

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

На правах рукописи

УДК 525.2

Зотов Леонид Валентинович

**ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ:
АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ И ИХ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ**

Специальность 01.03.01 – “Астрометрия и небесная механика”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель —
доктор физико-математических наук
В.Е. Жаров

Москва — 2005

Диссертация выполнена на кафедре небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета Московского государственного университета им М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Жаров Владимир Евгеньевич
ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Сидоренков Николай Сергеевич
Гидрометцентр РФ
доктор физико-математических наук, профессор
Губанов Вадим Сергеевич
ИПА РАН

Ведущая организация: Институт астрономии РАН

Защита состоится 9 июня 2005 г в 14 часов на заседании диссертационного совета по астрономии Московского государственного университета им М.В. Ломоносова, шифр Д 501.001.86

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга ГАИШ МГУ (119992, Москва, Университетский пр 13)

Автореферат разослан 5 мая 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Алексеев С.О.

2006-4
14634

2177953

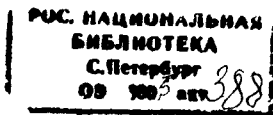
Общая характеристика работы

Актуальность темы

Вращение Земли отражает множество астрономических и геофизических явлений, происходящих на поверхности Земли, в ее недрах, в атмосфере и океанах, а также в ближнем Космосе. Все явления, приводящие к перераспределению масс оболочек Земли и момента импульса между ними, влияют на вращение Земли. Среди них вариации приливного потенциала, обусловленного действием небесных тел, изменения момента импульса ветров, течений, таяние ледников, влияние годового цикла возбуждения атмосферы, ураганного явления El Niño, процессы в мантии и ядре, землетрясения и многое другое [1],[2],[3].

Развитие средств наблюдений в XX веке (радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), лазерной локации искусственных спутников (ЛЛС) и Луны (ЛЛЛ), спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, – привело к ситуации, когда точность наблюдений оказалась выше точности моделирования. Возникла необходимость совершенствования теорий. Моделирование неравномерностей вращения Земли зависит от уровня представлений о выше перечисленных процессах, от состояния их мониторинга, а также от результативности используемых математических подходов. Для организации исследований планирования наблюдений и систематизации методов в 1985 г. учреждена Международная служба вращения Земли (МСВЗ)[4].

В последние десятилетия к точности астрометрических наблюдений, космической навигации и систем глобального позиционирования, предназначенных для определения местоположения на Земле и в Космосе, предъявляются высокие требования, которые не могли бы быть удовлетворены в отсутствие высокоточных методов преобразований между фундаментальными системами координат [5]. В матрицы преобразований между земной и небесной системами координат



входят параметры вращения Земли (ПВЗ) [6]. В связи с этим моделирование и прогнозирование вариаций во вращении Земли приобретает непосредственную практическую ценность.

Множество задач, связанных с вращением Земли ждет своего решения. Необходимо уточнение моделей вариаций ПВЗ в ставшем недавно доступным для наблюдений суточном диапазоне частот [7]. Требуют моделирования эффекты, открывшиеся с появлением новых теорий прецессии и нутации [8]. Не найдено окончательного объяснения нерегулярных изменений амплитуды, периода и фазы чандлеровского колебания полюса Земли [9] и др.

Цели исследования

В диссертационной работе предпринято исследование вращения Земли, при этом основное внимание уделено вопросам прогнозирования вращения Земли и вычисления возбуждающих функций по наблюдениям. Ставились следующие основные цели:

1. Анализ высокочастотных (суточных и внутрисуточных) составляющих изменений скорости вращения планеты и положения полюса с использованием РСДБ и GPS наблюдений, обеспечивающих необходимое разрешение. Сравнение полученных этими независимыми средствами данных с целью выявления достоверных эффектов
2. Спектральный и структурный анализ отклонений теорий прецессии и нутации MAC2000 и ZP2003 от РСДБ наблюдений. Оценка эмпирических поправок к параметрам этих теорий
3. Оценка эффекта, который оказало на вращение Земли землетрясение, произошедшее 26 декабря 2004 г. в Индийском регионе. Анализ наблюдений в целях обнаружения этого эффекта
4. Анализ временные рядов движения полюса и скорости вращения Земли с использованием различных методов выявления их сходств и различий, выбор оптимального метода для анализа ПВЗ

- 5 Сравнение и усовершенствование методов прогноза движения полюса Земли и скорости ее вращения.
6. Решение задачи восстановления возбуждающей функции по наблюдениям с использованием корректирующих процедур. Получение прогнозов возбуждающих функций и прогнозов траектории движения полюса с использованием фильтра Калмана.

