

На правах рукописи

Вэй Ян Сое

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ЗЕМНОГО ПОЛЮСА ОТ ПРЕЦЕССИИ ОРБИТЫ ЛУНЫ**

Специальность - 01.03.01

Астрометрия и небесная механика

Автореферат

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ)

Научный руководитель

Перепёлкин Вадим Владимирович,

д.ф.-м.н., проф. кафедры «Мехатроника и теоретическая механика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Официальные оппоненты:

Сидоренков Николай Сергеевич

д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник отдела краткосрочных прогнозов погоды ФГБУ "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации"

Зленко Александр Афанасьевич

к.ф.-м.н., доцент кафедры "Высшая математика" ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет"

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", г. Москва

Защита состоится «29» сентября 2022 года в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>.

Автореферат разослан «5» августа 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задача о движении Земли относительно центра масс представляет как теоретический, так и практический интерес. Определение ориентации Земли в небесной геоцентрической системе координат GCRS (Geocentric Celestial Reference System) является одной из важных задач астрометрии, небесной механики и геофизики. Ее решение имеет важные технические приложения и связано с уточнением координатно-временного и навигационного обеспечения спутниковых систем. Ориентация Земли в неподвижном пространстве задается пятью параметрами вращения Земли (ПВЗ), два из которых – координаты земного полюса являются наиболее трудно прогнозируемыми.

Исследование движения земных полюсов имеет более чем столетнюю историю. На сегодняшний день получили качественное объяснение ряд динамических эффектов в движении полюсов (короткопериодические и долгопериодические приливные колебания, некоторые свойства чандлеровской и годичной компонент и их связь с геофизическими процессами), разработаны различные варианты моделей прогноза движения полюса. Однако, как теоретическая модель, так и реализация моделей прогноза его движения далеки от завершенности. Существующие математические модели не в полной мере описывают процесс движения полюса. В частности, при построении прогноза его движения учет вариаций параметров чандлеровской и годичной компонент пока возможен только в рамках численного подхода.

*В диссертационной работе решается **актуальная** задача уточнения модели колебаний земного полюса и исследования новых свойств его движения, связанных с долгопериодическими лунными возмущениями.*

Цель диссертационной работы состоит в исследовании особенностей синхронизации поведения чандлеровской и годичной компонент земного полюса с пространственным движением лунной орбиты, а также в разработке и уточнении численно-аналитической модели движения земного полюса, адекватной данным наблюдений и измерений Международной службы вращения Земли.

Научная новизна работы состоит в следующих пунктах:

1. Показано существование различных режимов колебательного процесса земного полюса, смена которых заключается в согласованном изменении средней частоты его обращения вокруг полюса инерции и в изменении чандлеровской частоты.
2. Показано, что вариации параметров чандлеровской и годичной составляющих движения земного полюса содержат 18-летний цикл, согласованный с прецессионным движением лунной орбиты.
3. Учет синхронизации вариаций параметров движения земного полюса и прецессии орбиты Луны позволяет повысить точность прогноза траектории движения полюса в среднем на 11-12см.

Теоретическая и практическая значимость:

Идентификация колебаний земного полюса, согласованных с прецессионным движением лунной орбиты, представляет интерес для исследования механизма возбуждения колебаний полюса.

Полученные в работе дополнительные слагаемые модели движения полюса с учетом долгопериодического лунного возмущения позволяют повысить точность определения его положения. Они могут быть использованы в автономной модели и не требуют коррекции параметров.

Методы исследования:

Определение параметров разработанных моделей движения земного полюса проводилось на основе обработки высокоточных данных наблюдений и измерений МСВЗ с помощью метода наименьших квадратов и Фурье-преобразования. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Анализ процессов, связанных с колебаниями земного полюса, проводился с помощью спектрального анализа и вэйвлет-преобразования данных МСВЗ.

Для описания возмущенного движения земного полюса использовались динамические уравнения Эйлера-Лиувилля в переменных Эйлера. В основу модели возмущенных движений земного полюса положена динамическая теория вращения вязкоупругого тела.

