

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ДВИЖЕНИИ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

М.В. Воротков, В.Л. Горшков, Н.О. Миллер, Е.Я. Прудникова

*В работе исследовались основные составляющие в движении полюса Земли по сводным международным данным. Для анализа использовался модифицированный многомерный метод главных компонент [2]. По результатам исследований чандлеровская и годовая составляющие для всех рядов дают наибольший вклад. Чандлеровская составляющая состоит из двух компонент. Первый устойчив по форме и периоду (1.19 года). Второй компонент, с существенно меньшим вкладом, отличаются значительные вариации периода (1.1-1.3 года). В обоих компонентах амплитуды испытывают значительные колебания. Основной компонент со стабильным периодом может быть объяснён в рамках общепринятой теории, как результат свободной нутации Земли [4]. Можно предположить, опираясь на модельные примеры, что второй компонент имеет форму модулирующей функции*

Движение полюса Земли представляет собою процесс столь сложный, что до сих пор ставит исследователей перед необходимостью искать однозначный ответ на одни и те же вопросы, например: каков механизм возбуждения чандлеровской составляющей в движении полюса, какова природа этого явления, какова его взаимосвязь с различными геофизическими факторами. При этом зачастую результаты исследования находятся в зависимости от применяемой методики. При исследовании геодинамических рядов часто возникает необходимость с достаточной степенью надежности выделить тренд (вековое движение полюса, среднюю широту), отдельные составляющие процесса или освободить ряд от всех значимых периодических или квазипериодических компонентов, то есть получить ряд остатков. В рядах параметров вращения Земли (ПВЗ), в частности, сделать это не просто ввиду некоторой нерегулярности компонентов сезонного характера и тем более таких, которые обусловлены климатическими глобальными явлениями как, например, Эль-Ниньо [1]. Это относится и к чандлеровскому движению полюса (ЧДП).

В данной работе произведено разделение составляющих движения полюса Земли методом анализа временных рядов, предложенного в СПбГУ и названного авторами методом «Гусеница». В зарубежной литературе аналогичный метод известен как SSA (Singular Spectrum Analysis) [2] (<http://www.gistatgroup.com/gus/>). Составляющие движения полюса Земли (X и Y) исследовались совместно с помощью многомерного анализа, который позволяет анализировать процесс в целом. На примере модельных рядов показана эффективность использования этого метода для рядов со сложной структурой, имеющих различные нерегулярности - такие, как вариации амплитуды, резкие изменения фазы.

В качестве исходных данных использовались сводные ряды ПВЗ международной службы вращения Земли EOP(IERS)C01 (<http://hpiers.obspm.fr/>), в двух редакциях: старой (июнь 2000г.) за 1900-2000гг (C01\_1) с шагом 0.05 года, исследованной нами в предыдущих работах [3,4], и новой (август 2002 г.) за 1846-2002гг. (C01\_2) с шагом 0.1 года.

При исследовании подобных рядов обычно используют динамический спектральный анализ или вэйвлет анализ, но при этом в случае нестационарных процессов возникают сложности в интерпретации спектральных результатов. В реальных геодинимических процессах присутствуют квазирегулярные составляющие, спектральная оценка которых даёт лишь усреднённую характеристику.

Амплитудный Фурье-спектр рядов (рис.1) показывает наличие в интересующей нас области ЧДП двух гармоник с амплитудами около 0.08'' и периодами 1.191 и 1.177 года. В таблице 1 также приведены значения периодов и их амплитуд для менее мощных, но значимых пиков.

