



## IRREGULARITIES IN THE DISPLACEMENT OF THE EARTH'S GEOGRAPHIC POLE AND JERKS IN THE GEOMAGNETIC FIELD

G.S. Kurbasova , A.E. Volvach  

Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, 1 Shuleykin St, Katsiveli 298688, Republic of Crimea, Russia

**ABSTRACT.** There are presented the results of analysis of some irregularities in the series of displacement coordinates on the Earth's surface for the geographic North Pole in order to relate them temporally to some global jerks in the geomagnetic field. The calculations were made using the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) data on the average daily motions of the North Pole from 1962 to 2021 and the information on global jerks in the geomagnetic field measured by the magnetic observatories throughout the world. The identification and analysis of the irregularities in the pole displacement along the Earth's surface were performed by the Fourier Method and wavelet methods for time series analysis, methods of fixed threshold determination and minimax analysis of the non-Gaussian noise, phase and pseudo-phase space methods, and stroboscopic methods of construction of Poincare maps.

The analysis of local Fourier spectra and wavelet-spectra reveals irregularities in the displacement of the North Pole in the time intervals from 1967.04.09 to 1967.11.30, from 1974.03.29 to 1974.09.12, and from 2005.11.03 to 2006.03.07. It is supposed that energy reconstructions which caused short-term pole deviations from the trajectory and starting to follow its previous trajectory at the return points are related to the specific features of oscillatory interactions in the process of the translational-rotational motion of the Earth's in the Solar System. The time of marking specific points on graphs of the displacement of the pole along the surface of the Earth in 1967 and 1974 is ahead of global geomagnetic jerk occurrence times.

**KEYWORDS:** Earth; pole; phase plane; irregularities; global jerks

**FUNDING:** Not specified.



### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Alexandr E. Volvach, [volvach@bk.ru](mailto:volvach@bk.ru)

Received: December 9, 2021

Revised: October 24, 2022

Accepted: November 11, 2022

**FOR CITATION:** Kurbasova G.S., Volvach A.E., 2023. Irregularities in the Displacement of the Earth's Geographic Pole and Jerks in the Geomagnetic Field. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (2), 0696. doi:10.5800/GT-2023-14-2-0696

## НЕРЕГУЛЯРНОСТИ В СМЕЩЕНИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ И ДЖЕРКИ В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г.С. Курбасова, А.Е. Вольвач

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298688, пгт Кацивели, ул. Шулейкина, 1, Республика Крым, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Приведены результаты анализа некоторых нерегулярностей в сериях координат смещения по поверхности Земли географического Северного полюса с целью установления временной связи их появления с некоторыми глобальными джерками в геомагнитном поле. В расчетах использовались среднесуточные данные о движении Северного полюса Международной службы вращения Земли (IERS) с 1962 по 2021 г., а также информация о появлении глобальных джерков в геомагнитном поле на всех магнитных обсерваториях земного шара. Для выявления и анализа нерегулярностей в движении полюса по поверхности Земли использовались методы Фурье и вейвлет-анализа временных рядов, методы определения порога фиксированной формы и минимаксный в процедуре анализа негауссовского шума, методы фазового и псевдофазового пространства, а также стробоскопический метод построения отображения Пуанкаре.

Анализ локальных спектров Фурье и вейвлет-спектров выявляет нерегулярности в смещении Северного полюса по поверхности Земли на интервалах времени: 1967.04.09 – 1967.11.30, 1974.03.29 – 1974.09.12, 2005.11.03 – 2006.03.07 гг., сопоставимые с появлением глобальных джерков в 1969, 1978 гг. и локального джерка в 2005 г. Полагается, что энергетические перестройки, вызвавшие кратковременные отклонения смещения полюса от траектории и возвращение на прежнюю траекторию в точках возврата, связаны с особенностями взаимодействия колебаний в процессе вращательно-поступательного движения Земли в Солнечной системе. Время появления особых точек на графиках смещения полюса по поверхности Земли в 1967 и 1974 гг. опережает время появления глобальных джерков в геомагнитном поле.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Земля; полюс; фазовая плоскость; нерегулярности; глобальные рывки

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Не указано.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет происхождение главного магнитного поля считается одной из нерешенных и актуальных проблем геофизики. Изучение причин, порождающих экстремальные явления в геомагнитном поле, вносит значимый вклад в решение этой проблемы. К экстремальным явлениям относятся джерки (jerks – английское слово, принятое в международных публикациях со времени открытия этого явления и обозначающее резкие изменения первой производной во временных рядах измерений параметров геомагнитного поля). Многочисленные гипотезы о возможном происхождении джерков и корреляции их с различными глобальными геофизическими явлениями составляют в настоящее время предмет дискуссий.

Вековая вариация, в которой наблюдаются геомагнитные джерки, является небольшой частью постоянных флуктуаций (порядка 20 %) величины и направления главного геомагнитного поля с периодами от десятков до тысячелетий [Parkinson, 1986]. По существующим исследованиям можно полагать, что подобные колебания происходили на протяжении всей истории Земли. Геомагнитные джерки были отмечены в наблюдениях вековых вариаций Винсентом Кортийо и Жаном-Луи Муэлем в 1976 г. [Courtillet, Le Mouél, 1976, 1984]. Самые явные, наблюдаемые во всем мире, произошли в 1969, 1978, 1991 гг. Данные до 1969 г.

более скудны, но есть свидетельства других глобальных джерков в 1901, 1913 и 1925 гг. В 1932, 1949, 1958, 1986 и 2003 гг. были зафиксированы локальные геомагнитные джерки в некоторых частях мира [De Michelis et al., 2005; Alexandrescu et al., 1999; Olsen, Manda, 2008]. Авторы работы [Olsen, Manda, 2008] сделали вывод о существовании еще одного локального джерка в 2005 г. на юге Африки.

Одной из возможных причин появления импульсных изменений в природных временных рядах считаются резонансные или близкие к резонансным состояния. В реальной консервативной, но нелинейной системе Земля условия резонанса между близкими по частоте и амплитуде колебаниями могут изменяться под влиянием вынуждающей силы.

В случае вращательно-поступательного движения реальной системы Земля – Луна происходит взаимодействие различных близких по частоте колебаний. Характер этих взаимодействий и производимое ими влияние на смещение полюса по поверхности Земли на различных интервалах времени изучены недостаточно.

Одним из методов получения информации о спектральном составе временных рядов координат полюса Земли является анализ амплитудно-частотных спектров Фурье, к недостаткам которого относится невозможность получить информацию о пространственно-временном изменении спектрального состава временных

рядов. Недостатки этого метода компенсирует непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ временных рядов.

В настоящей работе представлены результаты выполненного нами анализа временных рядов смещения Северного полюса по поверхности Земли. Цель этого анализа состояла в обнаружении импульсных изменений на траектории регулярного смещения полюса и в сопоставлении времени их появления с глобальными джерками в геомагнитном поле. По результатам проведенного анализа моментов появления особых точек в 1967, 1974, 2005 гг. на траекториях смещения полюса по поверхности Земли и глобальных джерков в 1969, 1978 гг., а также локального джерка в 2005 г. в вековых вариациях геомагнитного поля сделан вывод о возможной связи порождающих их процессов.

## 2. ДАННЫЕ

Для анализа в настоящей работе использовались данные о суточных координатах  $x_p$  и  $y_p$  (рис. 1), представляемые Международной службой вращения Земли и опорных систем (IERS, <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>).