На защиту выносятся следующие **положения**:

1. Показано, что изменение соотношения амплитуд основных гармоник колебания земного полюса приводит к изменению средних параметров его движения. Установлен эффект смены колебательного режима полюса, который заключается в согласованном изменении частоты чандлеровских колебаний и средней частоты обращения полюса вокруг полюса инерции.

2. С помощью численной обработки астрометрических данных измерений положения земного полюса найден колебательный процесс, связанный с прецессионным движением орбиты Луны. Предложено несколько способов преобразования координат земного полюса к системе, в которой его движение происходит синфазно с изменением ориентации плоскости лунной орбиты по отношению к экватору Земли. Показано, что в этой системе полярный радиус совершает колебания синфазные с колебаниями угла наклона плоскости лунной орбиты к земному экватору, а колебания полярного угла происходят синфазно с отклонением вдоль экватора точки пересечения лунной орбиты с экватором.

3. С помощью численного интегрирования уравнений движения земного полюса и обработки данных NCEP/NCAR циркуляции атмосферы и данных NASA/JPL углового момента океана исследован вклад основных геофизических возмущений (атмосферного и океанического) в колебательный процесс, синфазный с прецессией лунной орбиты. Показано, что найденные гармоники только частично могут быть обусловлены колебаниями подвижных сред атмосферы и океана.

4. Установлено, что колебания, согласованные с пространственным движением орбиты Луны, присутствуют как в чандлеровской, так и в годичной компонентах движения земного полюса. Реализован алгоритм аппроксимации и прогноза траектории движения полюса. Показано, что учет найденных колебаний в уравнениях движения земного полюса позволяет повысить точность определения

его положения в среднем на 11.5 см для автономной модели без коррекции параметров.

Апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена строгими математическими методами и сравнением полученных результатов с данными наблюдений и измерений МСВЗ. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК.

Апробация основных результатов проводилась на научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: XII международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли NPNJ' (Алушта, 2018 г); Всероссийская астрометрическая конференция – «Пулково-2018» (Санкт-Петербург, 2018 г); XXI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам ВМСППС' (Алушта, 2019 г); 8-я Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (Санкт-Петербург, 2019 г); Международная научно-техническая конференция МИИГАИК (Москва, 2019 г); Japan Geoscience Union Meeting (Chiba, Japan, 2019 г); 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, 2019 г); 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2020» (Москва, 2020 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ в научных изданиях, из них 3 работы – в научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (WoS, Scopus), 4 публикации – в российских научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК не по профилю диссертации, 8 работ – в остальных научных изданиях.

Содержание диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают **персональный вклад** автора.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 127 страниц, из них 113 страниц текста, включая 41 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор рассматриваемой проблемы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведена структура и общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертации показано существование различных режимов колебательного процесса земного полюса. Установлено, что изменение соотношения амплитуд основных составляющих колебаний полюса приводит к изменению средних параметров его движения.

В разделе 1.1 дана общая постановка задачи о невозмущенном движении деформируемой Земли относительно центра масс, приведены основные положения, связанные с вариациями компонент тензора инерции вращающейся деформируемой Земли и с вычислением вектора кинетического момента и его производной по времени. В разделе 1.2 выписаны дифференциальные уравнения возмущенного движения земного полюса с учетом вращательной деформации, приведено их решение для установившегося чандлеровского колебания.