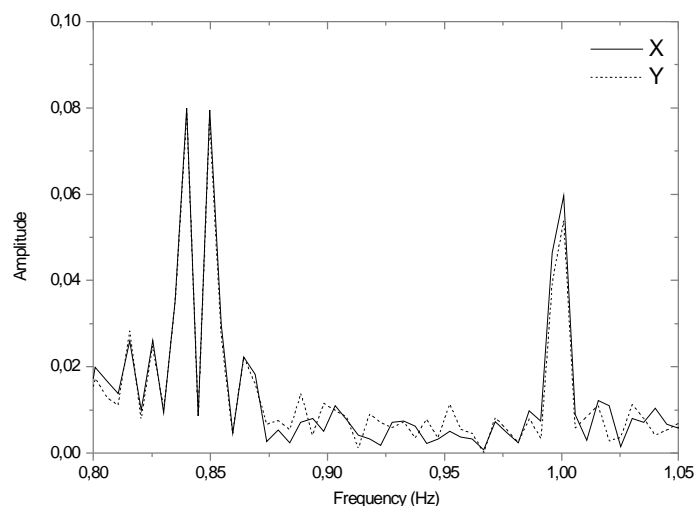


Рис. 1.

Таблица 1

Период (год)	Амплитуда X	Амплитуда Y
1.226	0.026''	0.028''
1.212	0.026	0.025
1.191	0.080	0.079
1.177	0.079	0.078
1.157	0.022	0.022
0.999	0.060	0.054

В основе метода «Гусеница» лежит анализ главных компонент. Идея метода одномерной гусеницы заключается в переходе от одномерного ряда к многомерной выборке и исследовании свойств этой выборки методами многомерной статистики (подробнее в [2-4]). Однако эта идея продолжает работать также и в случае, когда исходно рассматривается не один временной ряд, а система. В этом случае в многомерную выборку преобразуется многомерный же временной ряд. Главные компоненты, полученные этим методом, являются общими для всей системы рядов, в то время как собственные вектора состоят из частей, соответствующих отдельным рядам. Длина гусеницы (М) является основным управляющим параметром метода. В общем случае выбор М зависит от задачи, решаемой этим методом. Для наилучшего выделения или исключе-

ния периодического (не обязательно гармонического) колебания с известной частотой, и, следовательно, известным периодом необходимо уменьшить длину временного ряда  $N$ , т.к. периодические колебания наилучшим образом выделяются, если  $M$  равно, а  $N$  кратно длине периода выделяемого колебания. Речь идёт о качественном выделении компонент, т.е. метод является достаточно устойчивым. Многие эффекты обнаруживаются при любом достаточно большом  $M$ . Если необходимо найти периодичности или выделить тренд, лучше всего выбрать  $M = N/2$ .

В случае выделения тренда метод аналогичен «скользящему суммированию», в частности, для рядов ПВЗ - методам Орлова, Сахарова, Мельхиора. Формулы скользящего среднего этими авторами подбирались таким образом, чтобы освободить медленные вариации от наличия периодических колебаний, в основном от чандлеровского и сезонного. В данном случае можно получить трендовую линию, заведомо свободную от любых периодичностей. Кроме того, этот метод позволяет выбирать длинные участки осреднения, не теряя начала и конца ряда. Подробнее сравнительный анализ с иллюстрацией результатов изложен в [3]. Ещё одно положительное свойство метода заключается в том, что практически любой «сигнал» (детерминированная функция) всегда отделяется от случайного шума.

В реальных физических процессах зачастую происходит мультипликативное взаимодействие составляющих. Большинство методов легко позволяют выделить аддитивные составляющие, однако в случае не строгой регулярности появляются фиктивные компоненты. Все компоненты, выделяемые методом «Гусеница», аддитивны, но, тем не менее, есть возможность их рассматривать в мультипликативной ситуации.

С помощью модельных примеров продемонстрируем работу метода для рядов с нестабильной амплитудой, с нестабильной фазой (что эквивалентно изменению частоты) и сочетанием того и другого. Рассмотрим три ряда длиной 1560 точек с проявлением нестабильности в двух местах (160, 860 точки) продолжительностью 110 точек. Каждый ряд состоял из промодулированного синусоидального колебания с периодом 11 точек (несущая частота) и был зашумлен случайной величиной с нормальным распределением ( $\delta=0.2$  и  $\delta=0.8$ ).

