

УДК 521.937

Г. С. Курбасова<sup>1</sup>, А. А. Корсунь<sup>2</sup>, М. Н. Рыбалова<sup>1</sup>,  
Г. Н. Шликать<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»  
98409 Крым, п. Научный

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

### Модель отклонений длительности суток от стандартных из года в год по данным за период 1832—2000 гг.

*Построена квазиполиномиальная модель среднегодовых отклонений  $\Delta D$  длительности суток от стандартного значения  $D = 86400$  с за период 1832—2000 гг. Основные составляющие в структуре модели представлены нелинейным трендом и колебаниями с периодами 64, 32 и 21 г. Математические модели основных колебаний описывают периодический процесс с медленно изменяющейся амплитудой. Приведены результаты двухканального авторегрессионного анализа с целью сравнительного анализа отклонений  $\Delta D$  и характеристик солнечной активности, процессов в магнитосфере, сейсмической активности Земли. Обсуждается вопрос о возможных источниках и механизмах возбуждения основных колебаний длительности суток.*

*МОДЕЛЬ ВІДХИЛЕНЬ ТРИВАЛОСТІ ДОБИ ВІД СТАНДАРТНИХ З РОКУ В РІК ЗА ДАНИМИ ЗА ПЕРІОД 1832—2000 РР., Курбасова Г. С., Корсунь А. О., Рыбалова М. М., Шликать Г. М. — Побудовано квазі-поліноміальну модель середньорічних відхилень  $\Delta D$  тривалості доби від стандартного значення  $D = 86400$  с за період 1832—2000 рр. Основні складові у структурі моделі подано нелінійним трендом і коливаннями з періодами 64, 32 і 21 р. Математичні моделі основних коливань описують періодичний процес із амплітудою, що повільно змінюється. Приведені результати двоканального авторегресійного аналізу з метою порівняльного аналізу відхилень  $\Delta D$  та характеристик сонячної активності, процесів у магнітосфері, сейсмічній активності Землі. Обговорюється питання про можливі джерела і механізми збудження цих коливань.*

*THE MODEL OF DAY DURATION DEVIATIONS FROM THE STANDARD ONES FROM YEAR TO YEAR ON THE BASIS OF DATA FROM 1832 TO 2000, by Kurbasova G. S., Korsun' A. A., Rybalova M. N., Shlikar' G. N. — A quasi-polynomial model for day duration deviations from*

*standard ones is constructed for the period 1832—2000 yr. The main components of the model are represented by a nonlinear trend and oscillations with periods of 64, 32, and 21 years. Mathematical descriptions of main oscillations define a periodic process with slowly varying amplitude. The results of two-channel autoregressions analysis are given. For the comparative analysis, some data on characteristics of solar activity, magnetosphere processes, and seismic activity of the Earth were used. The question on possible sources and mechanisms of generation of the main oscillations of day duration is discussed.*

## ВВЕДЕНИЕ

Гравитационные силы взаимодействия в системе Земля — Луна, а также в Солнечной системе в целом, физические процессы в ядре, внутренних и внешних оболочках Земли обуславливают неравномерный режим ее вращения и изменения положения оси вращения в пространстве и в теле Земли.

С введением шкалы атомного времени стало возможным детальное изучение неравномерности вращения Земли и выделение ее основных составляющих, условно подразделяемых на короткопериодические и сезонные колебания, долгопериодические колебания, нерегулярные изменения, включающие скачкообразные изменения скорости вращения, а также вековое замедление скорости вращения. Приливные воздействия на Землю со стороны Луны и Солнца вызывают существенные вариации скорости вращения Земли и имеют достаточно строгое аналитическое описание в рамках гравитационной теории. Происхождение сезонных вариаций однозначно связывают с изменениями зональной циркуляции атмосферы в течение года и отчасти с лунными приливами [10].

Наряду с этим есть ряд «неправильностей» вращения Земли [7], которые вызваны процессами во внутренних и внешних ее оболочках, ядре, воздействием внешних сил негравитационного происхождения. В литературных источниках вариации отклонений длительности суток от стандартных, обусловленные силами негравитационного происхождения, принято называть неприливыми [5]. Решение проблемы происхождения и структуры этих вариаций связано с изучением сути явлений, происходящих внутри Земли, механизмов передачи энергии внешними полями.

