

УДК 521.937

О режиме движения полюса Земли по данным за период 1962–2007 гг.

*Г.С. Курбасова*¹, *А.А. Корсунь*², *М.Н. Рыбалова*¹

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
gsk@simeiz.ylt.crimea.com

² Главная астрономическая обсерватория, Киев, Украина

Поступила в редакцию 15 декабря 2008 г.

Аннотация. Представление о полной детерминированности процесса движения полюса Земли за последние десятилетия подвергается сомнению из-за невозможности построения долгосрочного прогноза.

В то же время принципиальных ограничений в проблеме долгосрочного прогноза вращения Земли в настоящее время не существует.

Определенность границ предсказуемости связана с идентификацией режима движения полюса Земли.

С целью изучения режима движения полюса Земли использовались данные IERS за период 1962–2007 гг.

Анализ графиков полюдий обнаруживает особенности в изменении координат полюса X, Y на отдельных интервалах по оси времени.

Наиболее подробно приведен анализ данных на интервале с 2003 по 2006 гг.: построена модель чандлеровского и годового колебаний и определены соотношения между параметрами этих колебаний; исследовано смещение мгновенного полюса на фазовой плоскости и плоскости Пуанкаре.

В результате были обнаружены признаки, присущие хаотическому движению (переменяемость), и вычислен период (32 года) возможных повторений подобных аномалий, что подтверждает анализ графиков полюдий.

Интервалы проявления особенностей в движении мгновенного полюса Земли сопоставлены с интервалами перегибов на графике изменений длительности суток (LOD).

ABOUT THE MODE OF MOVEMENT OF THE POLE OF THE EARTH ON TO THE DATA FOR PERIOD 1962–2007, *G.S. Kurbasova, A.A. Korsun', M.N. Rybalova*. Submission of full determinancy motion poles of the Earth over the past decade is questionable. The reason for doubt is the impossibility of constructing a long-term prognosis.

Basic restrictions in the problem of long-term projection rotation of the Earth does not currently exist.

IERS data for the period 1962–2007 to study the poles of the Earth's motion were used.

Analysis of graphs polody especially in changing Pole coordinates X, Y at the selected intervals along the axis of time reveals.

Analysis of data on the interval from 2003 to 2006 detail is given. Model chandlerovskogo and annual fluctuations built. Offset instantaneous pole on the phase plane and Poincare plane is investigated.

Signs of a chaotic motion (alternation) found. Interval appearances features calculated. Dates of singularities in the motion of poles of instantaneous Earth compared to the changes length of day (LOD).

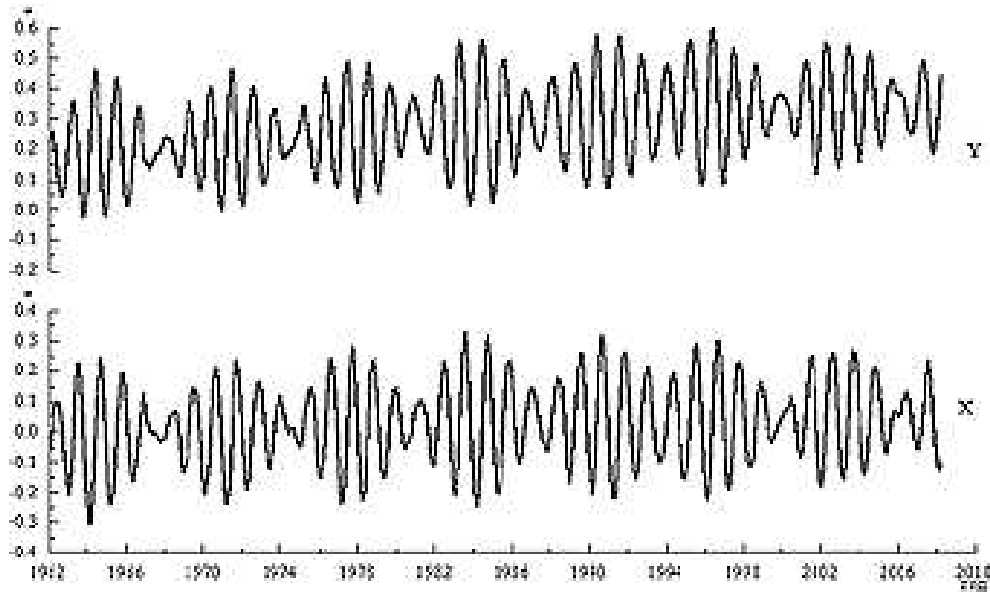


Рис. 1. Координаты полюса X, Y на интервале с 1962 по 2008 гг. (источник данных – Международная служба вращения Земли и опорных систем, IERS)