Гармоническая компонента первого ряда была подвергнута амплитудной модуляции, таким образом, чтобы амплитуда плавно изменялась на 40%, на указанных участках длиной 110 точек, а затем восстанавливалась. Во втором ряду на каждом участке нестабильности фаза плавно увеличивалась на 0.5 периода. Третий ряд был построен на основе амплитудной и фазовой модуляций, описанных выше.

На рис. 2-4 представлен результат работы метода. Надёжность выделения шумовой компоненты практически не зависит от уровня шума. Верхние графики представляют собой исходный ряд. Вторые графики отображают компоненту, сопоставляемую с несущей частотой в модельных рядах. Аддитивная компонента (третьи графики) в сумме со второй даёт гармоническую составляющую исходного ряда (четвертые графики). Эти компоненты не являются тождественными тем неаддитивным составляющим, которые породили исходные модельные ряды. Тем не менее, можно выявить характер взаимодействия этих составляющих в различные моменты времени. Второй график демонстрирует наличие интервалов нестационарности, а размах колебаний третьего может быть интерпретирован, как интенсивность модулирующего процесса. Из выше изложенного следует, что чувствительность метода к наличию нестабильностей даёт возможность анализировать ряды, порожденные неаддитивным взаимодействием процессов, в частности, рассматривать особенности слабого компонента ЧДП для оценки характера модулирующего процесса.

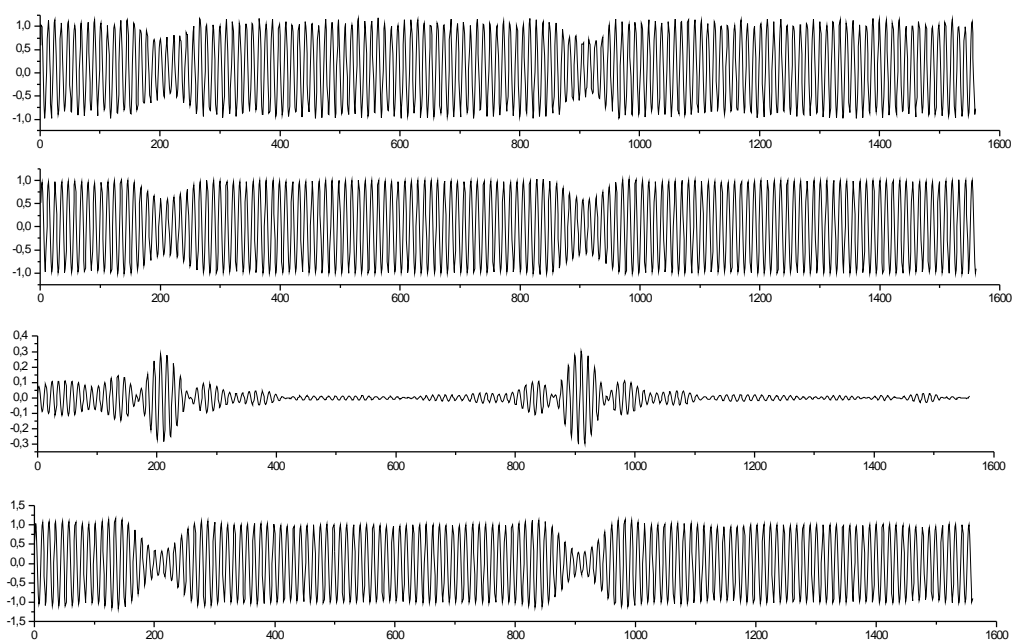


Рис.2. Модельный пример (первый ряд).