Отсутствие развитой теории о природе и механизмах возбуждения неприливых вариаций приводит к необходимости поиска решений этой задачи на основе анализа многолетних рядов наблюдений, что и явилось целью этой работы.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные  $\Delta D$  для построения модели и последующего ее анализа взяты из «IERS Annual Report 2000» (Tabl. 6. Excess of the duration of the day to 86400 s...).

Для сравнительного анализа использовались следующие данные о характеристиках солнечной активности и процессов в магнитосфере:  $W$  — среднегодовые числа солнечных пятен в Международной (Цюрихской) системе за период 1868—2000 гг. (<http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/>),  $aa$  — среднегодовые индексы геомагнитной активности за период 1868—2000 гг. (<http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagni.ind/aa>),  $SSC$  — геомагнитные внезапные начала бурь (количества отсчетов  $N$  из года в год) за период 1868—2000 гг. (<http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com/scyear>). Кроме того, использовались данные о характеристиках сейсмической активности

Земли:  $EQ$  — землетрясения с магнитудой более семи (количество отсчетов  $N$  из года в год) за период 1900—2000 гг. (<http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/7up.html>),  $IEQ$  — среднегодовые значения интегральной сейсмической энергии за период 1900—1989 гг. [6].

#### СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (КЛАССИЧЕСКАЯ ПЕРИОДОГРАММА)

Если не делать никаких предположений о характере процесса, породившего последовательность  $\Delta D$ , то согласно классическим процедурам статистического анализа временных рядов [4] необходимо исключить линейный тренд и получить спектральную оценку некоторой функции частот для последовательности отклонений от тренда.

Уравнение линейного тренда имеет вид

$$\Delta D_0(t) = -0.569 + 0.018(t - 1832),$$

где  $\Delta D$  — в мс,  $t$  — время в годах.

В качестве спектральной оценки использовались оценки относительной спектральной плотности мощности (СПМ), основанные на прямом преобразовании данных и последующем усреднении (периодограмма).

Выбор конкретного метода оценивания СПМ и функции окна в случае негауссовских процессов (какой имеет место в нашем случае) обычно обосновывается характером экспериментальных данных. Перед нами стояла задача получить несмещенные оценки основных неприливных колебаний с периодом более 20 лет. После предварительных сравнений (метод Батлетта, Даныеля) и других методов [9] для оценки СПМ был использован периодограммный метод Уэлча [8]. Преимущество этого метода состоит в том, что благодаря применению окна данных и использованию перекрывающихся сегментов удастся за счет незначительного ухудшения разрешения ослабить эффекты боковых лепестков и уменьшить смещение оценок. Всего использовалось 10 перекрывающихся сегментов, каждый из которых обрабатывался окном данных. Среднее значение периодограмм взвешенных сегментов дает оценку периодограммы Уэлча:

$$\tilde{P}_w(f) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \tilde{P}_{xx}^{(p)}(f),$$

где  $p$  — количество сегментов,  $\tilde{P}_{xx}^{(p)}$  — выборочный спектр взвешенного —  $p$ -го сегмента.

На рис. 1 приведен график оценок относительных СПМ для данных  $\Delta D$  (после исключения тренда). На графике периодограммы выделяются три пика, соответствующие колебаниям с периодами 64, 32 и 21 г.

Для определения параметров этих колебаний и изучения характера их изменения была построена квазиполиномиальная модель отклонений  $\Delta D$ .

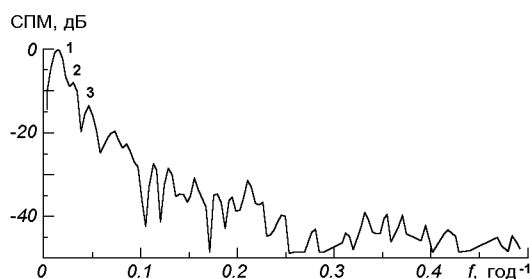


Рис. 1. Периодограммные оценки (классический метод). Пики 1, 2, 3 соответствуют периодам 64, 32 и 21 г.

КВАЗИПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА  $\Delta D$

Квазиполиномиальная модель процесса  $\Delta D$  имеет вид

$$S(t) = \sum_{m=1}^n \left( \sum_{l=0}^{k_i-1} a_{ml} t^l \exp(z_m t) \right), \quad (1)$$

где  $n \geq 1$ ,  $k_i \geq 1$  — целые числа,  $z_m$  — некоторые несовпадающие комплексные числа. При вещественных коэффициентах  $a_{ml}$  и вещественном аргументе  $t$  квазиполином  $S(t)$  принимает вещественные значения.