Методы исследования

Развитие математических методов и вычислительных средств, происходящее стремительными темпами, позволяет по-новому подойти к анализу и моделированию вращения Земли.

В работе использованы методы вейвлет-анализа [12],[13], сингулярного спектрального анализа (ССА) [14], нейронные сети (НС) [15]. Они сопоставлены с классическими методами Фурье-анализа [16], линейными регрессионными методами оценки параметров [17],[18], методами динамического моделирования [19],[20],[21].

Научная новизна

1. В работе впервые проведено совместное рассмотрение высокочастотных компонент изменений скорости вращения Земли и движения полюса с одновременным привлечением GPS и РСДБ наблюдений на коротких интервалах времени. Проведенное сравнение позволило обнаружить множество артефактов в рядах GPS. Отмечен эффект, обратный известному эффекту утечки возникающий при интерполяции временных рядов, который мог стать причиной некоторых из артефактов.
2. Проведен анализ остаточных отклонений наблюдаемых прессионных и нутационных углов, полученных по РСДБ наблюдениям, от вычисленных с использованием теорий нутации MAC2000 и ZP2000. Впервые выполнена оценка эмпирических поправок к параметрам передаточных функций этих теорий.

- 3 Исследованы обстоятельства мощного землетрясения 26 декабря 2004 г. на Суматре, показано, что оно могло быть спровоцировано приливным воздействием. Оперативная оценка воздействия землетрясения на вращение планеты и анализ наблюдений в целях его обнаружения выполнены в первый месяц после события.
4. Проведено сравнение различных методов спектрального анализа в аспекте их применимости к рядам ПВЗ. Впервые показано, что сглаживающее окно, разработанное В.Л. Пантелеевым, обладает свойствами вейвлет-функции. С его помощью проведен вейвлет-анализ рядов движения полюса.
- 5 С использованием различных методов получены краткосрочные прогнозы ПВЗ, не уступающие по точности прогнозам МСВЗ. Проведено сравнение методов прогнозирования вращения Земли. К новым результатам можно отнести предложенный в работе метод прогноза с использованием ССА и НС.
- 6 Проведено сравнение различных методов решения обратной задачи восстановления возбуждающих функций по наблюдениям за вращением Земли. Предложено использовать корректирующие процедуры. Впервые, с использованием предложенного метода прогнозирования для возбуждающей функции и фильтра Калмана, получен прогноз траектории движения полюса.

Практическая и научная ценность работы

Полученные в работе прогнозы вращения Земли можно использовать в астрометрии при планировании и проведении наблюдений, в космической навигации для задания положений космических аппаратов, при позиционировании объектов на Земле и в других целях, требующих выполнения преобразований между фундаментальными системами координат.

Основная научная ценность работы авторам видится в применении новых математических подходов к анализу и прогнозированию

временных рядов вращения Земли. Используемые в работе подходы могут быть применены к решению задач, возникающих в других областях научных исследований.

На защиту выносятся

1. Результаты сравнительного анализа высокочастотных составляющих скорости вращения Земли и движения полюса по РСДБ и GPS наблюдениям. Заключение о наличии артефактов в рядах GPS-наблюдений, часть из которых может быть объяснена недостатками интерполяционных методов. Обнаруженный эффект интерполяции, обратный известному эффекту угочки, который может быть причиной некоторых из артефактов.
2. Результаты исследования остаточных отклонений теорий нутации ZP2003 и MAC2000 от наблюдений. Оценки эмпирических поправок к параметрам теорий. Заключение о невозможности улучшения согласия теорий с наблюдениями введением поправок к линейным частям передаточных функций, полученных на основе моделей внутреннего строения Земли.
3. Заключение о том, что землетрясение 26 декабря 2004 г в Индийском регионе на вращение Земли повлияло крайне незначительно и его достоверное обнаружение не представляется возможным.
4. Метод прогнозирования временных рядов, основанный на совместном использовании сингулярного спектрального анализа и нейронных сетей.
5. Предложение об использовании для непрерывного вейвлет-анализа разработанного В.Л. Пантелеевым сглаживающего окна, у которого обнаружены свойства вейвлет-функции.
6. Прогнозы траектории движения полюса, полученные с использованием предложенного метода прогнозирования для

возбуждающей функции и фильтра Калмана Предложение по использованию корректирующих процедур для восстановления возбуждающей функции по наблюдениям.