Ключевые слова: Полюс, координаты, Земля, колебания, цикл

1 Введение

Общепринятая модель движения мгновенного полюса Земли (IERS) описывает поведение динамической системы, основу которой составляют вековая и две периодические компоненты: годовая и чандлеровская.

В случае динамической системы предсказание или прогноз ее эволюции является практической, а не теоретической проблемой, т. к. эта эволюция полностью детерминирована и устранение погрешностей определения исходного состояния возможно на основе экспериментальных данных.

Тем не менее существующие отклонения теоретической модели движения полюса от высокоточных наблюдений за последние десятилетия ограничивают возможности построения длительного прогноза и вызывают сомнения относительно возможности полной детерминированности процесса движения полюса. Источником этих сомнений служит нерегулярный характер вращения Земли, обусловленный влиянием различных внешних и внутренних факторов, среди которых – вариации приливного потенциала, обусловленного действием небесных тел, изменения моментов импульсов ветров, течений, таяния ледников, влияние годового цикла возбуждения атмосферы, процессы в мантии и ядре, землетрясения и др.

Учет всех значимых внешних и внутренних факторов, вызывающих вариации координат полюса Земли на больших интервалах времени, является сложной математической задачей, решение которой зависит от полноты знаний о природе возмущающих процессов и методов математического моделирования их влияния на вращение Земли. В общем виде в настоящее время эта задача не решена, поэтому исследование отклонений координат полюса от упорядоченного процесса, выявление физических условий появления этих отклонений необходимо для уточнения режима движения полюса Земли на длительных интервалах времени.

В настоящей работе обсуждаются результаты изучения режима движения полюса Земли по данным о мгновенных координатах X, Y за период с 1962 по 2007 гг.

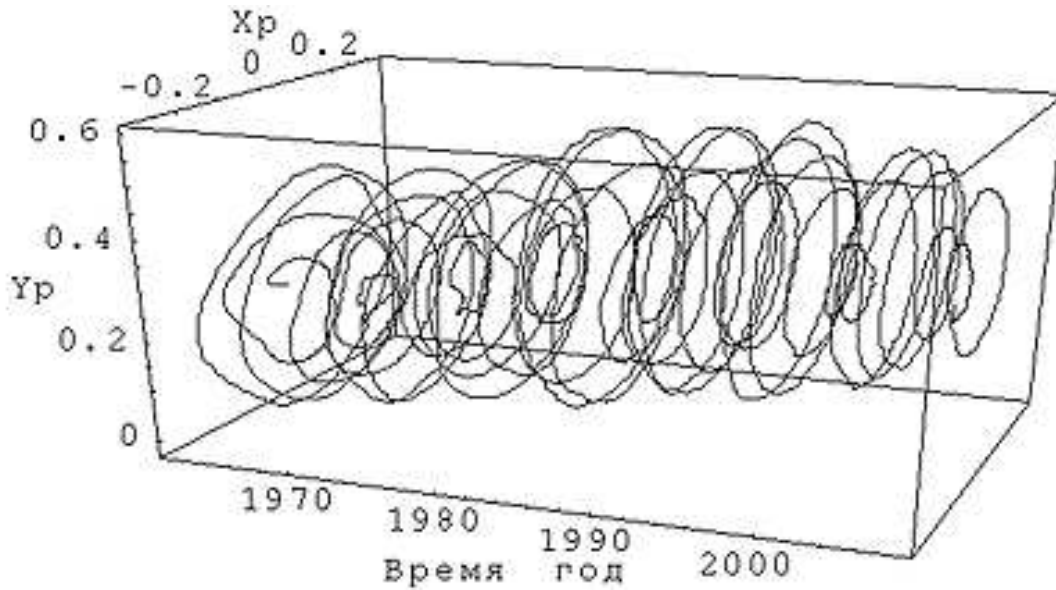


Рис. 2. Трехмерное изображение исходных данных

2 Анализ исходных данных

Графики исходных данных о движении мгновенного полюса Земли X , Y (см. рис. 1) описывают процесс наложения вынужденного колебания с периодом 1 год на собственное (чандлеровское) колебание Земли.