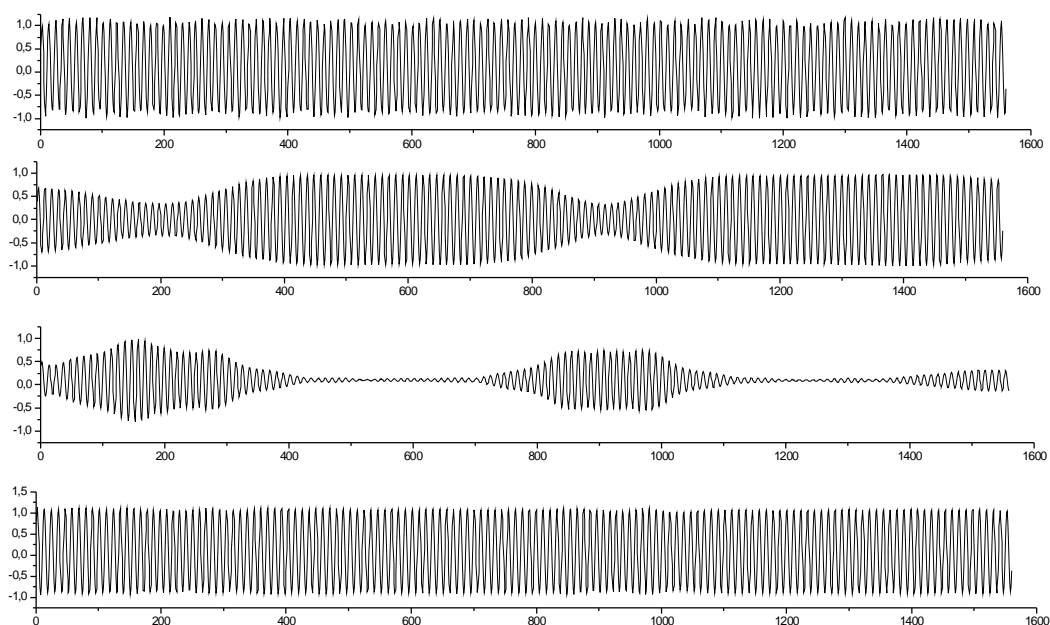


Рис.3. Модельный пример (второй ряд).

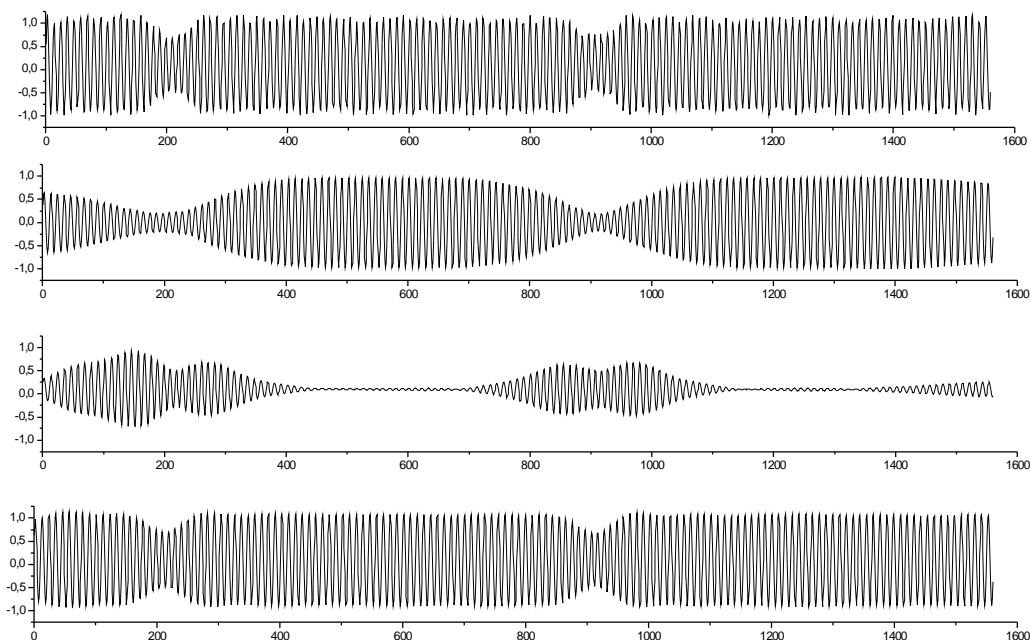


Рис.4. Модельный пример (третий ряд).