Движение полюса IERS определяется ежедневно с погрешностью порядка  $0.5 \cdot 10^{-4}$  угловых секунд для координат и порядка  $0.1 \cdot 10^{-4}$  секунды для длительности суток. Данный уровень точности определений положения полюса позволяет обнаружить малые возмущения траектории движения его по поверхности Земли.

Для сопоставления нами использовалась информация и данные о времени появления джерков в геомагнитном поле из работы [Pinheiro et al., 2011]. В этой работе на основании всесторонних исследований данных

измерений параметров геомагнитного поля в магнитных обсерваториях всего земного шара сделан вывод: рывки 1969, 1978 и 1991 гг. были обнаружены глобально, а события 1999 и 2005 гг. – только локально.

## 3. АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ФУРЬЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ $x_p$ И $y_p$

На рис. 2 приведены графики амплитудно-частотных спектров Фурье данных  $x_p$  и  $y_p$ , полученные с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Как видно из рисунка, в графиках спектров присутствуют два наиболее мощных колебания с близкими частотами  $f_1=0.002319$  сут,  $f_2=0.002747$  сут и соответствующими им амплитудами  $A_1=0.12''$ ,  $A_2=0.08''$ . Первое колебание принято называть чандлеровским колебанием, второе – годовым.

Предположим, что временные ряды  $x_p$  и  $y_p$  воспроизводятся слабодиссипативной консервативной системой Земля, которая находится под гармоническим воздействием внешней силы и которая имеет собственную частоту колебаний. Тогда наблюдаемые в спектре Фурье (рис. 2) гармоника не должны расширяться.

На рис. 2 обнаруживается расширение спектров, и особенно в полосе малых амплитуд. Это в какой-то степени связано с присутствием в данных  $x_p$  и  $y_p$  «небелого шума», который может вносить вклад в условия протекания энергетических обменных процессов.

Так как «белый шум» удален, определим дискретные статистики «небелого шума». С этой целью используем методы определения порога фиксированной формы и минимаксный метод в процедуре вейвлет-преобразования данных  $x_p$  и  $y_p$  [Donoho, 1995; Donoho et al., 1996]. В методе порога фиксированной формы в

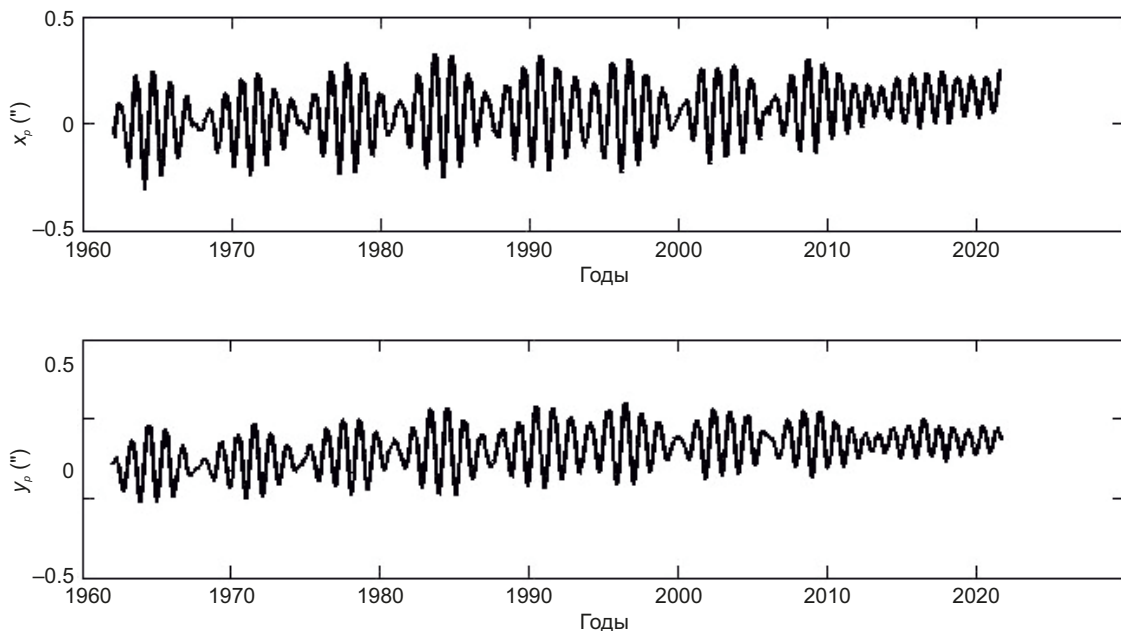
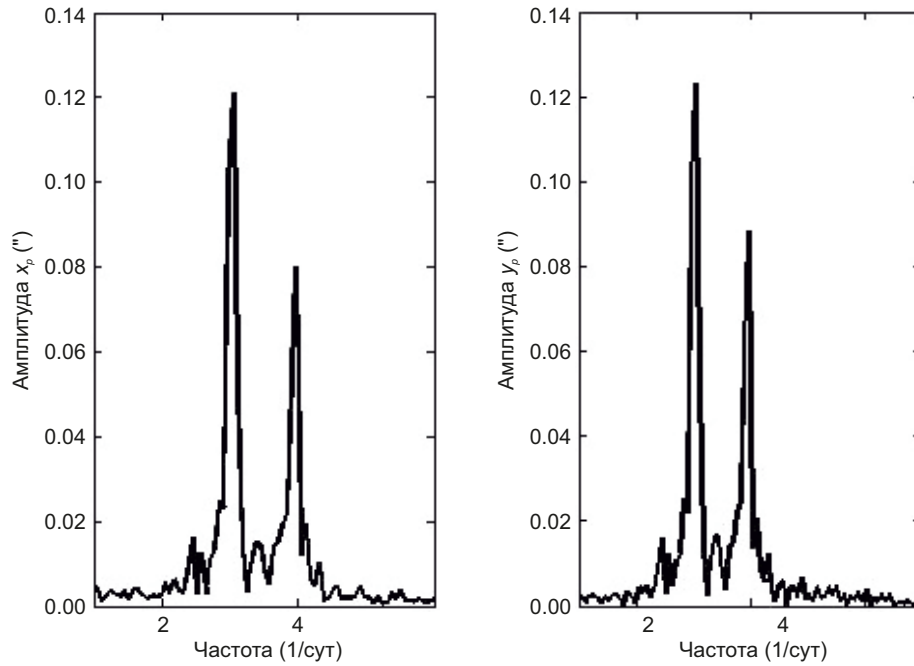


Рис. 1. Графики  $x_p, y_p$  смещения Северного полюса по поверхности Земли. Единица отсчетов по оси времени одни сутки.

Fig. 1.  $x_p, y_p$  graphs of displacement of the North Pole along the Earth's surface. The unit of measurement along the time axis is a day.



**Рис. 2.** Спектр Фурье данных  $x_p, y_p$  (см. рис. 1).  
**Fig. 2.** The Fourier spectrum of  $x_p, y_p$  data (see Fig. 1).