Математическое описание алгоритмов и обоснование методов, используемых для вычисления модели (1), имеется в приложениях к библиотеке программ [1]. Как и в случае периодограммной модели, исходной информацией для вычисления параметров квазиполиномиальной модели являются данные  $\Delta D$ .

В ходе выбора модели наилучшего приближения решался компромисс между точностью приближения и порядком модели. В результате была выбрана модель, в математическом описании которой содержится нелинейный тренд  $S_0$  и пять вариаций  $S_{64}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{15}$ ,  $S_{13}$  с периодами 63.6, 32.2, 20.7, 15.3, 13.2 г. соответственно.

На рис. 2 приведены: 1 — исходные данные  $\Delta D$ , 2 — отклонения исходных данных от модели, состоящей из суммы составляющих  $S_0$ ,  $S_{64}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{15}$ ,  $S_{13}$ , описанных в основной модели. Максимальное отклонение равно 0.58 мс. Максимальные амплитуды последних двух составляющих равны 0.33 мс и 0.27 мс соответственно (колебания затухающие), что почти на порядок меньше максимальной амплитуды колебания с периодом 63.6 г. Предметом дальнейших обсуждений будут нелинейный тренд и первые три колебания.

**Нелинейный тренд.** Нелинейный тренд в модели (1) имеет вид

$$S_0(T) = 0.007 \exp(-1.976T) + 0.651 \exp(0.725T), \quad (2)$$

где  $S_0$  — в мс,  $T$  — в столетиях. График  $S_0(T)$  приведен на рис. 3 (кривая 2). Согласно (2) значение векового смещения в данных  $\Delta D$  составляет 1.34 мс, что совпадает с оценкой вековых изменений длительности суток (1—2 мс), полученной другими методами. Предположение о нелинейности вековых изменений длительности суток высказывалось неоднократно. В частности, В. М. Киселев отмечает: «Нетрудно заметить, что при использовании значения приливного орбитального ускорения Луны, определенного Спенсером Джонсом, тренд, который, вероятно, соответствует вековому изменению длительности суток, в последние 220 лет оказывается нелинейным» [5].

Так как приливообразующая сила, по-видимому, является одной из главных причин, вызывающих вековое изменение длительности суток, остальные периодические составляющие модели (1) будем называть непри-

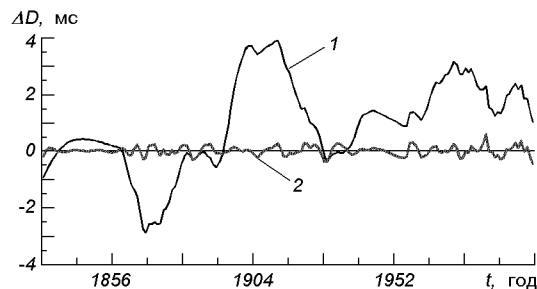


Рис. 2. Квазиполиномиальная модель исходных данных  $\Delta D$ : 1 — исходные данные, 2 — отклонения исходных данных от модели, состоящей из суммы составляющих  $S_0$ ,  $S_{64}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{15}$ ,  $S_{13}$

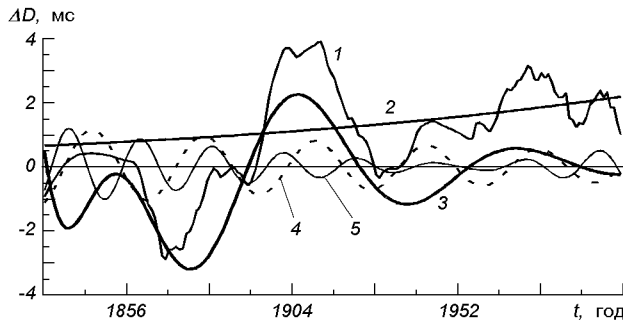


Рис. 3. Основные колебания в структуре квазиполиномиальной модели: 1 — исходные данные  $\Delta D$ , 2 — нелинейный тренд, 3 — колебание  $S_{64}$  с периодом 63.6 г., 4 — колебание  $S_{32}$  с периодом 32.2 г., 5 — колебание  $S_{21}$  с периодом 20.7 г.