Далее в таблице 2 и на рис.5 приводятся результаты исследований ряда C01\_1 многомерным методом «Гусеница». На всех графиках в дальнейшем по оси ординат отложены arcsec, а по оси абсцисс года. Главные компоненты ряда были выделены при различных значениях  $M$ . Видно, что среди первых по вкладу присутствуют два компонента, близкие по периоду к чандлеровской составляющей движения полюса (ЧДП) – в дальнейшем основной (1) и слабый (2) компоненты. При  $M=240$  (12 лет) вклад основной ЧДП и годовой компонент является максимальным. Это говорит о том, что в этом случае происходит наилучшее выделение соответствующих составляющих движения полюса. С дальнейшим ростом  $M$ , т.е. фактически с уменьшением полосы фильтра, происходит увеличение числа компонентов и перераспределение вклада между ними. При этом основной ЧДП компонент становится несколько более сглаженным по амплитуде, а остатки перераспределяются между менее значимыми компонентами (1-2% вклад) с близкими периодами. В таблицах приведён средний период слабого компонента, в качестве амплитуды всюду использовался максимальный радиус-вектор ( $R_{\max}$ ) выделенного компонента. Динамика поведения компонентов демонстрирует достаточную их устойчивость.

На нижнем графике рисунка 5 приведены остатки после выделения всех периодических и трендовых компонент для ряда C01\_1.

Таблица 2. Изменение характеристик главных компонентов движения полюса в зависимости от параметра  $M$  для ряда C01.

M	Лаг (год)	Основная (1)			Годовая			Слабая (2)		
		Вклад	$R_{\max}$	Период	Вклад	$R_{\max}$	Период	Вклад	$R_{\max}$	Период
240	12	61,4	0,19	1,191	19,3	0,09	1,001	4	0,06	1,230
360	18	51,2	0,31	1,194	17,6	0,15	1,004	5,8	0,12	1,210
480	24	47,6	0,33	1,191	17,8	0,16	1,002	8,2	0,16	1,234
600	30	44,4	0,33	1,191	17,8	0,18	1,001	10,6	0,19	1,205

