Вондрака на основе переработки наиболее устойчивых и продолжительных наблюдений классических служб ПОЗ с 1899 по 1992 годы (Vondrak, et al., 1998) (в дальнейшем ряд ERH). Использовались также комбинированные (по техническим средствам мониторинга) ряды международной службы вращения Земли C01(IERS)EOP (1846 -1995, сглаженные данные через 0.1 года), C04(IERS)EOP (наиболее точные данные с 1962 года) и ряд среднегодовых значений продолжительности суток (LOD) с 1623 года (IERS annual report, 1993). Все использованные для анализа ряды даны в единой инерциальной системе координат ICRS.

Наибольшая трудность в нашем случае состоит именно в наличии в рядах ПОЗ гармоник от долей года до декадных вариаций. Для удаления сезонности мы прибегли к фильтрации наиболее значимых гармоник в координатах полюса с помощью фильтра А.Я.Орлова:

$$X_m = 0.05\, \Sigma^{\,i=4}_{\;i=1} (X_i+X_{i+5}+X_{i+6}+X_{i+11}),$$

снимающего полугодовую, годовую и 1.2 года колебания в предположении их строгой синусоидальности. Таким образом отфильтрованные X_m и Y_m ряда ERH представлены на рис.1. Приведенный на рисунке линейный тренд также вычтен из рядов перед применением метода Хёрста, результаты которого приведены справа от анализируемых рядов (удаление тренда практически не сказалось на величине H).

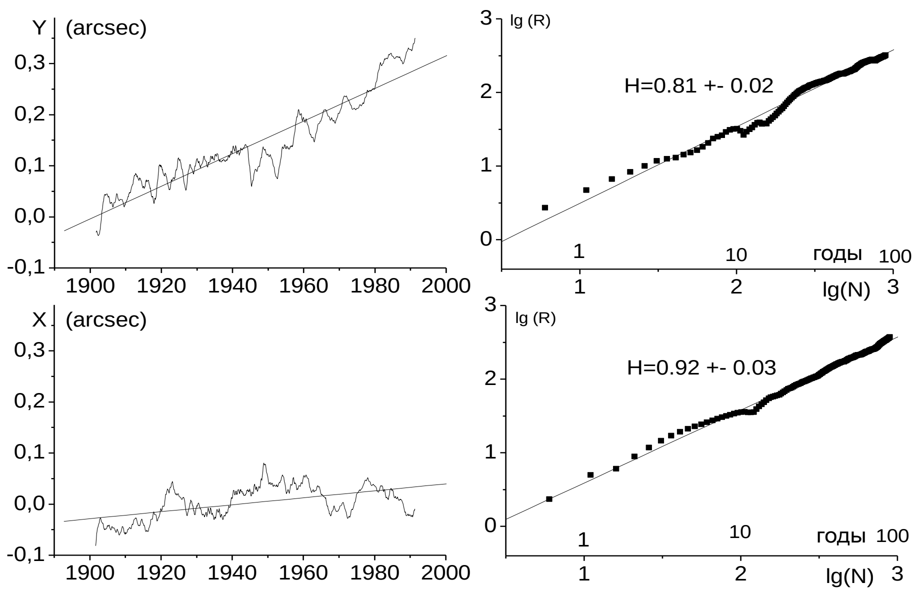

Рис.1. Слева: координаты полюса ERH после фильтрации по А.Я.Ор лову. Справа: результаты обработки этих рядов методом Хёрста.

Аналогичные результаты получены для ряда C01 с тем лишь исключением, что H $\approx$ 1.0.

Ряд C04 дает значения ПОЗ на каждый день, поэтому он был использован для проверки персистентности на коротких интервалах времени от трех суток и больше. Для этого из 425 последовательных значений X, начиная с 1 января 1992 года был исключен гармонический тренд

$$1.3(0.05\sin(2\pi t+1.69)+0.1\sin(1.67\pi t+2.54)+0.025,$$

наилучшим образом для этой части ряда удаляющий годичную и чандлеровскую составляющие. Величина H = 0.967 ± 0.004.

Из этого следует, что персистентность рядов координат полюса остается примерно одинаковой ($H \approx$ 0.9-1.0) на всей шкале интервалов времени, но ряды не свободны от периодичности. В районе около 12–15 лет кривые имеют особенности, которые могут свидетельствовать о присутствии этих гармоник в рядах и, следовательно, о завышенном значении показателя Хёрста.