Сравним изображенный на графиках процесс с выводами теории для случая недемпфированных колебаний, когда собственная частота и частота возмущения мало отличаются друг от друга, а математическое описание имеет вид:

$$x = -\frac{2x_0}{1-\eta^2} \sin \frac{\eta-1}{2} \tau \sin \frac{\eta+1}{2} \tau, \quad (1)$$

где x_0 – начальная амплитуда, η – отношение частот, τ – безразмерное время.

Амплитуда огибающего колебания в этом случае изменяется по закону

$$A(t) = -\frac{2x_0}{1-\eta^2} \sin \frac{\eta-1}{2} \tau, \quad (2)$$

а временной интервал между двумя минимумами колебаний типа биений вычисляется по формуле:

$$\tau_s = \frac{2\pi}{\eta-1}. \quad (3)$$

На приведенных графиках координат полюса X , Y наблюдаются отклонения от регулярного режима биений: интервалы между минимумами биений не постоянны, закон изменения амплитуды огибающего колебания отклоняется от строго периодического.

Степень проявления нерегулярностей отражают графики положений полюса Земли в плоскости X , Y (полюдии) (рис. 3).

На рис. 3, (3) и рис. 3, (8) наблюдаются резкие отклонения от гладкой кривой (особенности). Проведем детальный анализ движения полюса на интервале с 2005 г. по 2008 г. (рис. 4, (а)).

Более детальное графическое изображение движения полюса на интервале появления особенностей приведено на рис. 4, (б).