Аппробация результатов

Результаты исследований доложены на конференциях “Ломоносов-2003” и “Ломоносов-2004”, МГУ, Москва, “Сагитовских чтениях” 2003, 2004 и 2005 г, ГАИШ МГУ, международной конференции “Journées-2003”, ИПА, Санкт-Петербург, “КВО-2005”, ИПА, Санкт-Петербург

Личный вклад автора

Автором выполнен анализ данных, предоставленных МСВЗ, службой IGS а также полученных обработкой РСДБ наблюдений в программе ОССАМ 5 0 [22]. Высказаны соображения о возможных причинах обнаруженных артефактов Выполнена оценка поправок к параметрам моделей прецессии и нутации. Сделаны оценки возможного влияния землетрясения на вращение Земли и предпринята попытка обнаружения эффекта в наблюдениях Применены алгоритмы прогнозирования, разработанные другими авторами, а также разработаны собственные. Высказаны предложения по улучшению методов Проведено динамическое моделирование вращения Земли и сравнение различных методов восстановления возбуждающих функций Алгоритмы адаптированы для применения к исследуемым рядам ПВЗ

Написаны программы на языках Fortran и C++, реализующие классические методы спектрального анализа, ССА и вейвлет-анализа оценки АР-параметров, СКК, фильтра Калмана, сглаживания регуляризации, а также программы, использующие встроенные функции пакета Matlab 7 0 для обучения нейронных сетей и дискретного вейвлет-анализа в целях тестирования предложенных в работе методов прогнозирования

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 182 страницы, в ней содержится 48 рисунков, 7 таблиц, два приложения. Список литературы насчитывает 132 наименования.

Содержание диссертационной работы

Введение содержит обоснование актуальности выбранной темы. Проводится краткий обзор ее состояния на данный момент, выделяются некоторые основные вопросы, требующие решения. Формулируются также цели работы, делается обзор содержания.

В **первой главе** диссертации приводятся некоторые исторические сведения. Рассматривается деятельность МСВЗ и таких ее подразделений, как конвенционный центр, центр прогнозов, центр комбинирования решений, центр по геофизическим флюидам и его подбюро атмосферы, океанов, приливов, гидрологии, мантии, ядра, гравитационного поля, нагрузки. Внимание уделяется службам РСДБ, Лазерных и GPS наблюдений, предоставляющим данные о вращении Земли в МСВЗ.

Поясняется, какие параметры приняты МСВЗ для описания вращения Земли, и как выполняются преобразования между фундаментальными системами координат. Напомним, что ПВЗ входят в матрицы преобразований между земной и небесной системами отсчета, которое выполняется по формуле

$$r_{crs} = PN(t)R(t)W(t)r_{trs},$$

где r_{trs} – радиус-вектор точки в земной системе, который умножается на матрицы поворота: W – обусловленную движением полюсов, PN – прецессией и нутацией, R – угловым вращением Земли. Поясняются принципы разделения движения оси вращения на прецессионно-нутационное, происходящее в инерциальном пространстве, и на

движение мгновенного полюса относительно системы отсчета, связанной с твердой Землей, содержащие периоды не превышающие двух суток в небесной системе отсчета.

Во **второй главе** представлены основные используемые в исследовании математические подходы. Они систематизированы в первом разделе.

Изложению основ классического Фурье-анализа и вейвлет-анализа и ССА посвящен второй раздел главы. Отметим, что в отличие от Фурье-анализа, представляющего собой разложения сигнала на гармонические составляющие, наличие которых предполагается в сигнале постоянным, вейвлет-анализ позволяет проследить эволюцию спектральных составляющих во времени. Гармоническая природа сигнала при этом не подразумевается. Анализ выполняется с использованием вейвлет-функций, выбираемых исходя из особенностей сигнала. Основным соотношением является соотношение неопределенностей

$$\Delta\omega \sim \frac{1}{\Delta T}.$$

связывающее разрешающую способность по времени ΔT и по частоте $\Delta\omega$. Вейвлет-анализ позволяет разделить исследуемый сигнал на частотно-временные блоки, адаптируясь при этом к особенностям сигнала на разных масштабах. ССА также обладает более широкими возможностями, нежели Фурье-анализ, однако для его успешного использования необходимо выполнение некоторых предположений, в частности об ортогональности и конечности линейных пространств, порожденных составляющими исследуемого сигнала.