Во второй части главы исследуется эффект изменения средней частоты движения земного полюса при смене ведущей гармонике (с большей амплитудой). В разделе 1.3 показано, что средняя частота $\langle \dot{\psi}_p \rangle_T$ обращения полюса вокруг «среднего» положения (средняя за период T модуляции чандлеровской и годичной гармоник) принимает значение либо N –чандлеровской частоты, либо ν – годичной частоты:

$$\langle \dot{\psi}_p \rangle_T = \operatorname{sgn} \left(\frac{a_h - a_{ch}}{a_h + a_{ch}} \right) \frac{\nu - N}{2} + \frac{\nu + N}{2}, \quad (1)$$

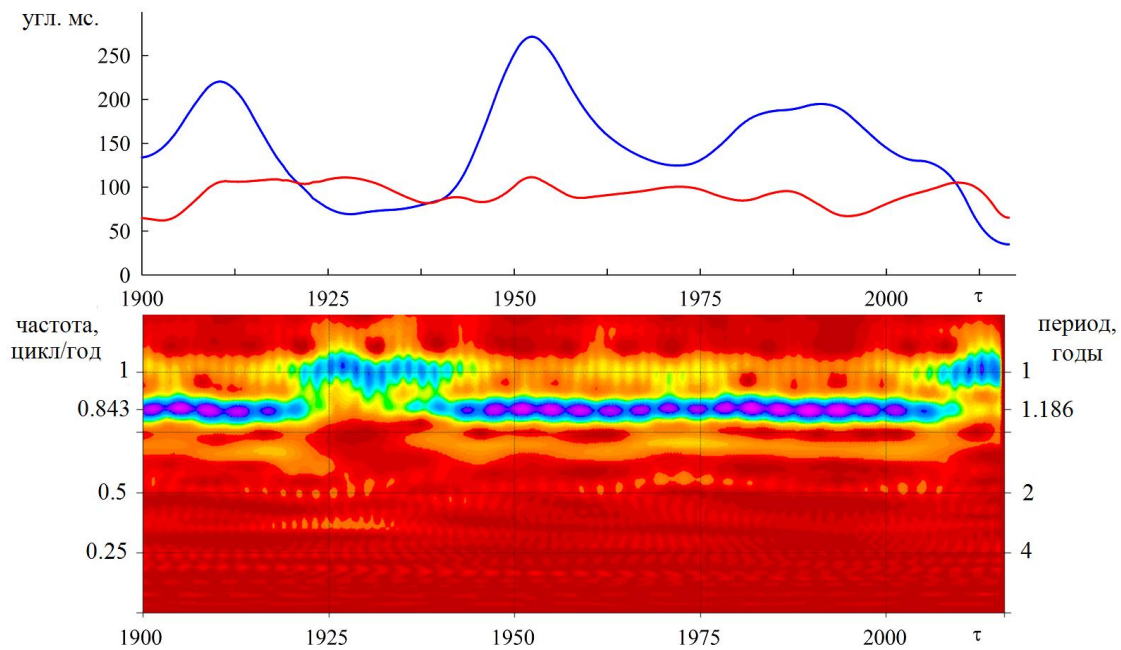


Рис. 1 Вариации амплитуд чандлеровской a_{ch} (синяя линия) и годичной a_h (красная линия) компонент – верхний график; вейвлет-спектр функции $\cos(\psi_p)$ – нижний график.