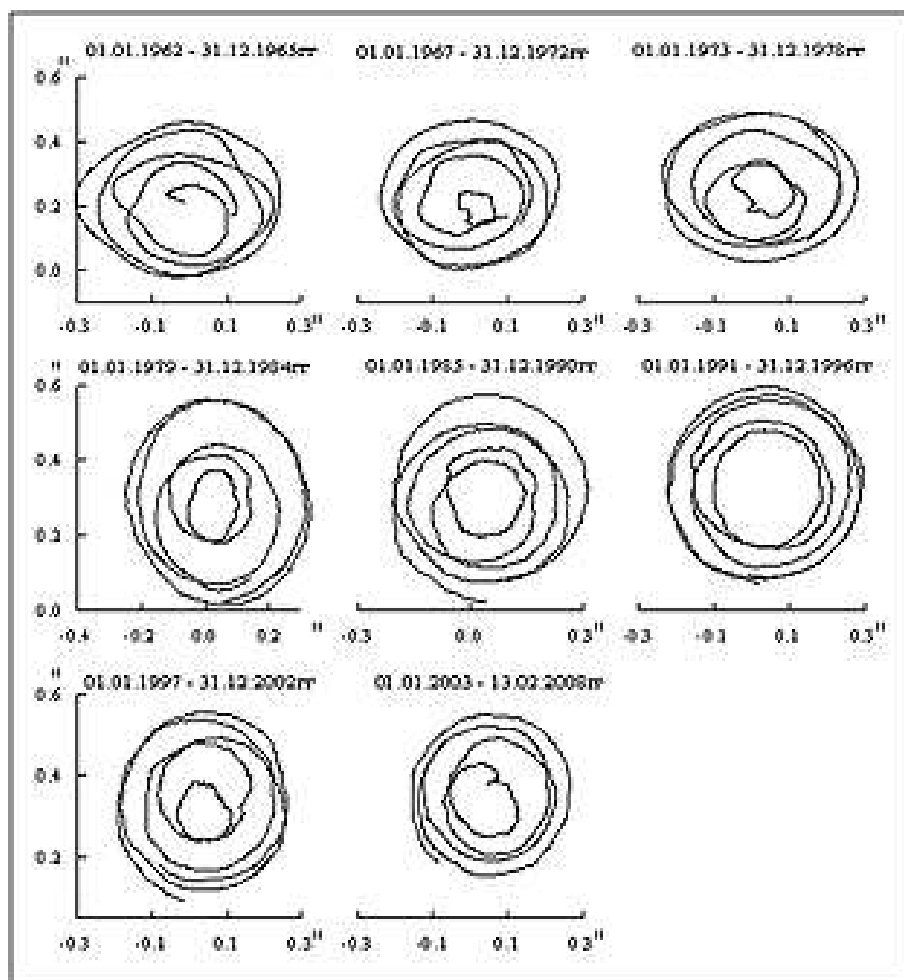


Рис. 3. График полудий 1962–2008 гг.: X – по оси абсцисс, Y – по оси ординат

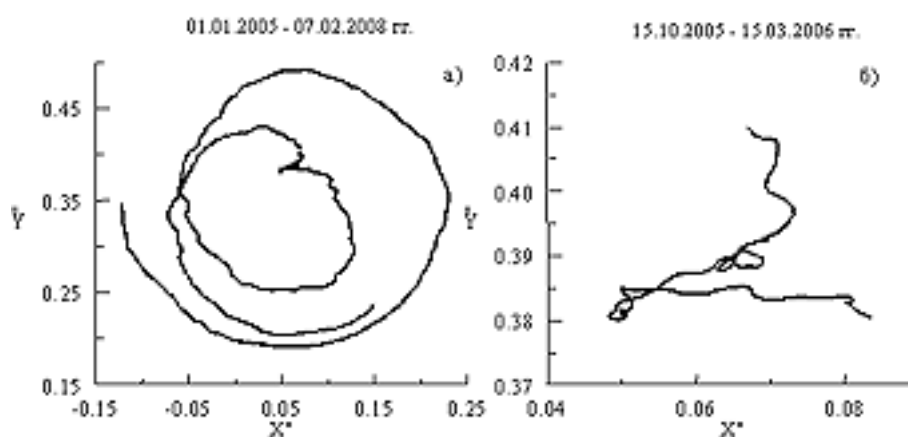


Рис. 4. Нерегулярность движения мгновенного Северного полюса на интервале 2005–2008 гг.: а) полудии на интервале 2005–2008 гг.; б) более детальное изображение движения полюса на интервале аномалии

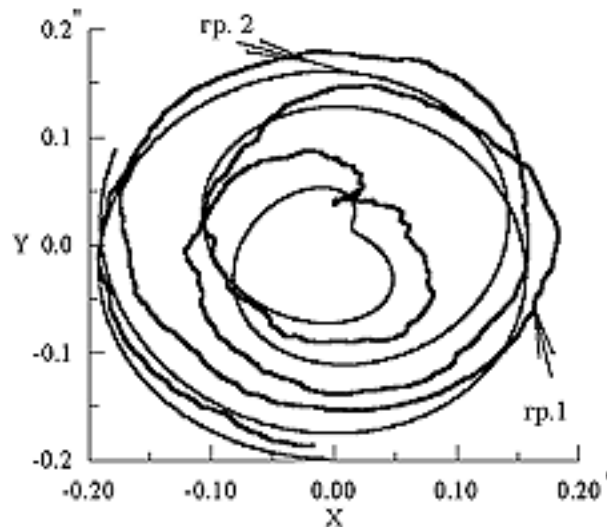


Рис. 5. Гр. 1. – X, Y на интервале 2004–2008 гг.; гр. 2 – X, Y, вычисленные по модели, состоящей из суммы основных колебаний (чандлеровское + годовое)

3 Локальная модель

Построим локальную модель, используя суточные данные о движении полюса за период с 2004 г. по 2008 г. Погрешность отклонения исходных данных от построенной модели не превышает 10 %.

При этом, если принять во внимание только сумму основных колебаний (чандлеровское + годовое), то на графике полюдий появляется характерный излом (рис. 5, гр. 2). Полная модель с большей точностью приближает исходные данные.

Локальная модель позволяет сопоставить параметры основных колебаний.

Результаты сопоставления параметров основных колебаний в точке поворота (05.12.2005 г.) приведены на рис. 6. В окрестности точки поворота наблюдается противофазное колебание основных составляющих с амплитудами 0.09'' (годовое колебание) и 0.13'' (чандлеровское колебание). Период чандлеровского колебания в локальной модели на интервале аномалии равен 445 сут.