**Таблица 1.** Оценки дискретных статистик «небелого шума» в данных  $x_p$  и  $y_p$  двумя методами  
**Table 1.** Two methods of estimation of discrete values of "non-white noise" in  $x_p$  and  $y_p$  data

Статистики	Порог фиксированной формы		Минимаксный метод	
	$x_p$ (")	$y_p$ (")	$x_p$ (")	$y_p$ (")
Среднее	0	0	0	0
Медиана	$2.844 \times 10^{-6}$	$3.578 \times 10^{-6}$	$2.844 \times 10^{-6}$	$3.602 \times 10^{-6}$
Мода	-0.0001749	-0.000136	$-8.828 \times 10^{-5}$	$-6.679 \times 10^{-5}$
Максимум	0.01102	0.008104	0.007574	0.007719
Минимум	-0.01011	-0.007443	-0.008063	-0.006432
Размах	0.02113	0.01555	0.01564	0.01416
Стандарт. откл.	0.0006315	0.0004564	0.0006112	0.0004529
Мед. абс. откл.	0.00028263	0.0002278	0.0002826	0.0002278
Сред. абс. откл.	0.0004236	0.000318	0.0004218	0.0003177
L1 норм. уров.	9.224	6.926	9.185	6.918
L2 норм. уров.	0.09319	0.06735	0.09019	0.06683
Макс. норм. уров.	0.01102	0.008104	0.008063	0.007719

процессе вейвлет-преобразования для каждого уровня детализации от 1 до N выбирается порог, который применяется к коэффициентам детализации. В минимаксном методе используется фиксированный порог, выбранный для получения минимаксных характеристик среднеквадратической ошибки по сравнению с идеальной процедурой. Дискретные статистики «небелого шума» приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных в табл. 1 величин, «небелый шум» превышает уровень погрешности определения координат  $x_p$  и  $y_p$ .

Так как спектр Фурье отражает усредненный на заданном временном интервале процесс, исследуем перестройки спектра со временем. С этой целью разделим исходные данные на шесть последовательных временных серий длительностью ~4000 отсчетов.

Рис. 3, а, б, демонстрирует процесс эволюции спектров мощности. На этих графиках частота  $f$  приведена в сутках, по вертикальной оси отложена нормированная мощность.

Спектральные оценки мощности колебаний в сериях I, II, V, VI (рис. 3, а, б) указывают на присутствие

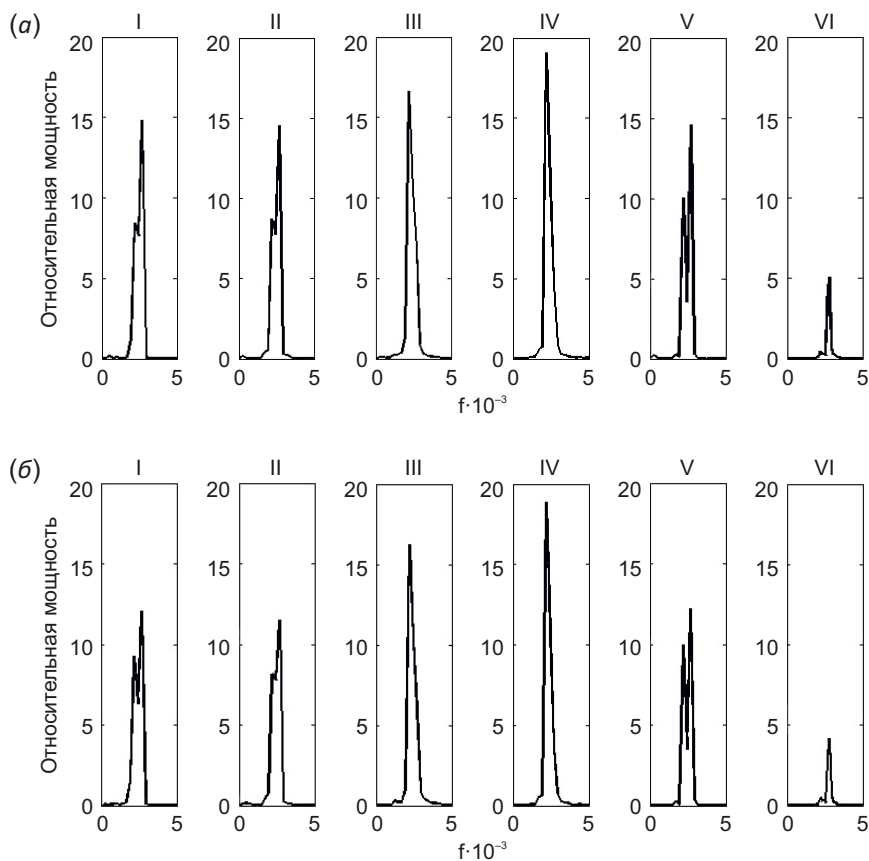


Рис. 3. Графики спектров мощности для шести серий данных  $x_p$  (а) и  $y_p$  (б).

Fig. 3. Graphs of power spectra for six  $x_p$  (a) and  $y_p$  (б) data series.

Таблица 2. Спектральные оценки амплитуд двух колебаний в шести сериях временных рядов  $x_p$  и  $y_p$   
 Table 2. Spectral estimations of two oscillation amplitudes in six  $x_p$  and  $y_p$  time series

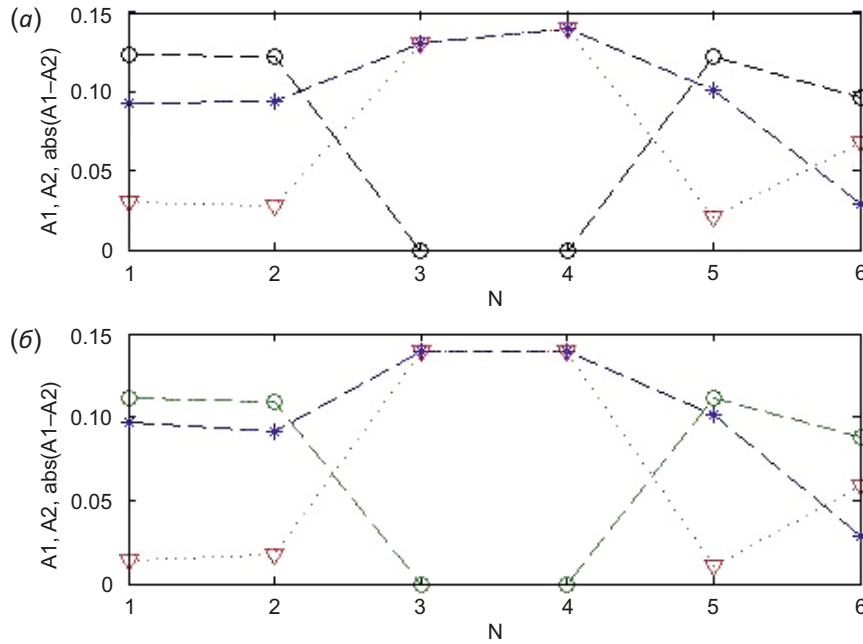
$A_1^{x_p}(\mu)$	$A_2^{x_p}(\mu)$	$A_1^{y_p}(\mu)$	$A_2^{y_p}(\mu)$	Серия
0.09294	0.1231	0.09736	0.1113	I
0.09437	0.1221	0.09136	0.1087	II
0.1305	0	0.1389	0	III
0.1398	0	0.1389	0	IV
0.1013	0.1221	0.1010	0.1117	V
0.02863	0.09603	0.02895	0.08763	VI

двух близких по частоте спектральных составляющих:  $\omega_1=0.002197$  сут,  $\omega_2=0.002686$  сут. В спектре данных III, IV обнаруживается одно наиболее мощное колебание с частотой  $\omega_1$ .

Сравним оценки амплитуд двух максимальных спектральных составляющих на рис. 3.