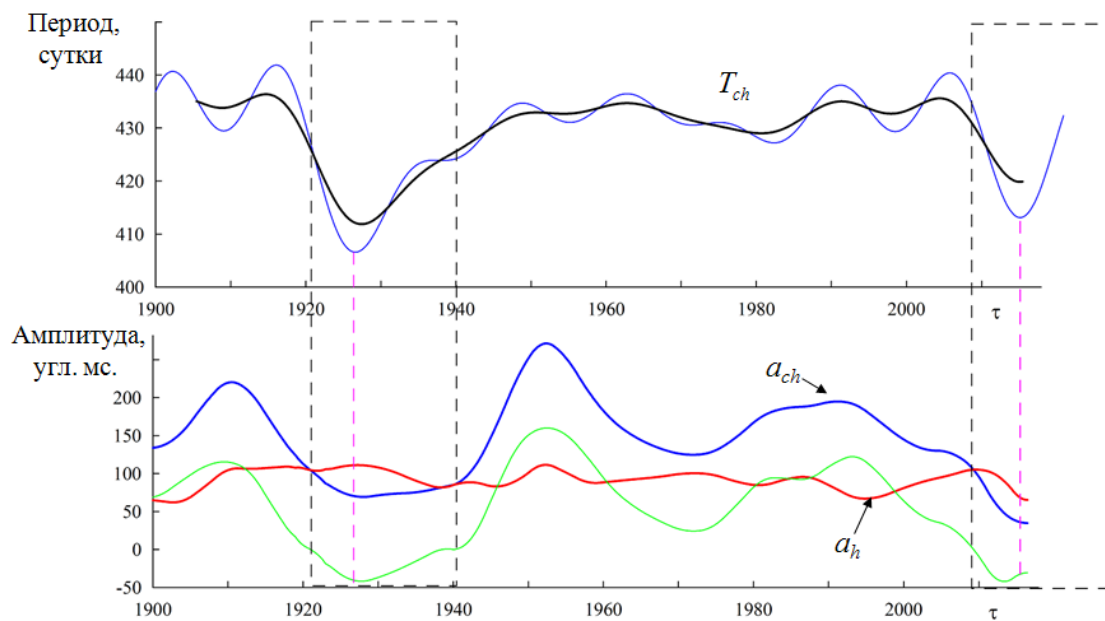


Рис. 2 Верхний рисунок: период чандлеровского колебания, полученный с помощью фильтрации высокочастотных гармоник – синяя линия, и сглаженный график - черная линия. Нижний рисунок: амплитуды чандлеровского и годичного колебаний (синяя и красная линии), а также их разность (зеленая линия).

а соответствующий полярный угол определяется выражением (с точностью до постоянной, определяемой начальным условием):

$$\psi = \arctan \left(\frac{a_h - a_{ch}}{a_h + a_{ch}} \tan \left(\frac{(\nu - N)t + \alpha_h - \alpha_{ch}}{2} \right) \right) + \operatorname{sgn}(a_h - a_{ch}) \pi n + \frac{N + \nu}{2} t, \quad n \in Z, \quad (2)$$

где a_{ch} , a_h , α_{ch} , α_h - амплитуды и фазы чандлеровской и годичной составляющих соответственно.

На рис. 1 построены графики амплитуд чандлеровской и годичной компонент и вэйвлет-спектр функции $\cos(\psi_p)$. Амплитуды были вычислены из обработки данных МСВЗ по движению земного полюса, используя анализ огибающих результирующей амплитуды a_p , рассмотренный в главе 3.

В разделе 1.4 рассмотрены кинематические свойства движения полюса в окрестности изменения средней частоты его движения. Показано, что эффект смены колебательного режима, заключается в согласованном изменении средней частоты $\langle \dot{\psi} \rangle_T$ движения полюса вокруг полюса инерции и в изменении чандлеровской частоты (рис. 2). На рис. 2 показано, что наряду с корреляцией периода и амплитуды чандлеровского колебания, наблюдается резкое уменьшение периода при изменении средней частоты обращения полюса.

Во **второй главе** диссертации исследуется динамика возмущенного колебательного процесса земного полюса, синфазного с прецессионным движением лунной орбиты.

В разделах 2.1, 2.2 предложено два способа преобразования координат земного полюса к системе, в которой его движение происходит синфазно с изменением ориентации плоскости лунной орбиты по отношению к экватору Земли. Параметры преобразования определяются средними параметрами движения земного полюса и не зависят явно от времени. Первый способ преобразования использует только численную обработку данных наблюдений, а второй использует кинематические свойства движения полюса, исследованные в первой главе.

В разделе 2.3 с помощью численной обработки ряда C01 данных наблюдений и измерений о движении земного полюса на длительном интервале времени начиная с 1900 года выделен колебательный процесс земного полюса, связанный с прецессионным движением орбиты Луны. Показано, что в новой системе

координат (ξ_p, η_p) после преобразования полярный радиус b совершает колебания, синфазные с колебаниями угла наклона плоскости лунной орбиты к земному экватору (рис.3), а колебания полярного угла $\delta\varphi$ происходят синфазно с отклонением θ вдоль экватора точки пересечения лунной орбиты с экватором (рис. 4).