Во третьем разделе изложены линейные регрессионные модели, среди которых линейная регрессия и метод среднеквадратической коллокации (СКК), активно развиваемый нашими коллегами из Петербурга [17] а также некоторые нелинейные подходы, такие как нейронные сети.

Линейный регрессионный анализ служит для нахождения параметров линий и гиперплоскостей, по которым группируются случайные величины. В случае временных рядов, набор из P последовательных отсчетов ряда может быть интерпретирован как случайный вектор

и для дискретно наблюдаемого процесса может быть записана авторегрессионная модель со скользящим средним (АРСС)

$$x_i = - \sum_{k=1}^p \alpha_k x_{i-k} + \sum_{k=1}^q \beta_k n_{i-k},$$

где x_i – отсчеты сигнала, n_i – случайные величины, α_k – параметры авторегрессионной (АР) части, β_k – параметры скользящего среднего (СС), p и q – порядки АР и СС частей. Доказано, что АРСС модель может быть приближена АР моделью более высокого, возможно бесконечного порядка. Оценки параметров АР модели, могут быть получены различными методами, например Берга. Они позволяют прогнозировать развитие процесса. Для изменяющихся во времени параметров используются адаптивные методы.

СКК – линейный регрессионный метод, позволяющий обрабатывать наблюдения в случаях, когда желаемый сигнал связан с наблюдениями не детерминированно, а стохастически. Такая связь может быть задана ковариационными функциями или матрицами. Линейная несмещенная оценка желаемого сигнала s размерности P с минимальной дисперсией находится по наблюдениям l размерности N в виде

$$\hat{s} = Hl, \quad H = Q_{sl}Q_{ll}^{-1},$$

где H - матрица размерности $P \times N$, определяемая ковариационными матрицами наблюдений Q_{ll} и сигнала-наблюдений Q_{sl} . Под желаемым сигналом можно понимать сигнал сглаженный, интерполированный или прогнозный.

Нейронная сеть (НС) состоит из связанных между собой элементов – нейронов, осуществляющих преобразование поступающего на вход векторного сигнала в выходной сигнал. Каждый из нейронов характеризуется набором параметров и передаточной функцией, которая может быть линейной или нелинейной. Помимо числа и характеристик входящих в сеть нейронов, свойства НС определяются ее архитектурой. Сеть может содержать разное число слоев, обратные связи, быть самоорганизующейся. Для решения сетью возлагаемых на нее задач

проводится ее обучение на тестовой последовательности входных и выходных сигналов. В ходе обучения настраиваются параметры сети. НС используются при решении задач интерполяции и аппроксимации, распознавания и классификации, прогнозирования сжатия данных, идентификации систем, управления, ассоциации и другое. Они могут аппроксимировать детерминированные и стохастические зависимости, адаптироваться к многомерным непрерывным функциям с любым числом минимумов и максимумов, однако выделить имеющуюся закономерность они не позволяют. Нейронные сети и другие нелинейные подходы активно развиваются в наше время, поскольку позволяют лучше приближать реальность.

Пятый раздел второй главы посвящен динамическому моделированию. Вместе с некоторыми результатами теории линейных дифференциальных уравнений приводится динамическая модель вращения Земли. Теория вращения Земли строится на основе уравнения

$$\frac{d}{dt} \vec{H} + \vec{\omega} \times \vec{H} = \vec{L}, \quad (1)$$

где $\vec{H} = I\vec{\omega} + \vec{h}$ - угловой момент, I - тензор инерции, $\vec{\omega}$ - вектор угловой скорости вращения Земли, \vec{h} - относительный угловой момент и \vec{L} - угловой момент сил. Уравнение (1) может быть переписано покомпонентно с точностью до составляющих первого порядка в виде уравнений Эйлера-Лиувилля, которые преобразуются к динамическим уравнениям вращения Земли.

$$\begin{aligned} \frac{m}{\sigma_c} + m &= \varphi, \\ \frac{dm_3}{dt} &= \frac{d\varphi_3}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_c - чандлерова частота, $m = m_1 + im_2$ и m_3 - малые поправки к вектору угловой скорости $\vec{\omega}$

$$\omega_1 = \Omega m_1, \quad \omega_2 = \Omega m_2, \quad \omega_3 = \Omega(1 + m_3),$$