В табл. 2 приведены спектральные оценки амплитуд  $A_1$  колебания с частотой  $\omega_1=0.002197$  сут и амплитуд  $A_2$  колебания с частотой  $\omega_2=0.002686$  сут. Эти данные получены нами как максимальные величины на графиках амплитудно-частотных спектров шести серий координат  $x_p$  и  $y_p$ .

Графики изменения амплитуд  $A_1$  и  $A_2$ , а также их абсолютных разностей приведены на рис. 4. Пороговые величины абсолютных разностей амплитуд колебаний с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , предшествующих исчезновению колебания с частотой  $\omega_2$ , находятся в пределах от 0.03" до 0.02" в спектрах I, II данных  $x_p$  и от 0.017" до 0.011" в спектрах I, II данных  $y_p$ . После достижения амплитудой  $A_2$  максимального значения (спектры III, IV) в спектрах V, VI обнаруживаются оба колебания. Соответствующая этому переходу разность амплитуд в спектрах серии V составляет 0.02" в данных  $x_p$  и 0.011" в данных  $y_p$ .



**Рис. 4.** Графики амплитуд A1 (звездочки), A2 (кружки) и разностей abs (A1–A2), треугольники: (а) – данные  $x_p$ ; (б) – данные  $y_p$ . По горизонтальной оси отложены последовательные номера шести серий  $x_p$  и  $y_p$ . По вертикальной оси – спектральные величины амплитуд в угловых секундах.

**Fig. 4.** Amplitude curves A1 (asterisks), A2 (circles) and abs (A1–A2) difference chart, triangles: (a) –  $x_p$  data; (б) –  $y_p$  data. The horizontal axis is the sequence numbers of six  $x_p$  and  $y_p$  data series. The vertical axis is spectral amplitude values in angular seconds.

С помощью непрерывного частотно-временного преобразования получим эволюцию мощности колебательного процесса в каждой из шести серий данных.

#### 4. НЕПРЕРЫВНЫЙ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

На рис. 5 демонстрируются результаты проведенного авторами непрерывного частотно-временного вейвлет-разложения периодических колебаний в шести сериях данных  $x_p$  и  $y_p$ . Чувствительность вейвлетов к локальным характеристикам сигнала является важным преимуществом этого метода [Alexandrescu et al., 1995, 1996, 1999]. Визуальный анализ обнаруживает резкое снижение энергии колебаний на временных интервалах 1966–1969, 1973–1976, 2004–2008 лет в сериях данных I, II, V.

Для вычисления приведенных на рис. 5 графиков использовались вейвлеты из семейства «Пауля» (принятое сокращение 'raul') и разложения сигнала на пяти периодических составляющих [Torrence, Compo, 1998]. Отождествление масштабов и периодов соответствует приведенным в работе [Donoho et al., 1996] рекомендациям. Качественная оценка мощности определяется по интенсивности цвета: насыщенно-красный цвет отождествляется с наибольшей мощностью (амплитудой). Цветовой индикатор справа позволяет оценить относительный энергетический уровень гармоник.

Периодический процесс характеризуется плавным изменением мощности (амплитуды) колебаний. Наблюдаемые локальные отклонения от регулярности (см. рис. 4; рис. 6) служат указанием на возможность

непериодических и даже хаотических движений на этих интервалах времени [Berge et al., 1991].

Для выявления непериодических или, возможно, хаотических движений, помимо анализа эволюции спектров Фурье, в работе [Moon, 1990] рекомендуется построить графики эволюций на фазовой плоскости и отображение Пуанкаре.

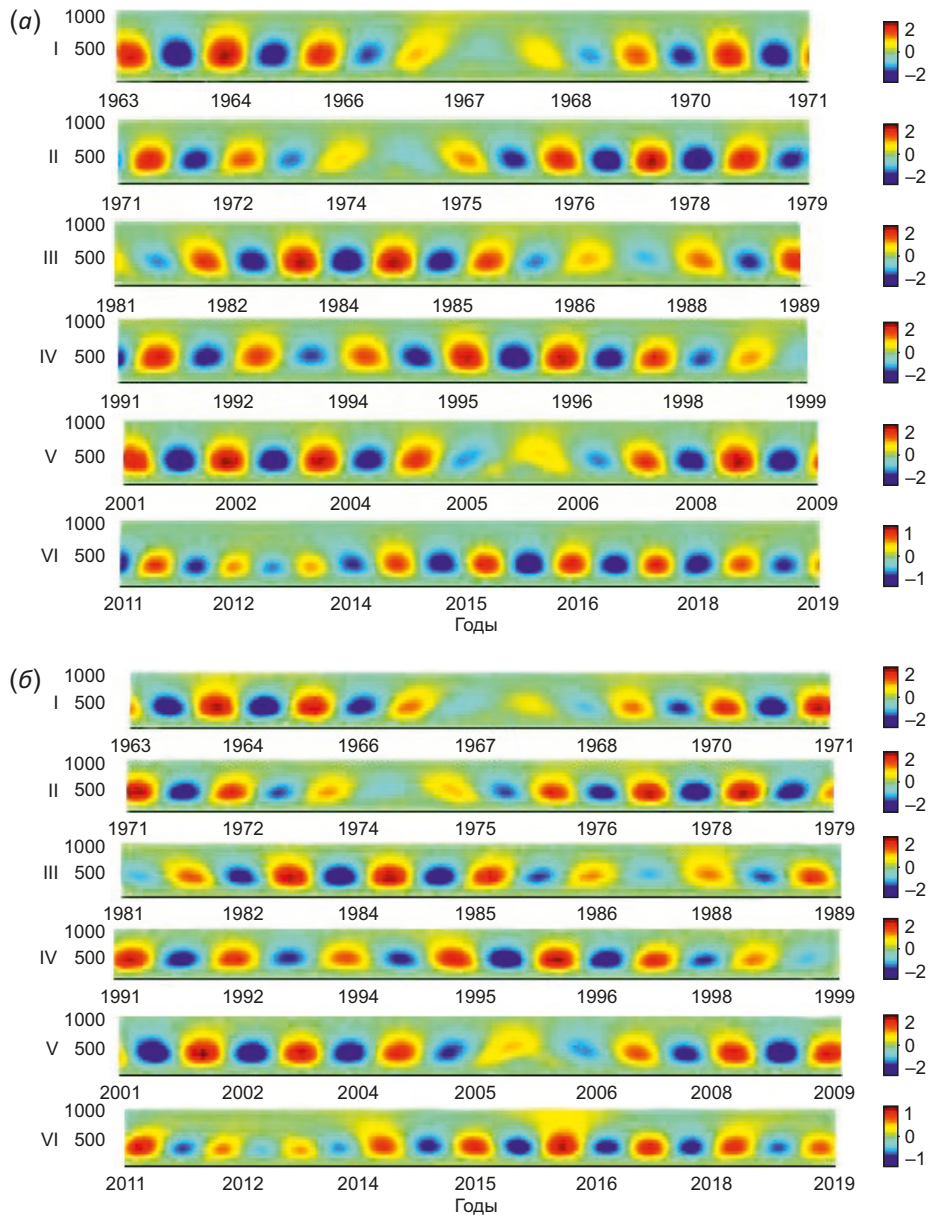
#### 5. ЭВОЛЮЦИЯ НА ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ

В проекциях на плоскость пространственных траекторий смещения Северного полюса по поверхности Земли в сериях I, II, V наблюдаются кратковременные отклонения от регулярной кривой в виде особенностей с точками возврата или критическими [Arnol'd, 1975, 1990]. На рис. 6 приведены проекции на плоскость ( $x_p, y_p$ ) части данных в сериях I, II, V с резкими отклонениями от траекторий.