Вариации параметров основных колебаний вызывают существенные изменения характера суммарного колебания, что показано на рис. 7.

4 Аномальные смещения полюса и сопутствующие природные процессы

Изменение периода собственных колебаний (чандлеровского) вызвано изменением упругих свойств и динамического сжатия Земли в системе Земля – Луна – Солнце. В то же время изменение амплитуды этого колебания происходит под действием внешних сил, в том числе атмосферы, гидросферы и др. Поэтому существует обратная связь между изменениями параметров вращения Земли и характеристик атмосферы.

На рис. 8 приведены графики изменений X, Y и глобального интегрального углового момента атмосферы (УМА) (<http://www.cdc.noaa.gov>).

С целью установления статистической взаимосвязи между движением мгновенного полюса и интегральным угловым моментом атмосферы был проведен двухканальный авторегрессионный спектральный анализ. Статистическая значимость связи оценивалась путем вычисления амплитуды квадрата модуля когерентности (КМК) соответствующих функций спектральной плотности мощности. Результаты вычислений обнаруживают статистическую взаимосвязь: на частоте чандлеровского колебания КМК = 75 % и на частоте годового и полугодового колебаний КМК = 90 %.

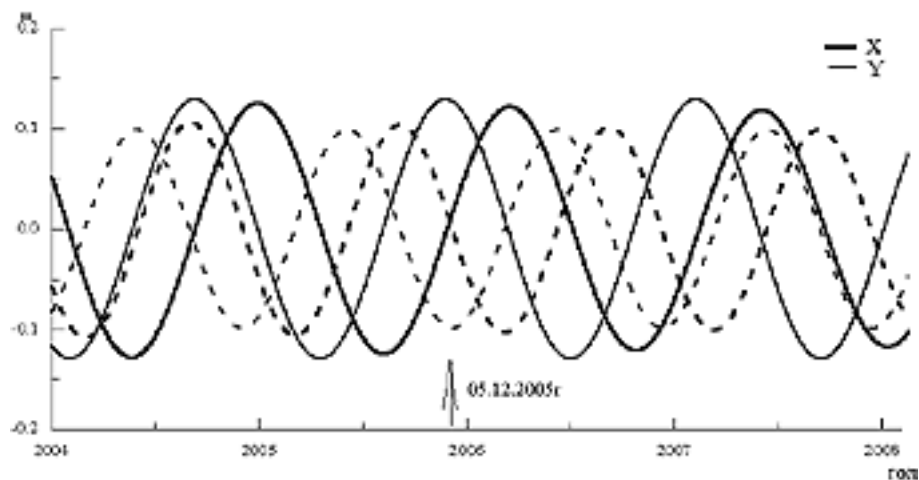


Рис. 6. Графики чандлеровской (сплошная линия) и годовой (пунктирная кривая) составляющих локальной модели. Отмечена дата экстремального отклонения на графике пологий

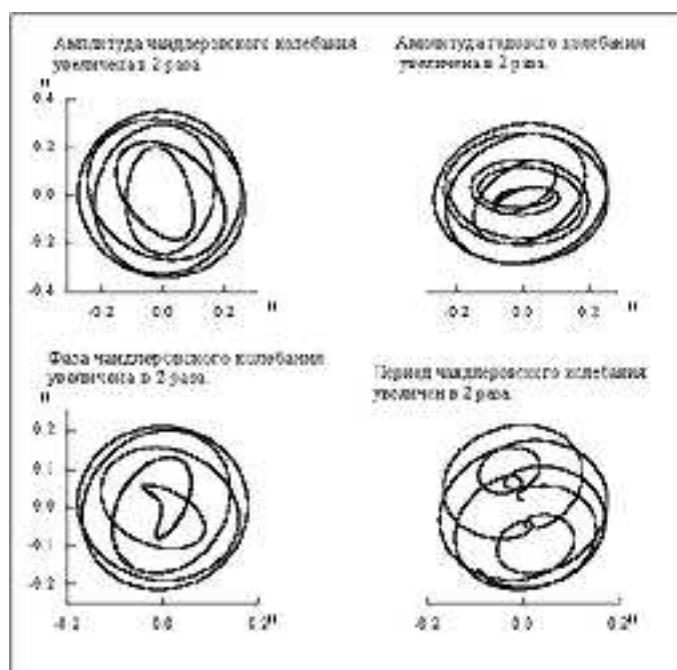


Рис. 7. Графики пологий, вычисленные по локальной модели (сумма двух основных колебаний) с вариациями параметров