а в правой части (2) стоят возбуждающие функции, $\varphi = \varphi_1 + i\varphi_2$,

$$\varphi_1 = \frac{1}{\Omega^2(C - A)} \left(\Omega^2 c_{13} + \Omega \frac{dc_{23}}{dt} + \Omega h_1 + \frac{dh_2}{dt} - L_2 \right),$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{\Omega^2(C - A)} \left(\Omega^2 c_{23} - \Omega \frac{dc_{13}}{dt} + \Omega h_2 - \frac{dh_1}{dt} + L_1 \right),$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{\Omega^2 C} \left(-\Omega^2 c_{33} - \Omega h_3 + \Omega \int_0^t L_3 dt \right),$$

определяемые моментом внешних сил L , изменениями тензора инерции $c = \Delta I$, относительного момента импульса h их производными. Задача вычисления возбуждающих функций, приводящих к наблюдаемому движению полюсов Земли и изменению скорости ее вращения является основной задачей при исследовании вращения Земли, вместе с задачами уточнения параметров самой Земли и улучшения точности наблюдений.

Динамическая модель вращения Земли может быть записана в терминах пространства состояний, что может быть использовано для уточнения и прогнозирования траектории полюса фильтром Калмана. Данная модель вместе с основными уравнениями Калмановской фильтрации представлена в третьем разделе второй главы.

В заключительной части главы дается краткий обзор метода регуляризации, применяющегося для решения обратных задач.

Все разделы второй главы служат для ознакомления читателя с основными подходами, использованными в исследованиях, описание хода и результатов которых вынесены в третью главу.

Третья глава содержит описание исследований и их результатов. Первый раздел третьей главы посвящен исследованию высокочастотных компонент движения полюса и изменений скорости вращения Земли. Выполнен анализ данных центра CODE службы IGS, содержащих оценки ПВЗ с 02.01.1995 по 14.02.1998 с часовым разрешением, полученных по GPS-наблюдениям. Высокочастотные компоненты предварительно выделены фильтром, в котором использовано

сглаживающее окно, предложенное В Л Пантелеевым

$$\omega(x) = \frac{\omega_0}{2\sqrt{2}} e^{-\frac{\omega_0}{\sqrt{2}}|x|} \left(\cos \frac{\omega_0}{\sqrt{2}}x + \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{2}}|x| \right), \quad (3)$$

где ω_0 – параметр окна Сравнение с моделью приливных вариаций Рея показало, на фоне общего согласия, наличие отклонений в рядах GPS-наблюдений, превышающих по амплитуде 50 мкс дуги Спектральный анализ показал присутствие в спектре составляющих с периодами 3,4,5,6,7,8,9,10,11 циклов в сутки. Было сделано заключение о том, что выбросы, в частности в сентябре 1997 года (MJD 50700), могут быть вызваны изменением числа станций наблюдений сети GPS, а наличие составляющих с частотами более 3 циклов в сутки может быть обусловлено методами обработки, применявшимися центром CODE, в частности интерполяцией орбит Специальное исследование показало, что интерполяция с шагом Δt данных, изначально заданных с шагом $\Delta T > \Delta t$, в которых присутствует гармоническая составляющая с периодом T приводит к просачиванию энергии этой гармоники на частотах ν_k , лежащих в интервале между частотами Найквиста исходного и проинтерполированного ряда. Частоты ν_k задаются соотношением

$$\frac{1}{\nu_k} = \frac{\Delta T}{k} \left(1 \pm \frac{\Delta T}{T} \right),$$

где k принимает натуральные значения

С использованием программного пакета OCCAM 5.0 [22] методом СКК были обработаны РСДБ наблюдения Проведено сравнение GPS и РСДБ наблюдений на тех непродолжительных интервалах времени, где они имелись одновременно Сделан вывод о большом количестве артефактов в высокочастотных составляющих ПВЗ, получаемых из GPS наблюдений которые не обнаруживаются в независимых результатах РСДБ наблюдений

Во втором разделе представлены результаты анализа отклонений теорий прецессии и нутации ZP2003 и MAC2000 от РСДБ-наблюдений Основная часть этих высокочастотных (при рассмотрении из земной системы отсчета) отклонений обусловлена свободной нутацией ядра