Построим фазовые плоскости только для этих серий данных.

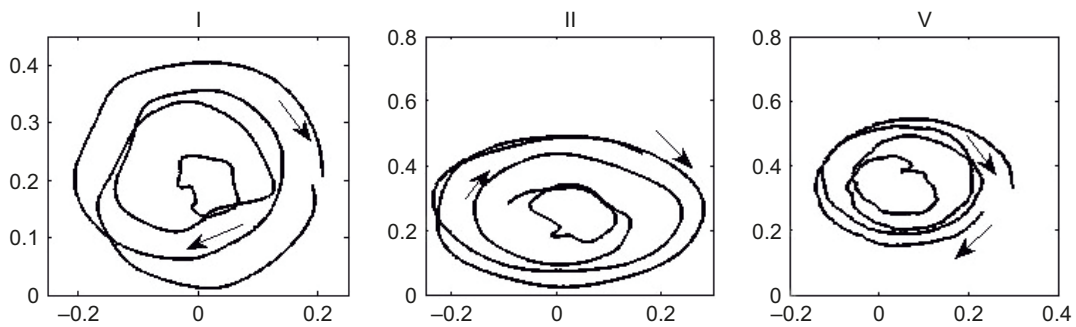
Проведем анализ фазовых траекторий, определяемых как множество точек ( $x_p, \dot{x}_p$ ) и ( $y_p, \dot{y}_p$ ). На рис. 7 демонстрируется эволюция смещений на фазовой плоскости для серий  $x_p$  (а) и  $y_p$  (б).

Анализ фазовых портретов на рис. 7 позволяет сделать вывод: орбиты не замыкаются на плоскости, пересекаются, не повторяются, концентрируются в некоторой области фазовой плоскости, образуя лакуны, особенно это относится к фазовым портретам для серии данных V, фазовый портрет которых отличается от серий I, II большей вариабельностью смещений. Полученные изображения на фазовой плоскости не



**Рис. 5.** Графики непрерывного частотно-временного вейвлет-преобразования шести серий данных: (а) –  $x_p$ , (б) –  $y_p$ . По вертикальным осям приведены периоды в сутках. Единицы отсчета по горизонтальным осям – одни сутки.

**Fig. 5.** Graphs of continuous wavelet time-and-frequency transformation of six data series: (а) –  $x_p$ , (б) –  $y_p$ . The vertical axes are the periods in days. The units of measurement along the horizontal axes are a day.



**Рис. 6.** Проекция траекторий смещения полюса по поверхности Земли на плоскость (полодии). На горизонтальных осях отложены координаты  $x_p$ , на вертикальных – координаты  $y_p$ . Единицы измерений – угловые секунды.

**Fig. 6.** Projections of displacement trajectories of the pole along the Earth's surface onto the plane (polhodes). The horizontal axes are  $x_p$  coordinates, the vertical –  $y_p$  coordinates. The units of measurement are angular seconds.

характерны для периодических движений. На возможное квазипериодическое движение накладываются отклонения, характерные для хаотического движения. Проверим это предположение, построив фазовые портреты другим методом.

Так как анализируемые нами серии данных представляют собой одномерные временные ряды, используем возможность построения фазовых плоскостей методом псевдофазового пространства с временной

задержкой [Moon, 1990]. Этот метод изучения эволюции на фазовой плоскости состоит в построении зависимости сигнала от его же величины в другой момент времени, отстающий от данного момента или опережающий его на постоянную величину  $T$ , отличную от заведомо известных периодов. На рис. 8 приведены графики координат смещения полюса (серии I, II, V) на псевдофазовой плоскости для задержки по времени  $T=1000$  суток.

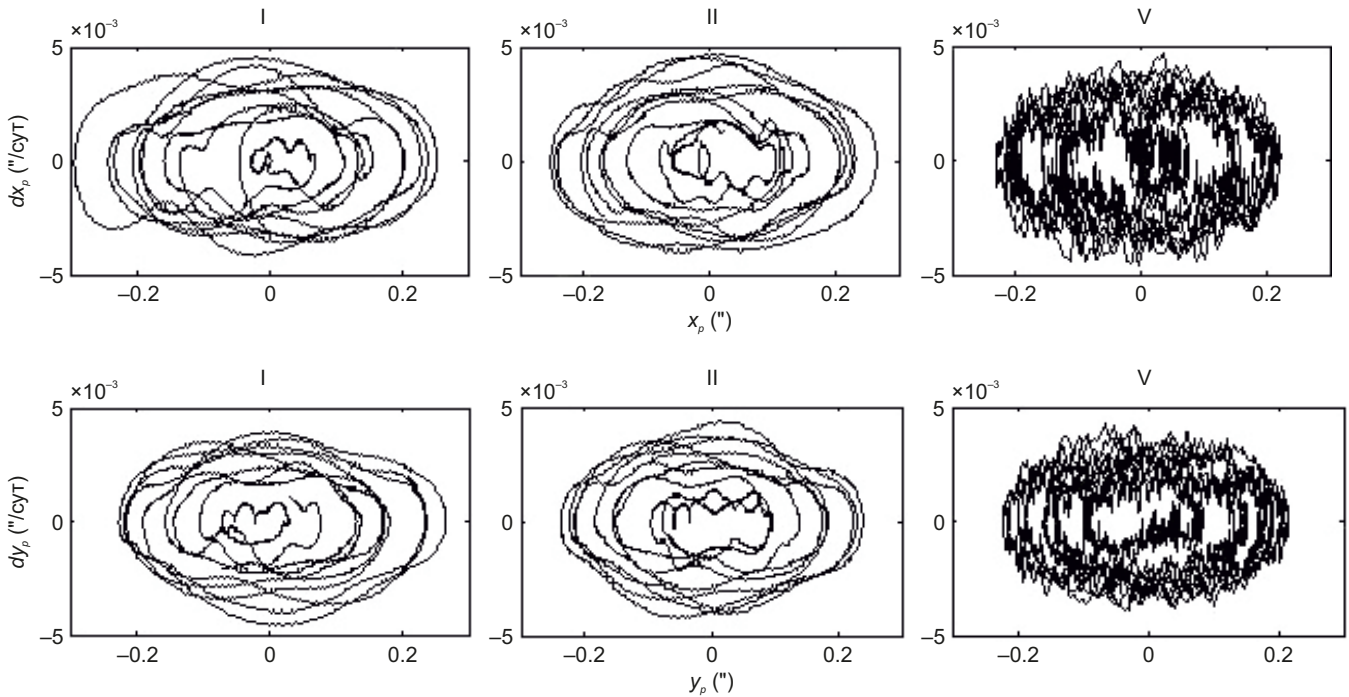


Рис. 7. Эволюция смещений на фазовой плоскости по данным I, II, V серий.

Fig. 7. Displacement evolution on the phase plane from the I, II and V series data.