Кроме атмосферы на изменение параметров чандлеровского колебания влияют внутренние процессы. Индикатором изменений физических процессов внутри Земли служат землетрясения с амплитудой более 7 баллов. В таблице 1 приведены наиболее мощные землетрясения за период 2004–2008 гг. Землетрясения с магнитудой 9 баллов по шкале Рихтера около Суматры привело не только к рождению огромной приливной волны, но и к изменению рельефа дна Индийского океана. Сблизившиеся с огромным выбросом энергии тектонические плиты образовали на дне океана тысячекилометровый рубец, высота которого достигает 6 м. По мнению ученых такой мощный толчок не

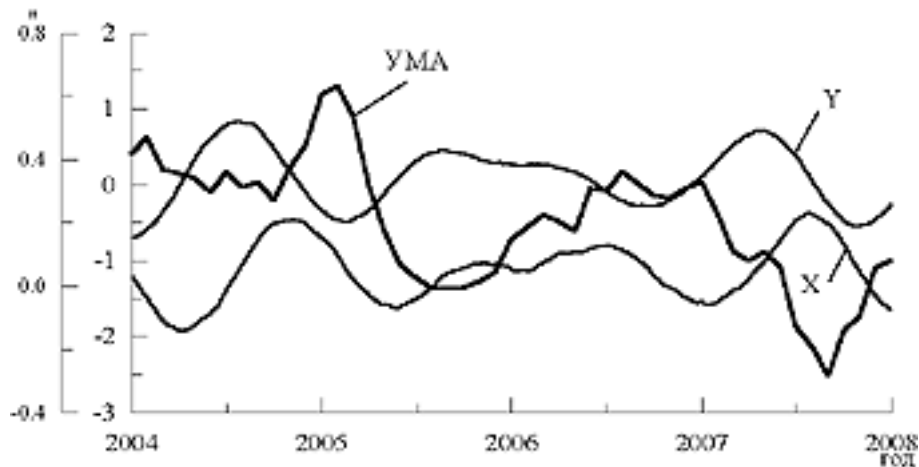


Рис. 8. Графики изменений X, Y и глобального интегрального углового момента атмосферы (УМА)

мог не привести к изменению гравитационного поля планеты (<http://elementy.ru/news/>).

Согласно оценкам Сабонини и Виф из Миланского университета, величина этого “гравитационного взрыва” (по их оценке геоид прогнулся почти на 18 миллиметров) примерно соответствует изменениям, которые по прогнозам должны произойти в течение ближайших шести лет по мере таяния ледниковых полей Патагонии (Чили, Южная Америка). Независимо от того, что спровоцировало мощные землетрясения на рассматриваемом интервале времени, результатом явилось перераспределение момента импульса между ядром, различными геофизическими и атмосферными оболочками Земли. Изменения физических свойств тела Земли вызвало замедление чандлеровского (собственного) колебания, сказалось на режиме движения мгновенного полюса Земли. Для количественных подтверждений сказанного, в отсутствие строгой теории изменения основных колебаний вращательного движения Земли, необходимы исследования гравитационного поля Земли из космоса с помощью специальных спутников типа GOSE (www.esa.int).

Таблица 1. Землетрясения с магнитудой 8 и более баллов за период 2004–2007 гг.