Спектральный и вейвлет-анализ показали, что отклонения теории ZP2003 от РСДБ наблюдений содержат больше мощности на низких частотах, в том числе на главной нутационной гармонике с периодом 18,6 лет, и на частотах в два колебания за год, вероятно связанных с атмосферными эффектами. Этого не наблюдается в отклонениях теории MAC2000. Методом МНК SVD вычислены эмпирические поправки к амплитудам гармоник в частотной области и к параметрам передаточных функций. Сделан вывод о необходимости уточнения нелинейных частей моделей, в то время как улучшение параметров передаточных функций обеих теорий введением эмпирических поправок не представляется возможным. Показано, что введение эмпирических поправок к амплитудам гармоник возможно, и введение их в теорию ZP2003, к примеру, приводит к взвешенным среднеквадратическим отклонениям (ВСКО) теории от наблюдений – 146 ($d\epsilon$) и 345 ($d\psi$) мкс дуги. Однако, такие поправки нарушают физическую строгость теории. Решено использовать их для прогноза разногласий между теориями и наблюдениями в будущем.

В третьем разделе рассматривается вопрос о связи вращения Земли с сейсмичностью. Выполненная в рамках простейшей модели оценка возможного эффекта во вращении Земли от землетрясения произошедшего 24 декабря 2004 г в Индийском регионе и повлекшего катастрофическое цунами, показала, что изменения на величину порядка сантиметра в положении полюса и микросекунды времени в продолжительности суток находятся на пределе и за границей точности современных наблюдений. Попытка обнаружения эффекта в данных наблюдений IGS и службы лазерной локации не привела к достоверному его обнаружению на фоне помех и скачков, обусловленных другими причинами.

Четвертый раздел второй главы посвящен анализу временных рядов координат полюса и скорости вращения Земли, а также их прогнозированию. В качестве исходных данных использовались бюллетени ЕОРС01 и ЕОРС04 МСВЗ, содержащие данные по скорости вращения Земли с 1962 г и координатам полюса с 1890 г. На

рис 1 представлен график изменения координат полюса с 1900 г. На рис 2 представлен временной ряд UT1-UTC. Графики зависимости погрешности от эпохи наблюдений иллюстрируют колоссальный прогресс в точности.

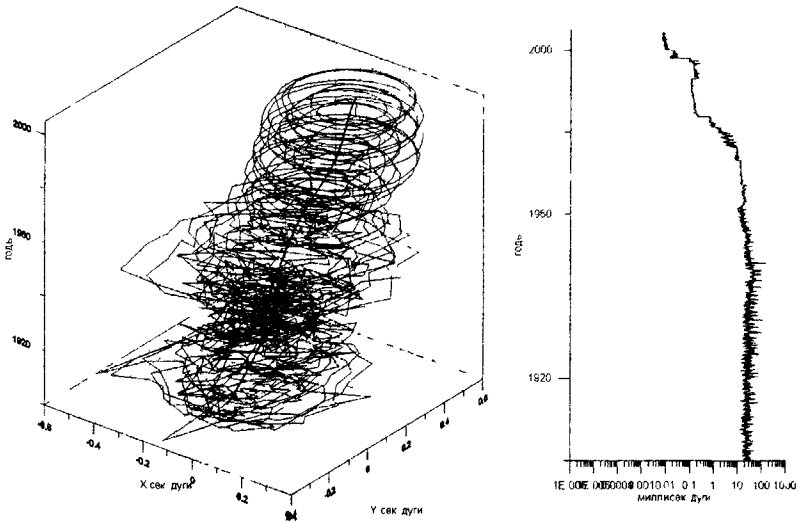


Рис 1 Изменения координат полюса с 1900 года (слева) и погрешности измерений (справа)

Анализ временных рядов был выполнен с использованием Фурье-анализа, вейвлет-анализа и ССА, были получены также параметрические оценки спектра по методу максимальной энтропии.

ССА позволил разделить временные ряды координат полюса на чандлеровскую, годовую составляющие, тренд, шумы наблюдений и др. В качестве вейвлет-функции для непрерывного вейвлет-анализа было апробировано модифицированное окно Пантелеева (3):

$$\psi(x) = \frac{a}{2} e^{-a|x|} (\cos(ax) - \sin(a|x|)),$$

где $a = \omega_0/\sqrt{2}$ - параметр. Данное окно обладает необходимыми

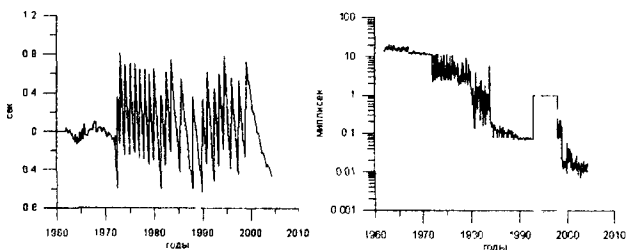


Рис 2 Расхождение шкал времени UT1-UTC (слева) и погрешности измерений (справа)

для вейвлет-функции свойствами и нулевым первым моментом, в силу четности.