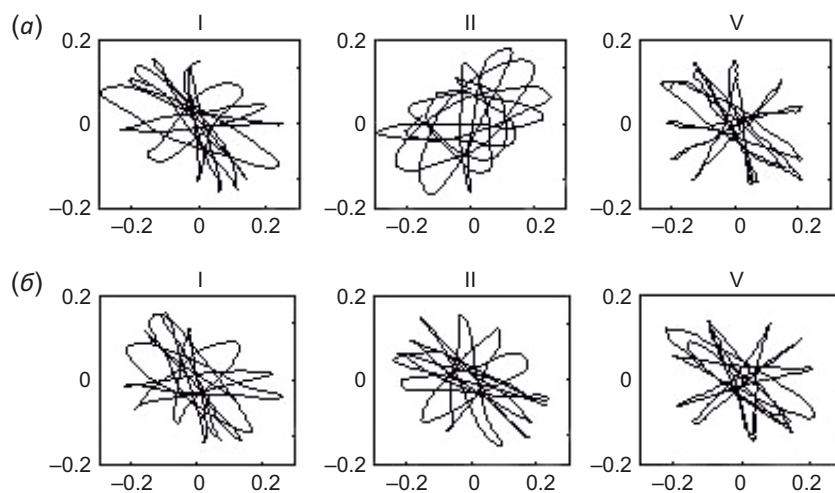


Рис. 8. Траектории смещения полюса на псевдофазовой плоскости для опережения по времени  $T=1000$  суток. На горизонтальных осях отложены изменения во времени координаты  $x_p$  (а) и координаты  $y_p$  (б). На вертикальных осях – те же координаты, заданные с опережением на постоянную величину  $T$ . Единицы измерений  $x_p, y_p$  – угловые секунды.

Fig. 8. Displacement trajectories of the pole on the pseudo-phase plane for time advance  $T=1000$  days. The horizontal axes are temporal variations of  $x_p$  (a) and  $y_p$  (b) coordinates. The vertical axes are the same coordinates assigned with constant  $T$  advance. The units of measurement for  $x_p$  and  $y_p$  are angular seconds.



Анализ фазовых портретов на рис. 8 показывает, что орбиты фазовых траекторий не замыкаются, не повторяются, стремятся заполнить некоторую область фазового пространства. Подобное блуждание орбит указывает на хаос. Тем не менее непрерывные графики на фазовой плоскости недостаточно информативны.

Более совершенным методом исследования фазовых портретов считается метод Пуанкаре. Временные ряды  $x_p$  и  $y_p$  воспроизводятся сложной динамической системой Земля. Анализируя эти временные ряды, мы не располагаем информацией о фазовом пространстве реальной динамической системы, которая необходима для построения сечения Пуанкаре. Предполагая одномерные временные ряды  $x_p$  и  $y_p$  независимыми, используем простой метод стробоскопирования сигнала для построения плоскостей Пуанкаре [Berge et al., 1991, с. 92]. На рис. 9 приведены плоскости Пуанкаре,

построенные нами для временных рядов  $x_p$  (рис. 9, а) и  $y_p$  (рис. 9, б) с 1962 г. по настоящее время. На этих рисунках точки Пуанкаре распределяются неравномерно на плоскости. Их расположение на плоскости не соответствует строго периодическому движению, состоящему из двух периодических колебаний, как это следует из спектра Фурье на рис. 2.

Плоскости Пуанкаре, построенные выборкой данных из серий данных I, II, V, приведены на рис. 10.

Независимо от природы этих периодов (вынужденные или собственные колебания), расположение точек Пуанкаре на фазовой плоскости (рис. 10) указывает на отсутствие регулярного периодического или даже квазипериодического смещения. В этом случае можно говорить о кратковременной потере относительной устойчивости с последующим восстановлением регулярного режима.

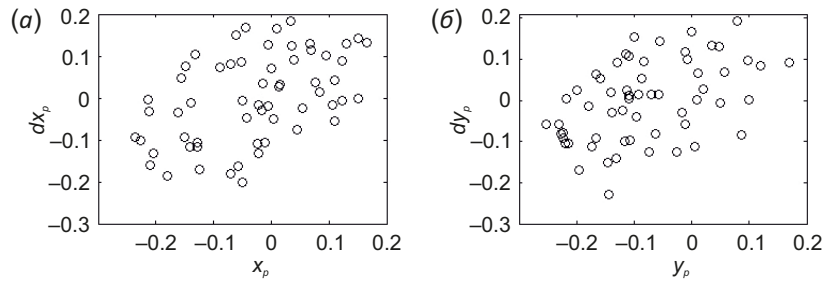


Рис. 9. Плоскости Пуанкаре: стробоскопическая выборка с периодом 365 суток из исходных серий  $x_p$  (а),  $y_p$  (б).  
 Fig. 9. Poincare planes: a stroboscopic 365-day-period sample from initial  $x_p$  (a) and  $y_p$  (б) series.

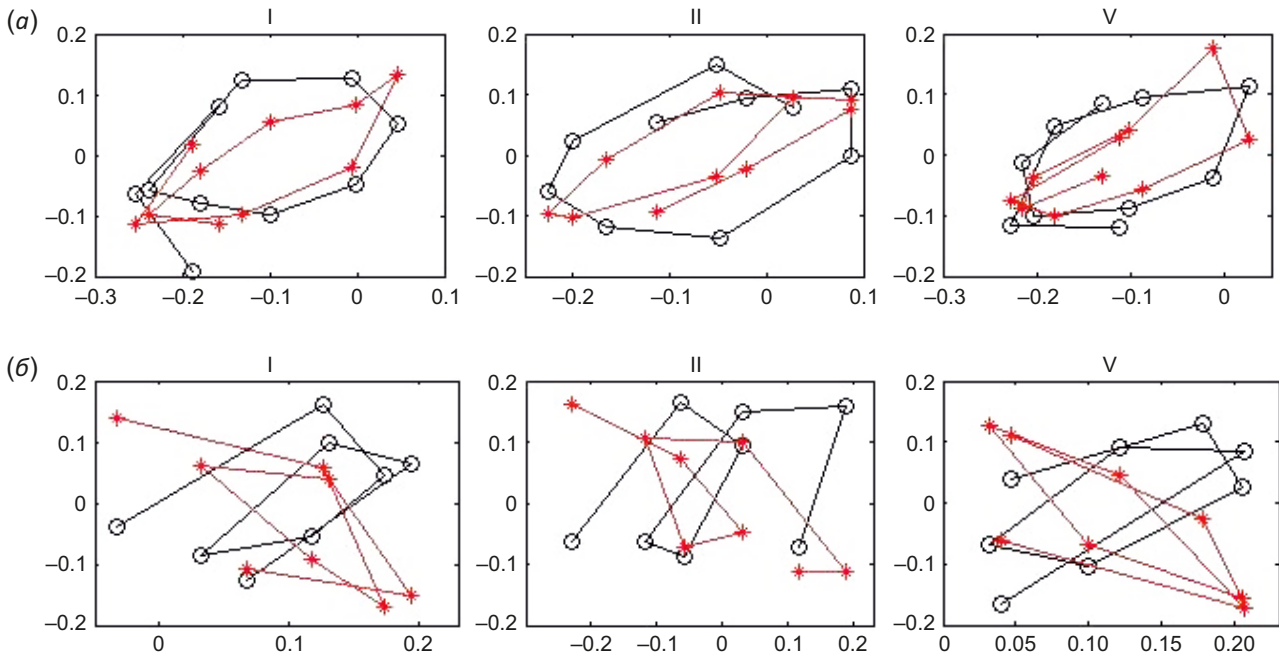


Рис. 10. Плоскости Пуанкаре: стробоскопическая выборка из I, II, V серий данных:  $x_p$  (черные шары) и  $y_p$  (красные звездочки). Периоды выборок: (а) – 372 сут ( $\omega_2=0.002686$  сут); (б) – 455 сут ( $\omega_1=0.002197$  сут). По горизонтальным осям отложены величины в угловых секундах; по вертикальным осям – производные  $\dot{x}_p, \dot{y}_p$  в угловых секундах/сутки.  
 Fig. 10. Poincare planes: a stroboscopic sample from I, II and V data series:  $x_p$  (black circles) and  $y_p$  (red asterisks). Sampling periods: (а) – 372 days ( $\omega_2=0.002686$  day); (б) – 455 days ( $\omega_1=0.002197$  day). The horizontal axes are angular seconds, the vertical axes are  $\dot{x}_p, \dot{y}_p$  derivatives in angular seconds/days.