	Дата-UTC-Время	Широта	Долгота	Магнитуда	Место
1	2004-12-23 14:59:00	-49.312	161.345	8.1	Маккуори
2	2004-12-26 00:58:00	3.295	95.982	9.1	Суматра
3	2005-03-28 16:09:00	2.074	97.013	8.6	Индонезия
4	2006-05-03 15:26:00	-20.187	-174.123	8.0	Тонго
5	2006-11-15 11:14:00	46.592	153.226	8.3	Курильские острова
6	2007-01-13 04:23:21	46.243	154.524	8.1	Исландия
7	2007-04-01 20:39:58	-8.466	157.043	8.1	Соломоновы острова
8	2007-08-15 23:40:57	-13.386	-76.603	8.0	Перу
9	2007-09-12 11:10:26	-4.438	101.367	8.5	Индонезия

5 Идентификация режима движения полюса

С целью идентификации режима движения мгновенного полюса (периодический, квазипериодический, хаотический) рассмотрена эволюция величин $\rho_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$ на фазовой плоскости (Мун, 1990). Фазовый портрет на рис. 9, (а) в целом обнаруживает регулярное движение с несколькими

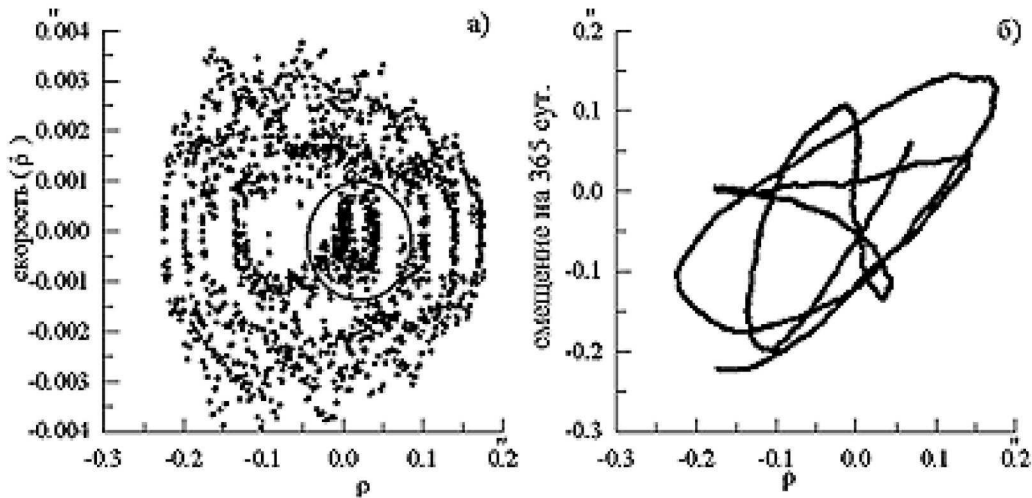


Рис. 9. Идентификация режима движения полюса по данным за период 01.01.2003–31.12.2006 гг.: а) фазовый портрет; б) отображение Пуанкаре

частотами. При этом разброс точек можно объяснить высокочастотным шумом, обусловленным неточным определением скорости $\dot{\rho}$.

В то же время в области аномалии, выделенной на рис. 9, (а), при детальном рассмотрении орбиты не замыкаются, стремятся заполнить некоторую область фазового пространства. Подобное блуждание орбит указывает на сложное движение в физической системе, возможно – хаос.

Более информативным в этом случае будет анализ отображения Пуанкаре (рис. 9, (б)). Для построения графика отображения Пуанкаре по оси ординат выполнена выборка данных с шагом 365 сут., т. е. соответствующим периоду вынуждающей силы. Траектория отображения Пуанкаре до нарушения регулярности представляет собой непрерывную замкнутую фигуру (в пределах исследуемого интервала времени). Такое движение называется “квазипериодическим”. Однако далее следует гомоклиническая траектория с пересечением квазипериодической орбиты. Пересечение устойчивого и неустойчивого многообразий при отображении Пуанкаре порождает в окрестности каждой гомоклинической структуры изображение типа подковы. Отображения этого типа приводят к непредсказуемости, что является признаком хаоса (Шустер, 1988).

Интервалу возможного хаотического колебания соответствуют изменения параметров основных колебаний и их огибающей.

В этом случае можно предположить, что, возникнув при определенных изменениях параметров, хаотический процесс через недолгий промежуток времени вырождается в квазипериодическое движение (перемежаемость).

Если считать перемежаемость предхаотическим состоянием, то всплески нерегулярностей можно оценить по изменению некоторого параметра системы. В частности, в качестве критического параметра выберем период чандлеровского колебания 445 сут. Тогда интервал появления нерегулярностей можно ожидать равным:

$$\tau = \frac{k}{\sqrt{1 - \omega_{кр}^2}}, \quad (4)$$

где $\omega_{кр}$ – частота колебания с периодом 1.218 год (445 сут.), а $k = 18.3$ – безразмерный коэффициент.