Прогнозирование временных рядов было выполнено с использованием АР-модели, СКК и НС. После вычитания детерминированных составляющих, на шестилетнем базовом отрезке ряда моделировались и вычитались полиномиальный и гармонический тренды, оставшиеся составляющие моделировались стохастическими методами. Для скорости вращения Земли использовалась модель зональных приливов. Параметры годичной и чандлеровской составляющих в движении полюса подбирались нелинейным МНК. Параметры АР-модели вычислялись по алгоритму Берга, порядок модели был выбран равным 50, на основании анализа поведения критерия Акаике и окончательной ошибки предсказания (ООП). Оценки автоковариационной матрицы наблюдений, необходимые при использовании СКК строились по 20-летнему отрезку ряда. Прогнозирование с использованием трехслойной НС выполнялось без предварительного вычитания тренда, сеть состояла из 15 нейронов и обучалась по алгоритму Левенберга-Марквардта по 50 тестовым последовательностям. Для вычисления средних отклонений прогнозных значений от наблюдений было сделано 20 прогнозов для разных эпох в прошлом и выполнено их сравнение с реальными данными. Результаты представлены в табл 1, в сравнении с заявленной точностью прогнозов МСВЗ [4]. Вычислены также максимальные ошибки прогнозов и

статистика с искусственным искажением трех последних отсчетов базового отрезка ряда

Таблица 1 Сравнение средней точности прогнозов, полученных разными методами для разных интервалов времени

Горизонт (углок вперед)	Прогноз МСВЗ		АР-прогноз		НС-прогноз		СКК-прогноз	
	X, Y 0 001''	UT1-UTC 0 001 сек	X, Y 0 001''	UT1-UTC 0 001 сек	X, Y 0 001'	UT1-UTC 0 001 сек	X Y 0 001''	UT1-UTC 0 001 сек
1	0 15	0 02	0 15	0 02	0 14	0 034	0 27	0 032
5	3	1 5	1 0	0 4	0 78	0 39	1 8	0 43
10	6	2 1	2 4	1 1	3 3	0 96	4 0	1 07
30	12	3 5	11 7	7 2	10 6	5 7	13 4	6 0

Предложен следующий метод прогнозирования, основанный на совместном использовании ССА и НС. Временной ряд разделяется на главные компоненты методом ССА. Каждая из главных компонент прогнозируется вперед во времени с использованием одного из методов прогноза, например с использованием НС. После этого прогноз исходного сигнала получается сложением прогнозов главных компонент ССА. Метод опробован, результаты прогнозов не уступают по точности лучшим результатам табл. 1. Долгосрочный прогноз дал основания ожидать уменьшения амплитуды чандлеровского движения в 2010-2020 гг, превышения расхождения между шкалами UT1 и UTC секундного порога в 2006 г.

В пятом разделе выполнено динамическое моделирование вращения Земли с использованием фильтра Вилсона по наблюдаемому движению полюса, восстановлена возбуждающая функция, стоящая в правой части первого уравнения (2). Проведено также восстановление с использованием дифференцирования и деления на передаточную функцию в частотной области. Сравнение показало желательность привлечения сглаживающих корректирующих процедур для более достоверного восстановления возбуждающей функции. Для решения данной некорректно поставленной обратной задачи был

апробирован метод регуляризации. Восстановленное возбуждение спрогнозировано предложенным методом, основанным на совместном использовании ССА и НС. Затем, с использованием фильтра Калмана получен прогноз траектории движения полюса. Сопоставление возбуждения, обуславливающего чапдлеровскую компоненту со сглаженным временным рядом магнитуд землетрясений показало их коррелированность.

Результаты исследований обобщаются в **заключительной части** диссертационной работы. Там же перечисляются некоторые вопросы, возникшие в ходе исследования и оставшиеся без ответа. Они могут служить предметом дальнейших изысканий.

Публикации по теме диссертации

Статьи

1) Зотов Л.В. Регрессионные методы прогнозирования вращения Земли. Вестник МГУ, серия Физика, Астрономия, М., принята в печать в 2004 г.