## 6. ТОЧКИ ВОЗВРАТА В ПРОЕКЦИЯХ НА ПЛОСКОСТЬ $(X_p, Y_p)$ И ГЕОМАГНИТНЫЕ РЫВКИ

Согласно определениям, приведенным в работе [Arnol'd, 1990], под особенностями мы понимаем краткосрочные изменения знака первой производной на графиках траекторий смещения полюса Земли и возврат к предыдущему уровню значений или краткосрочный переход на другой уровень. При этом направление смещения полюса локально изменяется в точках возврата.

Появление точек возврата и возврат на регулярную траекторию, основные даты и координаты полюса

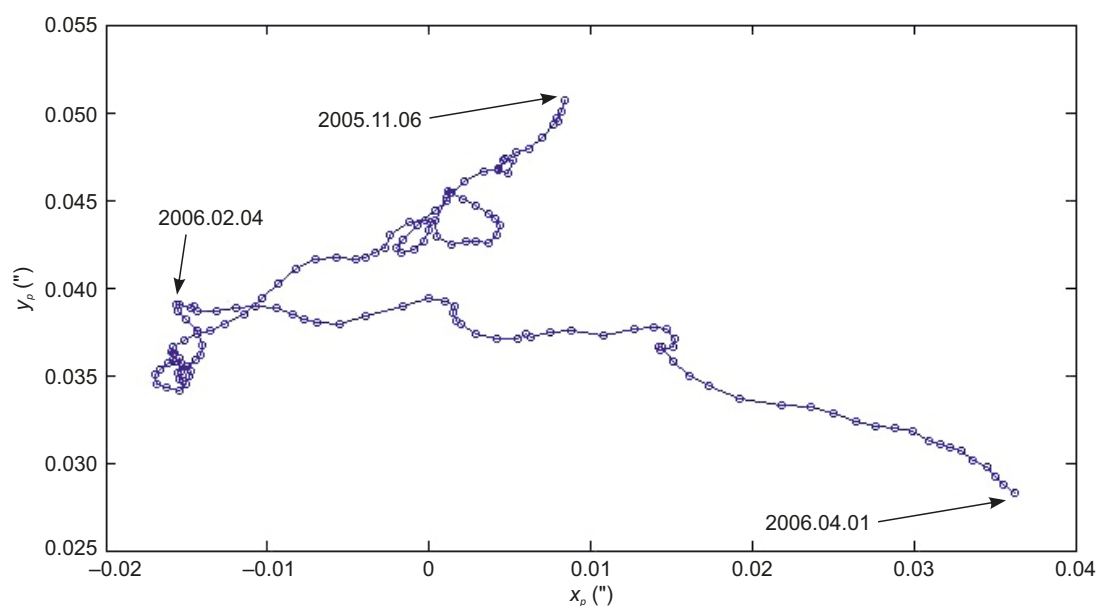
на интервалах возникновения особенностей в сериях I, II, V приведены в табл. 3. Характер смещения относительно регулярной траектории в V серии данных отличается от серий I, II блужданием орбиты и скачком фазы в данных, что позволяет допустить внешнее кратковременное влияние на этом временном интервале.

Время появления точек возврата в 1967, 1974 гг. на траектории смещения Северного географического полюса по поверхности Земли опережает время появления глобальных джерков в вековых вариациях геомагнитного поля в 1969, 1978 гг., вследствие чего можно

**Таблица 3.** Основные даты и координаты полюса на интервалах появления особенностей в сериях I, II, V  
**Table 3.** Key dates and basic coordinates of the pole on the feature emergence intervals in I, II and V series

Номер серии данных	Основные даты	Координаты $x_p$ (")	Координаты $y_p$ (")
I	1967.04.09	0.001527	0.1411
	<b>1967.05.11</b>	<b>-0.009665</b>	<b>0.1542</b>
	<b>1967.08.07</b>	<b>-0.01064</b>	<b>0.1894</b>
	1967.11.30	-0.2821	0.2152
II	1974.03.29	0.03832	0.1736
	<b>1974.06.06</b>	<b>-0.008857</b>	<b>0.1833</b>
	1974.09.12	0.008569	0.2083
V	2005.11.03	0.07302	0.3978
	<b>2006.01.12</b>	<b>0.04846</b>	<b>0.3808</b>
	2006.03.07	0.08075	0.3836

Примечание. Жирным шрифтом выделены даты появления критических точек.  
Note. The dates of the appearance of critical points are indicated by bold.



**Рис. 11.** Нерегулярность в смещении полюса по поверхности Земли в V серии данных: часть траектории с точкой возврата.  
**Fig. 11.** Irregularity in the pole displacement along the Earth's surface in V data series: a part of the trajectory with a return point.

допустить существование недостаточно изученной связи между особенностями вращения Земли и процессами в ее геомагнитном поле.

Джерк в 2005 г. зарегистрирован в Южной Африке как локальный. На этом временном интервале авторами обнаружено нетривиальное блуждание полюса по поверхности Земли (рис. 11), причина которого в настоящее время, как и появление локальных джерков, является предметом дискуссий.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В реальной консервативной, но нелинейной системе Земля условия резонанса между близкими по частоте и амплитуде колебаниями изменяются в зависимости от параметров взаимодействующих частот. При этом существуют интервалы времени, на которых обнаруживается только одна частота с максимальной амплитудой колебания (см. рис. 3, 4, 5).

Нерегулярности в смещении Северного полюса по поверхности Земли вызваны особенностями ее поступательно-вращательного движения. Влияние недостаточно изученных внешних и внутренних энергетических факторов создает полосу неопределенностей, которая сокращается с учетом поправок к модели IERS, полученных по высокоточным наблюдениям средствами космической геодезии.

Эволюция в системе Земля осуществляется благодаря нелинейности участвующих в ней физических процессов, поэтому изменения во времени любых параметров, определяющих эволюцию этой системы, наблюдаются как некоторый усредненный процесс (см. рис. 2). Взаимодействие периодических колебаний в системе Земля – Луна при определенном соотношении их параметров вызывает кратковременный переход регулярного движения через пороговые значения. Воспроизводимые при этом энергетические перестройки вызывают кратковременные отклонения от регулярного движения, что и наблюдается в сериях данных I, II, V (см. рис. 6).

Анализ характера смещения полюса на интервалах появления точек возврата (серии I, II, V) на фазовой плоскости и плоскости Пуанкаре указывает на отсутствие регулярного периодического или даже квазипериодического движения. В этом случае можно предположить кратковременный переходный хаос: движение, которое кажется хаотическим из-за обнаруживаемых на фазовой плоскости и по отображению Пуанкаре некоторых характерных для странного аттрактора свойств, со временем переходящее в регулярное движение [Moon, 1990].