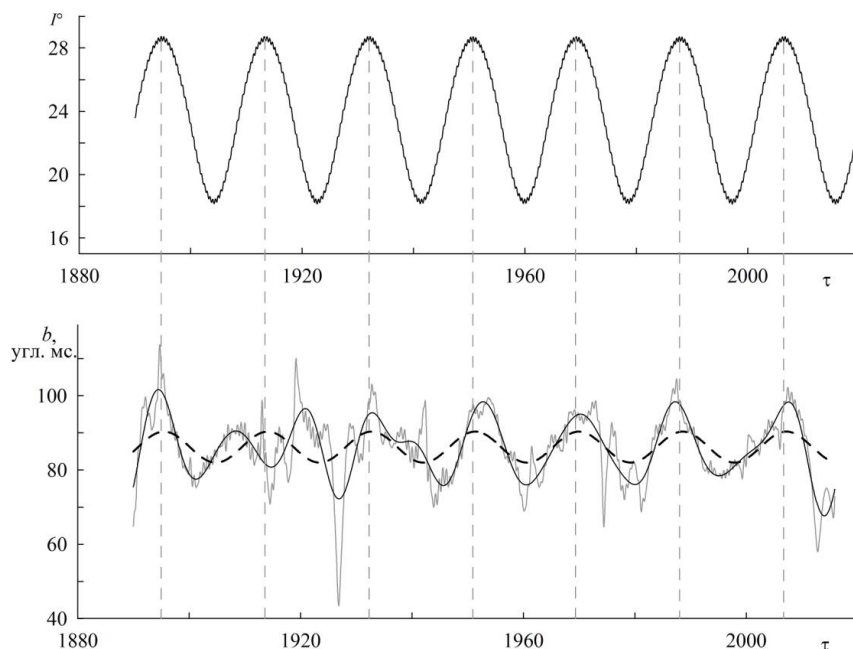


Рис. 3 Вверху - колебания угла наклона орбиты Луны к экватору; внизу - вариации амплитуды b , выделенные из данных наблюдений (серая зигзагообразная линия) в сравнении с ее сглаженными значениями (сплошная плавная линия) и со средней стационарной гармоникой, выделенной из ряда b (пунктирная линия).