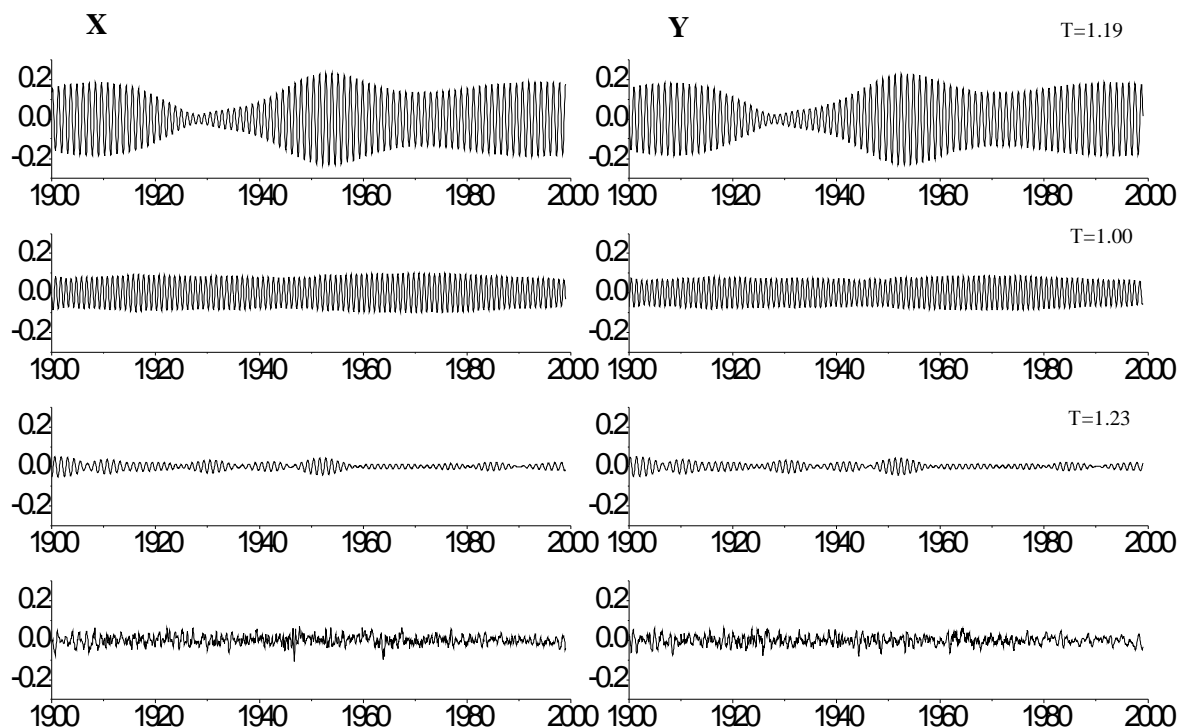


Рис. 5. Графики первой чандлеровской, годовой и слабой чандлеровской составляющих и график остатков.

Было проведено исследование основных компонентов на различных интервалах ряда C01\_1(1846-1900), C01\_2(1900-2000). Периоды первой восстановленных чандлеровской и годовой составляющих устойчивы и равны соответственно 1.191, 1.004 года. Период второй чандлеровской компоненты меняется от 1.113 до 1.280 года. Ошибки выделения компонент колебались от 0.007 (после 1960 года) до 0.016. На интервале с 1924 по 1960 годы период первой чандлеровской компоненты 1.164 года (ошибка 0.016), слабый компонент с периодом, близким к чандлеровскому, надёжно выделить не удалось, что может говорить о его связи с возбуждающими процессами. Следует отметить, что на этом интервале ошибки выделения компонент наибольшие.

Мы также исследовали ряд C01\_2 с шагом 0.1 года, взяв значение  $M$ , равное 360, что соответствует 36 годам, интервалу в который укладывается целое число раз шестилетний период. На рис.6 представлены: первая чандлеровская компонента, слабая компонента и их сумма для первого интервала с 1846 по 1895 годы, на рис.7 – для всего ряда. Из рисунков видно, что после суммирования проявляется структура процесса, в том числе первый интервал падения ЧП. Это можно интерпретировать как результат модуляции.

Многомерным анализом из ряда C01\_2 для медленных изменений координат полюса X и Y были выделены составляющие, имеющие общие главные компоненты. Заметно, что одна из них (4-ая на рис.8 а,б) имеет некоторую периодичность. Результат спектрального анализа показывает наличие периодов: X - 25.6 года (амплитуда 0.002"), 40.9 года (амплитуда 0.001"); Y - 29.3 (амплитуда 0.003"); 40.9 (амплитуда 0.002"). На-

личие длиннопериодических изменений около  $26 \pm 5$ , 41.6 лет отмечается другими авторами [5,6].

Применение метода к ряду C01 первой редакции на всём интервале 1846-2000гг не позволило чётко выделить эти составляющие векового движения полюса, а также получить первый интервал затухания амплитуды ЧДП.