2) Зотов Л.В., Пасынок С.Л. Результаты определения поправок к теориям нугации ZP2003 и MAC2000. Астрономический Вестник, М. принята в печать в 2004 г.

3) Зотов Л.В. Прогнозирование положения полюса Земли и скорости ее вращения. Вестник астрономической школы, Киев, принята в печать в 2004 г.

4) Zotov L. V. High frequency variations in the Earth rotation from VLBI and GPS observations. Proceedings of Journées 2003 "Astrometry, geodynamics and solar system dynamics from milliarseconds to microarseconds", IAA of RAS, St. Petersburg, Russia, ed. by A. Finkelstein and N. Capitaine, September 22-25, 2003.

5) Зотов Л.В. Динамическое моделирование и прогноз вращения Земли. Труды всероссийской конференции "Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВО-2005)", С. Петербург, 2005, ИПА РАН.

Тезисы конференций

1) Zotov L V High frequency variations in the Earth rotation from VLBI and GPS observations Journees 2003, 22-25 September 2003, St Petersburg, Russia

2) Зотов Л В Высокочастотные вариации во вращении Земли по РСДБ и GPS наблюдениям. Молодежная конференция “Ломоносов-2003”, 2003, Москва, МГУ

3) Зотов Л В Прогнозирование положения полюса Земли и скорости ее вращения Молодежная конференция “Ломоносов-2004” 2004, Москва, МГУ

4) Зотов Л В Прогнозирование положения полюса Земли и скорости ее вращения Астрономическая школа, Бслая Церковь Украина 2004

5) Зотов Л В Динамическое моделирование и прогноз вращения Земли “КВО-2005”, 2005, С Петербург, ИПА РАН

Литература

- [1] Сидоренков Н. С Физика неустойчивостей вращения Земли, М , Физматлит, 2002
- [2] Мориц Г , Мюллер А. Вращение Земли: теория и наблюдения Киев, Наукова думка, 1992
- [3] Манк У Макдональд Г. Вращение Земли М , Мир, 1964
- [4] IERS Annual Report 2002 BKG, Frankfurt am Main 2003
- [5] Kovalevsky J Fundamentals of astrometry Cambridge University press, 2004
- [6] IERS Conventions 2003 Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main, 2004
- [7] Rothacher M , Beutler G , Weber R , Hefty J High-frequency variations in Earth rotation from Global Positioning System data //Journal of geophysical research, Vol. 106, No B7, P. 13,711-13,738, July 10, 2001
- [8] Malkin Z , Terentev D Investigation of the Parameters of the free core nutation from VLBI data Communications of the IAA RAS, No 149 S Petersburg, 2003
- [9] Yatskiv Y Chandler Motion Observatio // ASP Conference Series, Vol 208, P. 383. 2000
- [10] Percival D.B Wavelet methods for time series analysis Cambridge University press, 2000

- [11] Mallat St A wavelet tour of signal processing San Diego, Acad press, 2001
- [12] Витязев В В Вейвлет-анализ временных рядов С-Петербургский Университет, 2001
- [13] Добеши И. Десять лекций по вейвлетам Москва-Ижевск, 2004
- [14] Голяндина Н Э Метод "Гусеница-SSA. прогноз временных рядов СПб , ВВМ, 2004
- [15] Осовский С Нейронные сети для обработки информации М Финансы и статистика, 2004
- [16] Percival D B Spectral analysis for physical applications 1997
- [17] Губанов В С Обобщенный метод наименьших квадратов СПб , Наука, 1997
- [18] Марпл С Л Цифровой спектральный анализ и его приложения М , МИР, 1990
- [19] Пантелеев В Л. Наблюдение и управление динамическими объектами <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/lecture/lecture.htm>
- [20] Эйкхофф П Основы идентификации систем управления М., Мир 1975
- [21] Howell T Non-linear time series A dynamical system approach Oxford 2004
- [22] Titov O , Zarraoa N OCCAM5 0: Users Guide. <http://www.ga.gov.au/nmd/geodesy/techrpts/pdf/occam.pdf>

ЗоробелВ

Подписано в печать 27.04.2005
Объем 1.5 печ.л.
Тираж 90 экз. Заказ № 76
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»
119992, г.Москва, Ленинские горы, д.1
Главное здание МГУ, к.102

№ - 9687

РНБ Русский фонд

2006-4

14637