ливыми. Графики нелинейного тренда и основных составных модели (1) показаны на рис. 3.

**Колебание с периодом 64 года.** Вариации с периодом 60—70 лет обнаружены в данных об отклонении длительности суток от стандартных многими авторами. Предположение о затухании этого колебания впервые высказано С. И. Брагинским [2].

В составе модели (1) колебание с периодом 63.6 г. имеет вид

$$S_{64}(t) = \sum_{i=1}^2 a_i \exp(-\nu_i t) \cos\left(\frac{2\pi}{P_{64}} t + \varphi_i\right). \quad (3)$$

Согласно описанию (3) (кривая 3 на рис. 3) колебание  $S_{64}(t)$  затухает на интервале 1832—2000 гг. ( $a_1 = 27.876$ ,  $a_2 = 18.666$ ,  $\nu_1 = 0.050$ ,  $\nu_2 = 0.025$ ,  $\varphi_2 - \varphi_1 = 3.3$  рад). Причем, величина амплитуды изменяется от 3.2 до 0.6 мс/сут.

Возможность скачкообразного изменения амплитуды (не стационарность) на интервале 1832—2000 гг. не обнаружена.

**Колебание с периодом 32 года.** Модель колебания с периодом 32 г. в составе (1) имеет вид

$$S_{32}(t) = \left[ A \cos\left(\frac{2\pi}{P_{32}} t + \varphi_1\right) + B \sin\left(\frac{2\pi}{P_{32}} t + \varphi_2\right) \right] \exp(-\nu t), \quad (4)$$

где  $A = 1.243$ ,  $B = 0.001$ ,  $\nu = 0.005$ ,  $\varphi_2 - \varphi_1 = 3.97$  рад. Амплитуда этого колебания в несколько раз превышает уровень шума и убывает в пределах от 1.24 до 0.5 мс/сут. Впервые колебание с периодом около 32 г. было обнаружено Л. Моррисоном [11] в данных об отклонениях длительности суток от стандартных после 1860 г. Относительно механизма генерации этого колебания в настоящее время не существует единого мнения. Согласно модели (4) колебание с периодом 32 г. представляет собой слобозатухающий квазигармонический процесс. Отличия в структуре и характере изменения на изучаемом интервале времени подтверждают высказанные ранее предположения о различной природе и механизмах генерации колебаний с периодами около 64 и 32 г.

**Колебание с периодом 21 год.** Описание этого колебания в общей модели (1) аналогично (3) и имеет вид

$$S_{21}(t) = \sum_{i=1}^2 a_i \exp(-\nu_i t) \cos\left(\frac{2\pi}{P_{21}} t + \varphi_i\right), \quad (5)$$

где  $a_1 = 1.340$ ,  $a_2 = 0.015$ ,  $\nu_1 = 0.0141$ ,  $\nu_2 = -0.0232$ ,  $\varphi_2 - \varphi_1 = 3.54$  рад.

Амплитуда суммарного колебания  $S_{21}$  изменяется в пределах 1.2—0.1 мс/сут до 1952 г. и 0.1—0.3 мс/сут — после. Как следует из рис. 3

(кривая 5), суммарное колебание  $S_{21}$  нельзя назвать затухающим на интервале 1832—2000 гг. Обнаруженная ранее схожесть структур колебаний с периодами около 64 и 21 г. позволила высказать гипотезу об общем механизме генерации этих колебаний [10].

Структура моделей (3)—(5) допускает возможность непрерывного существования суммы двух затухающих колебаний с разными начальными фазами, что при сложении на отдельных временных интервалах приводит к вариациям суммарной амплитуды. В то же время нельзя исключить предположения, что таким приемом компенсируется не предусмотренный алгоритмом факт изменения амплитуды и частоты колебаний.

**Анализ результатов.** Необходимость в формальной аппроксимации данных  $\Delta D$  вызвана недостаточной изученностью процесса изменения длительности суток.

Основу моделирования составляют данные  $\Delta D$  без учета какой-либо информации о параметрах процесса, порождающего эти данные. Тем не менее, оценки параметров тренда и основных непривливых колебаний в составе модели хорошо согласуются с результатами, полученными другими методами. Выражения (3)—(5) описывают некоторый усредненный колебательный процесс.

Присущее Солнечной системе свойство — тенденция к синхронизации обеспечивает связь механизма генерации колебаний внутри Земли с изменением параметров внешних воздействий. На возможность такой связи указывают приведенные ниже результаты авторегрессионного (АР) спектрального анализа.

#### АВТОРЕГРЕССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Применение АР-анализа основано на эмпирическом подходе, состоящим в том, что, во-первых, нам не известен истинный механизм явления, но схема авторегрессии порядка  $p$  на данном ограниченном интервале описывает характер изменения данных, во-вторых, механизм явления изменяется медленно по сравнению с оцениваемыми частотами.

Результаты двухканального АР-анализа данных  $\Delta D$  (I канал) и сравниваемых данных (II канал)

Обозначения данных (II канал)	Количество отсчетов	Период, год	Смещение событий, год	КМК, %
<i>aa</i>	132	22.3	-10.4	94
<i>W</i>	132	22.3	-9.7	95
<i>aa</i>	132	32.0	10.4	92
<i>IEQ</i>	89	32.0	-2	98
<i>EQ</i>	100	32.0	0.2	85
<i>EQ</i>	100	64.0	-18.0	96
<i>SSC</i>	100	64.0	-12.9	78

Результаты двухканального спектрального авторегрессионного (АР) анализа приведены в таблице, в столбцах которой содержится следующая информация: обозначения последовательностей данных во II канале, количество отсчетов, периоды сравниваемых колебаний, смещение событий по данным размещенным в I канале относительно данных во II канале, квадрат модуля когерентности (КМК).

АР-анализ обнаруживает высокую степень когерентности колебания с периодом 22.3 г. в сравниваемых последовательностях данных.

## ВЫВОДЫ

1. Квазиполиномиальная модель (1) и аппроксимации данных  $\Delta D$  на отдельных временных интервалах за период с 1832 г. по 2000 г. описывают усредненный процесс изменения длительности суток.

2. Величина векового смещения в данных  $\Delta D$  согласно модели нелинейного тренда (2) составляет 1.34 мс, что согласуется с оценкой векового смещения полученной другими методами.

3. Математические описания основных колебаний с периодами 64, 32, 21 г. описывают затухающий или слабо затухающий процесс на интервале 1832—2000 гг.

Структура колебаний с периодами 64, 32 и 21 г. (в виде суммы двух колебаний), возможно, связана с особенностями используемой последовательности данных  $\Delta D$  (увеличение точности после введения атомного стандарта). В то же время, для колебания с периодом около 64 г. существует предположение об изменении периода в силу нелинейности.

Предположение об исчезновении и внезапном появлении колебаний с периодами около 64, 32 г. на интервале 1832—2000 гг. не подтвердилось.

4. AP-анализ подтверждает общепринятое в настоящее время мнение о внутреннем источнике генерации основных колебаний в данных  $\Delta D$  (высокая степень когерентности процесса основных колебаний в  $\Delta D$  и чисел землетрясений с магнитудой более семи).

5. Описанная в составе квазиполиномиальной модели структура основных колебаний в  $\Delta D$  и результаты двухканального AP-анализа (таблица) допускают возможность существования согласованного механизма возбуждения этих колебаний в основе, которого лежит процесс синхронизации механизма крутильных колебаний в жидком ядре [3] и механизма передачи солнечной энергии через магнитосферу, атмосферу и геофизические оболочки Земли.

1. Библиотека программ LIDA-2. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983.—161 с.
2. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1955.—447 с.
3. Брагинский С. И. Аналитическое описание вековых вариаций геомагнитного поля и скорости вращения Земли // Геомагнетизм и аэрономия.—1982.—22, № 1.—С. 115—122.
4. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. — М.: Наука, 1976.—736 с.
5. Киселев В. М. Неравномерность суточного вращения Земли. — Новосибирск.: Наука, 1980.—160 с.
6. Котляр П. Е., Ким В. И. Положение полюса и сейсмическая активность Земли. — Новосибирск: ОИГГМСО РАН., 1994.—123 с.
7. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. — М.: Мир, 1964.—384 с.
8. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1990.—584 с.
9. Ривин Ю. Р. Циклы Земли и Солнца. — М.: Наука, 1989.—165 с.
10. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. — М.: Физматлит, 2002.—384 с.
11. Morrison L. V. Re-determination of the decade fluctuations in the rotation of the Earth in the period 1861—1978 // Geophys. J. Roy. Astron. Soc.—1979.—56.—P. 349—360.

Поступила в редакцию 06.07.06