Согласно (4) величина $\tau = 32$ года. Тогда похожие особенности в движении полюса должны наблюдаться в 1973, 1941, 1909, 1877, 1845 годах. На рис. 3 в период 1973–1974 гг. наблюдается характерный поворот графика полодий. Аналогичные отклонения были обнаружены в 1941, 1909 гг.

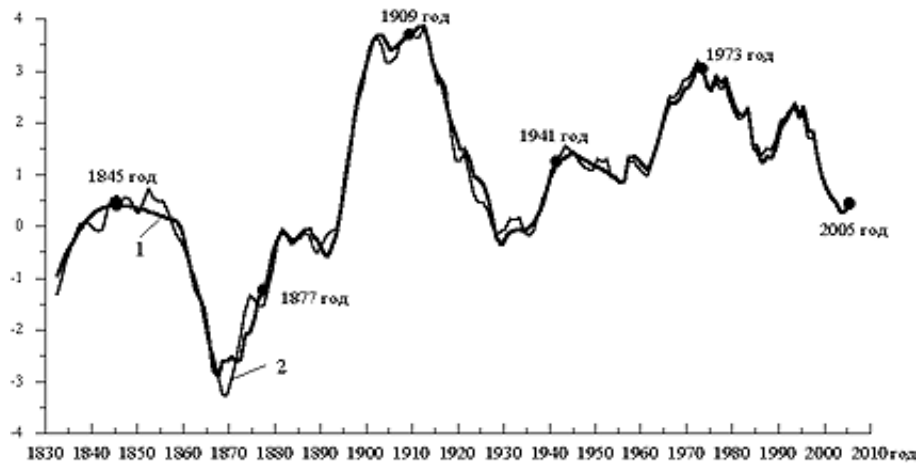


Рис. 10. Длительность суток LOD на интервале 1832 по 2005 год; 1 – данные IERS, 2 – данные NASA. Точками отмечены годы, в которые наблюдались особенности в движении полюса Земли

Присущие динамической системе нерегулярности в смещении мгновенного полюса Земли носят общий характер и проявляются в изменении скорости вращения Земли.

Сопоставление периодов нерегулярностей в движении полюса с экстремальными отклонениями длительности суток от стандартных указывает на связь этих событий. На графике отклонений длительности суток от стандартных (рис. 10) точками отмечены годы, в которые наблюдались особенности в движении полюса Земли.

6 Заключение

1. Возможность классификации природы колебаний мгновенного полюса Земли лежит в основе предсказания его поведения в будущем.
2. Анализ экстремальных данных показал, что режим движения полюса на рассмотренном в работе интервале времени можно отождествить с квазипериодическим или “движением на торе”.
3. В то же время анализ экспериментальных данных на интервале аномалии на графике полудий (с 2003 г. по 2006 г.) выявляет ряд признаков, присущих хаотическому движению: концентрация точек и незамкнутость орбит на фазовой плоскости в области аномалии, появление гомоклинических структур в отображении Пуанкаре, удвоение отклонений периода изменения амплитуды огибающей кривой от периода вынуждающей силы.
4. В предположении хаотического движения на интервале особенностей в движении полюса был вычислен период ($T = 32$ года) возможных их повторений и выполнена проверка повторяемости подобных нерегулярностей в прошлом. Аналогичные отклонения от регулярного режима с точностью 1–2 года наблюдаются в 1973, 1941, 1909 гг. В более ранние периоды анализ аномалий затруднен из-за неточности исходных данных.
5. Результаты проведенного в настоящей работе моделирования суммарного колебания (чандлеровского и годового) с изменением начальных параметров показал, что выявленные особенности присущи самой динамической системе. В этом случае на интервалах возможного предхаотического режима наблюдается повышенная чувствительность к малым внешним возмущениям, что обеспечивает в системе переход к периодическому режиму.

Литература

Мун Ф. // Хаотические колебания. М.: Мир. 1990.

Шустер Г.Д. // Детерминированный хаос. М.: Наука. 1989.