Сопоставление времени появления точек возврата и глобальных джерков в геомагнитном поле допускает возможность когерентности процессов перераспределения энергии в различных внешних и внутренних вращающихся оболочках системы Земля. В современных публикациях предполагается возможность связи появления геомагнитных джерков с крутильными колебаниями в ядре Земли. Допускается когерентность

их появления с изменениями длительности суток [De Michelis et al., 2005], экстремальными процессами в параметрах ориентации Земли, атмосфере [Vondrak, Ron, 2014, 2015].

Установлено совпадение временных интервалов появления особенностей на траектории движения Северного полюса по поверхности Земли и глобальных джерков в вековой составляющей геомагнитного поля в 1969 и 1978 гг. В моделях сферических гармоник амплитуды этих джерков наиболее значимы [Pinheiro et al., 2011].

Анализ погрешностей в определении моментов возникновения геомагнитных джерков имеет существенное значение для установления причинно-следственных связей. Степень достоверности решения данной задачи для более ранних периодов ограничена: до 1962 г. измерения координат полюса и параметров геомагнитного поля имеют широкую полосу погрешностей.

При достижении энергетического порога в процессе взаимодействия близких по частоте колебаний в нелинейной системе Земля результат зависит от локальных характеристик взаимодействующих колебаний (см. рис. 4). Возникающие в этом случае особенности, как следует из работы [Arnol'd, 1975, 1990], повторяются.

Появление локальных джерков в параметрах геомагнитного поля, возможно, связано с энергетическими изменениями в локальном магнитном поле. Современные знания о причинах возникновения и исчезновения локального магнитного поля недостаточны для ответа на этот вопрос. В то же время нельзя отрицать связь этого процесса с глобальным геомагнитным и гравитационным полями. Так, например, в работе [Dobretsov et al., 2021] приводится обзор и анализ современных знаний о магнитном и гравитационном полях Земли как отражении глобальных и региональных тектонических процессов. Показано, что распределение характеристик главного магнитного поля Земли имеет качественное сходство с аномалиями гравитационного поля.

Необычное блуждание, наблюдаемое в смещении полюса по поверхности Земли на интервале 2005–2006 г., возможно, воспроизводится серией вспышек на Солнце. Установлен факт, что 7 сентября вспышка на Солнце (X9.3 балла), которую назвали одной из самых мощных за все время наблюдений, вызвала рост энергетических параметров геомагнитного поля [Volvach et al., 2022].

Глобальные электромагнитные колебания вызывают деформации в земной коре. При этом не исключается возможность триггерного воздействия на гравитационные процессы. Например, в геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия на сейсмичность, тектонические процессы Земли солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды [Gokhberg, Kolsnitsyn, 2010].

## 8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouël J.-L., Saracco G., 1995. Detection of Geomagnetic Jerks Using Wavelet Analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100 (B7), 12557–12572. <https://doi.org/10.1029/95JB00314>.
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouël J.-L., Saracco G., 1996. Worldwide Wavelet Analysis of Geomagnetic Jerks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101 (B10), 21975–21994. <https://doi.org/10.1029/96JB01648>.
- Alexandrescu M.M., Gibert D., Le Mouel J.-L., Hulot G., Saracco G., 1999. An Estimate of Average Lower Mantle Conductivity by Wavelet Analysis of Geomagnetic Jerks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104 (B8), 17735–17745. <https://doi.org/10.1029/1999JB900135>.
- Arnold V.I., 1990. *Catastrophe Theory. A Third Expanded Edition*. Nauka, Moscow, 128 p. (in Russian) [Арнольд В.И. Теория катастроф. Издание третье, дополненное. М.: Наука, 1990. 128 с.].
- Arnol'd V.I., 1975. Critical Points of Smooth Functions and Their Normal Forms. *Russian Mathematical Surveys* 30 (5), 1–75. <http://doi.org/10.1070/RM1975v030n05ABEH001521>.
- Berge P., Pomeau Y., Vidal Ch., 1991. *L'ordre Dans Le Chaos*. Mir, Moscow, 368 p. (in Russian) [Берже П., Помо И., Видал К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991. 368 с.].
- Courtillot V., Le Mouël J.-L., 1976. On the Long-Period Variations of the Earth's Magnetic Field from 2 Months to 20 Years. *Journal of Geophysical Research* 81 (17), 2941–2950. <https://doi.org/10.1029/JB081i017p02941>.
- Courtillot V., Le Mouël J.-L., 1984. Geomagnetic Secular Variation Impulses. *Nature* 311, 709–716. <https://doi.org/10.1038/311709a0>.
- De Michelis P., Tozzi R., Meloni A., 2005. Geomagnetic Jerks: Observation and Theoretical Modeling. *Memorie della Società Astronomica Italiana* 76, 957–960.
- Dobretsov N.L., Metelkin D.V., Vasilevskiy A.N., 2021. Typical Characteristics of the Earth's Magnetic and Gravity Fields Related to Global and Regional Tectonics. *Russian Geology and Geophysics* 62 (1), 6–24. <https://doi.org/10.2113/RGG20204261>.
- Donoho D.L., 1995. De-Noising by Soft-Thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory* 41 (3), 613–627. <https://doi.org/10.1109/18.382009>.
- Donoho D.L., Johnstone I.M., Kerkyacharian G., Picard D., 1996. Density Estimation by Wavelet Thresholding. *Annals of Statistics* 24 (2), 508–539.
- Gokhberg M.B., Kolosnitsyn N.I., 2010. The Trigger Mechanisms of Earthquakes. In: *Trigger Effects in Geosystems. Proceedings of the All-Russian Seminar Conference (June 22–24, 2010, Moscow)*. GEOS, Moscow, p. 52–61 (in Russian) [Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. Триггерные механизмы землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы всероссийского семинара-совещания (22–24 июня 2010 г., Москва). М.: ГЕОС, 2010. С. 52–61].
- Moon F.C., 1990. *Chaotic Vibrations*. Mir, Moscow, 312 p. (in Russian) [Мун Ф. Хаотические колебания. М.: Мир, 1990. 312 с.].
- Olsen N., Mandea M., 2008. Rapidly Changing Flows in the Earth's Core. *Nature Geoscience* 1, 390–394. <https://doi.org/10.1038/ngeo203>.
- Parkinson W.D., 1986. *Introduction to Geomagnetism*. Mir, Moscow, 528 p. (in Russian) [Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 528 с.].
- Pinheiro K.J., Jackson A., Finlay C.C., 2011. Measurements and Uncertainties of the Occurrence Time of the 1969, 1978, 1991, and 1999 Geomagnetic Jerks. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 12 (10), Q10015. <https://doi.org/10.1029/2011GC003706>.
- Torrence C., Compo G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (1), 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N., 2022. Time Series Analysis of Temperatures and Insolation of the Earth's Surface at Kara-Dag Using Satellite Observation. *Advances in Space Research* 69 (12), 4228–4239. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.016>.
- Vondrak J., Ron C., 2014. Geophysical Excitation of Nutation – Comparison of Different Models. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 11 (3), 1–8. <https://doi.org/10.13168/AGG.2014.0007>.
- Vondrak J., Ron C., 2015. Earth Orientation and Its Excitations by Atmosphere, Oceans, and Geomagnetic Jerks. *Serbian Astronomical Journal* 191, 59–66. <https://doi.org/10.2298/SAJ1591059V>.