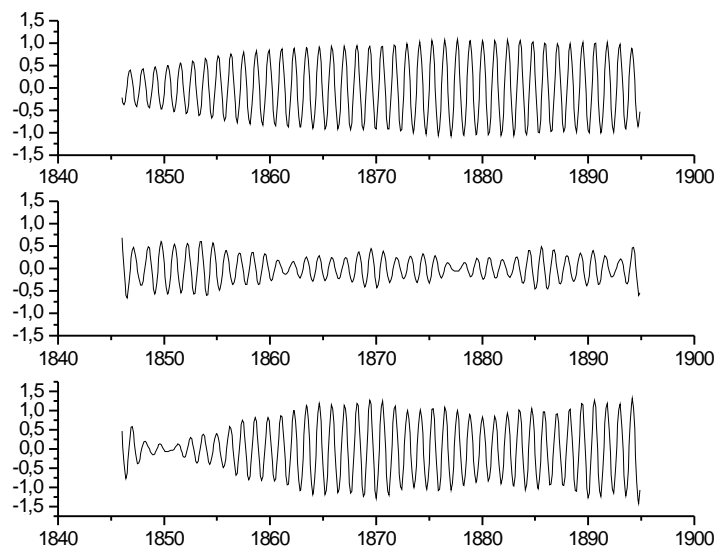


Рис.6. Чандлеровские составляющие и их сумма (нижний график) на интервале 1846-1895 годы.

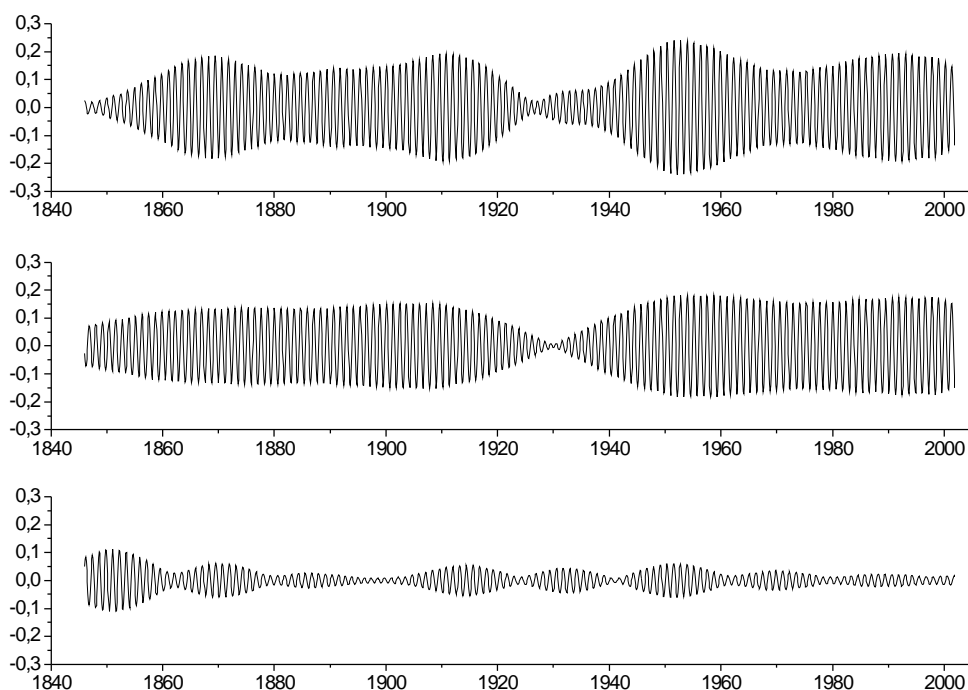


Рис.7. Чандлеровские составляющие и их сумма (верхний график).

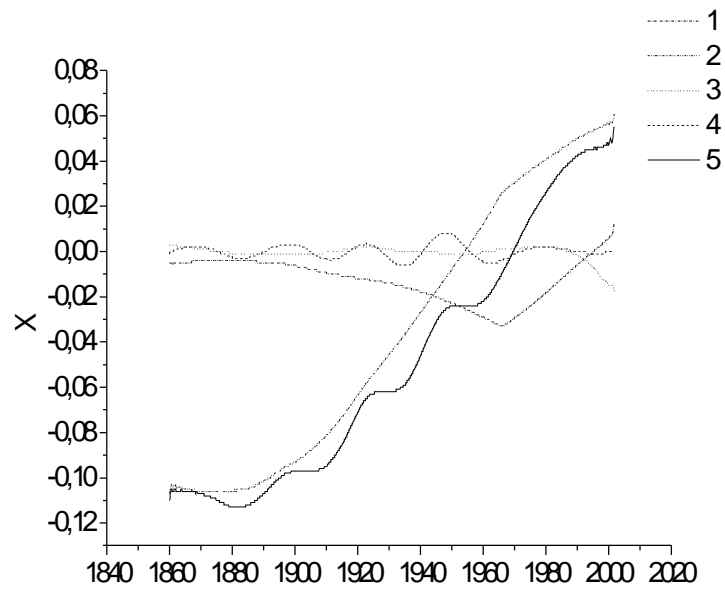


Рис.8.а. Составляющие медленного изменения координаты X.