На рис.2 приведен ряд LOD и его оценка методом Хёрста. Величина H = 0.870 ± 0.004 свидетельствует о персистентности ряда на интервалах превышающих год.

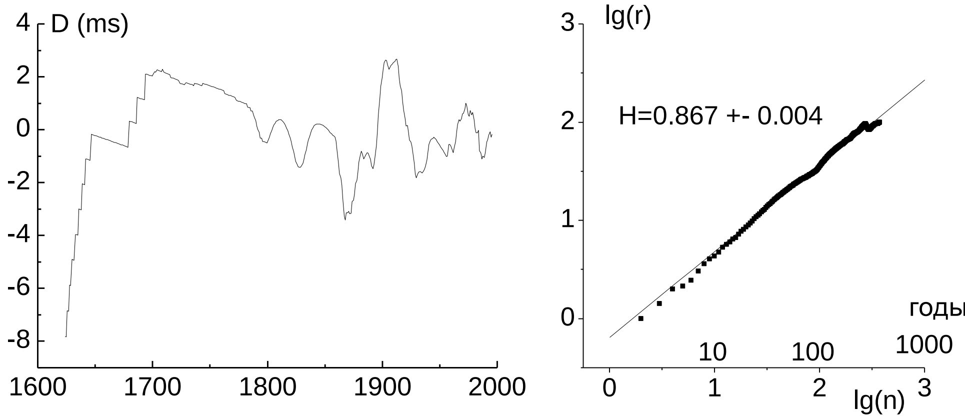

Рис.2. Слева – ряд продолжительности суток (D – продолжительность суток – 86400 сек). Справа – результаты обработки ряда методом Хёрста.

Проведенный анализ позволяет заключить, что после снятия известных гармоник в составляющих вектора вращения Земли его поведение определяется персистентной статистикой, хотя присутствие неучтенных периодичностей в поведении ПОЗ ощутимо и, вероятно, искажает оценку величины H.

Очень большая величина показателя Хёрста для исследуемых рядов говорит о сильной зависимости величин, что может свидетельствовать о кумулятивности самого процесса. Следовательно для исследования методом Хёрста необходимо использовать не накопленные отклонения процесса, а накопленные отклонения их приращения. Показатель Хёрста, посчитанный по величинам $y_{i+1} - y_i$ дает значения H близкие к 0.5, что может служить доказательством броуновского движения полюса после снятия вышеупомянутых трендов и периодичностей.

В теории броуновского движения доказывается следующая зависимость пройденного частицей вектора расстояния от времени $R^2 = \alpha t$. Величина α в классической теории броуновского движения частицы зависит от температуры и вязкости среды (Фейнман и др., 1965). В нашем случае по данным службы полюса (100 лет мониторинга) можно оценить верхний предел радиуса окружности, за которую полюс не выйдет за миллион лет. Эта величина оказывается равной примерно 1 км, если вековое движение полюса считать броуновским. Если нет, то около 300 метров. При более долгосрочных оценках, вероятно, следует учитывать факторы, родственные температуре в классической теории броуновского движения, а именно: насыщенность солнечной системы протопланетным веществом и, как следствие, большая вероятность возмущающего ось вращения Земли внешнего воздействия.

К другим факторам, определяющим такое поведение вектора вращения Земли, относятся любые процессы передачи момента между корой Земли, где расположены все технические средства его мониторинга, и остальными (внутренними и внешними по отношению к коре) оболочками Земли. В любом случае, чисто броуновское движение полюса не играет определяющей роли в картине движения полюса на интервалах сотни и тысячи лет.

Литература:

Hurst H.E., 1957, A suggestial statistical model of some time series which occur in Nature, Nature, v.180, № 4584, pp.494-495.

Mandelbrot B.B., 1982, The fractal geometry of Nature, NY, Freeman.

Feder J., 1988, Fractals, NY, Pergamon Press.

Vondrak J, Pesek I., Ron C., Cepec A., 1998, Earth orientation parameters 1899.2 - 1992.0 in the ICRS based on the Hipparcos reference frame, Publ. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech R., № 87.

1992 IERS Annual Report, 1993, Observatoire de Paris

Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М., 1965, Фейнмановские лекции по физике, том 4, М., Мир.

ON THE PERSISTENCY OF THE EARTH ORIENTATION PARAMETERS

V.L.Gorshkov, N.O.Miller, A.N.Baushev, V.M.Vorotkov

Hurst method was used for analysis of the Earth orientation parameter sets. It is shown persistency of these sets in all time scale.