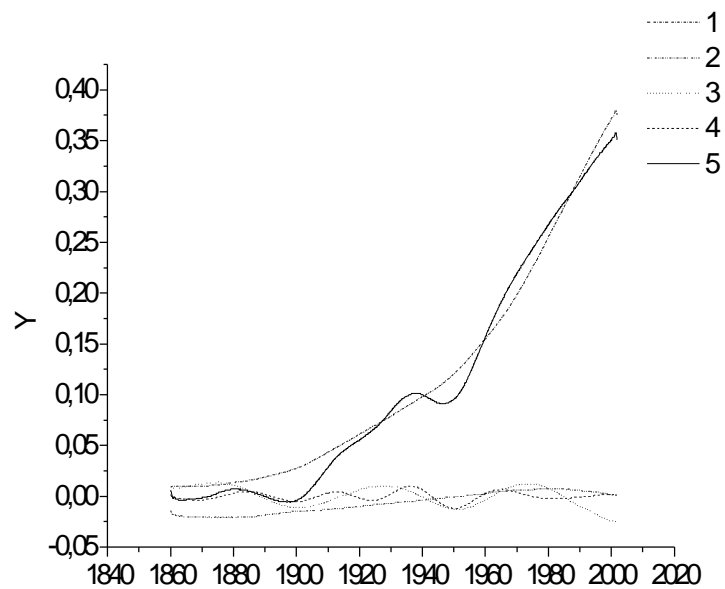


Рис.8.б. Составляющие медленного изменения координаты Y.  
Суммарный тренд обозначен непрерывной линией (5).

Разделение ряда на компоненты с помощью этого метода позволило провести модельный эксперимент [7], показавший, что при использовании модели с нелинейным параметром вязкости годовая компонента и остатки могут являться возбуждающим свободную нутацию фактором.

## Литература:

1. Сидоренков Н.С., *Влияние Южного колебания Эль-Ниньо на возбуждение чандлеровского движения полюса*, АЖ, 1997, т. 74, в. 5, с. 792 –795.
2. Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.), *Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница»*, 1997, СПбГУ, с. 308.
3. Горшков В.Л., Миллер Н.О., Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я., 2000, *Исследование геодинимических рядов методом главных компонент*, Изв. ГАО, №214, с. 173-180.
4. Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. *Исследование основных составляющих движения полюса земли*. В печати. Труды конференции ОИФЗ «Внутренние ядро – 2000».
5. Авсюк Ю.Н., *Приливные силы и природные процессы*, М., 1996, ОИФЗ РАН.
6. Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В., *Стационарные колебания амплитуды чандлеровской составляющей движения полюса Земли*, 2000, Тезисы конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века», с. 98-99.
7. Воротков М.В., Горшков В.Л., *Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения земли*. Настоящий сборник.

## SUMMARY

### THE INVESTIGATION OF THE MAIN COMPONENTS IN THE POLAR MOTION OF THE EARTH

M.V.Vorotkov, V.L.Gorshkov, N.O.Miller, E.Ja.Prudnikova

*The main components of the polar motion of the Earth were investigated by means of the modified singular spectral analysis (SSA) [2] applied to international data sets. For all sets the chandlerian and annual variations are the most powerful. The chandlerian wobble consists of two components. The first is stable by form and period (1.19 year). The second is less powerful and its period is varied essentially (1.1 – 1.3 year). The amplitudes of both components have significant variations. The main component with the stable period can be explained by generally accepted theory as the result of the free nutation [4]. From model examples it can be proposed that the second component have the form of the modulation function.*