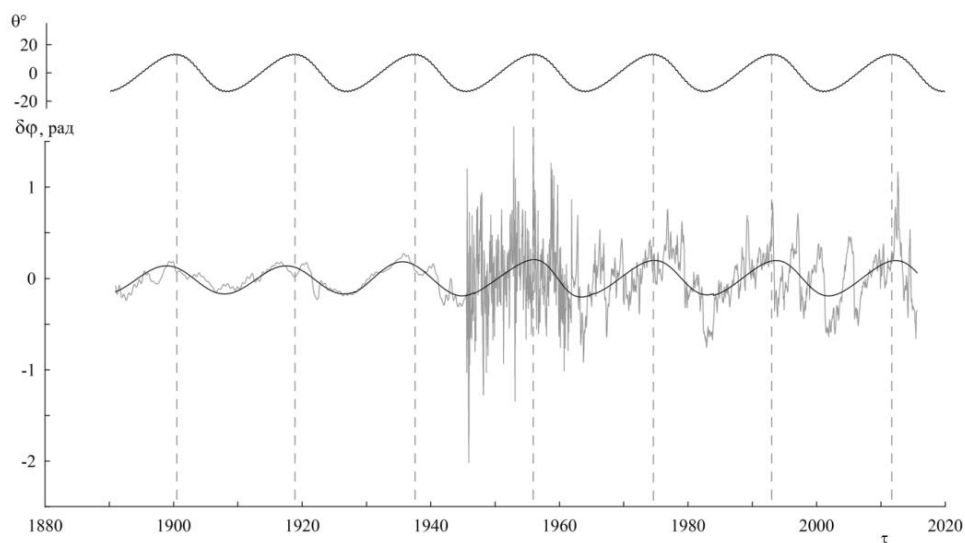


Рис. 4 Вариации полярного угла $\delta\varphi$ земного полюса во вращающейся относительно исходной системе, полученные в результате обработки данных наблюдений и измерений МСВЗ (внизу) в сравнении с колебаниями угла θ отклонения вдоль экватора точки пересечения экватора с лунной орбитой (вверху).

Во второй части главы исследуется вклад основных геофизических возмущений (атмосферного и океанического) в колебательный процесс, синфазный с прецессией лунной орбиты. В разделе 2.4 получены решения дифференциальных уравнений движения земного полюса с учетом кинетического момента атмосферы и углового момента океана и выделена 18-летняя гармоника рассматриваемого колебательного процесса. Показано, что найденные гармоники только частично могут быть обусловлены колебаниями подвижных сред атмосферы и океана.

В третьей главе предлагается модификация преобразования координат земного полюса на основе аналитического представления амплитуды и вариации полярного угла, которая позволяет упростить идентификацию 18-летних колебаний в движении земного полюса.

В разделах 3.1 рассмотрено несколько способов определения вариаций полярного радиуса в системе (ξ_p, η_p) после преобразования, использованного в главе 2. Преобразование выполняется в полярных координатах:

$$\begin{aligned} x &= c_x + a_p \cos \psi_p, & y &= c_y + a_p \sin \psi_p, & x_1 &= a_p \cos \delta \psi_p, & y_1 &= a_p \sin \delta \psi_p, \\ x_1 &= a_0 + b \cos \varphi, & y_1 &= b \sin \varphi, & \xi_p &= b \cos \delta \varphi, & \eta_p &= b \sin \delta \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где x, y – координаты земного полюса, публикуемые МСВЗ, c_x, c_y – координаты «среднего» полюса, a_0 – средняя амплитуда a_p , вариации $\delta \psi_p, \delta \varphi$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \delta \psi_p &= \psi_p - \langle \dot{\psi}_p \rangle_T t = \frac{\psi_h - \psi_{ch}}{2} \int_{t^0}^t \frac{a_h(t)^2 - a_{ch}(t)^2}{a_p^2(t)} d(\psi_h - \psi_{ch}), \\ \delta \varphi &= \varphi - \text{sgn}(a_h - a_{ch}) ((\nu - N)t + \alpha_h - \alpha_{ch}). \end{aligned} \quad (4)$$

В разделе 3.2 показано, что полярный радиус равен полуразности $\frac{a_{\max} - a_{\min}}{2}$ огибающих $a_{\max}, a_{\min}$ амплитуды a_p движения полюса в исходной системе, а точность определения огибающих амплитуды достаточна для определения 18-летнего цикла.

В разделе 3.3 получено аналитическое выражение вариации полярного угла $\delta \varphi$ в новой системе после рассмотренного преобразования:

$$\delta\varphi = \psi_p + \operatorname{sgn}(a_h - a_{ch}) \left(\frac{\nu - N}{2} t + \delta\psi_p^{inv} + \psi_h - \psi_{ch} \right) - \frac{\nu + N}{2} - \Psi(t), \quad (5)$$

где $\Psi(t)$ - ступенчатая функция, устраняющая разрыв в момент смены доминирующей гармоники, $\delta\psi_p^{inv}$ - вариация полярного угла после отражения относительно оси абсцисс случая $a_h > a_{ch}$:

$$\delta\psi_p^{inv}(a_{ch}, a_h, \psi_h, \psi_{ch}) = \frac{1}{4} \int_{t_0}^t \frac{|a_{\max}^2(t) - a_{\min}^2(t)|}{a_p^2(t)} d(\psi_h - \psi_{ch}) - \frac{\psi_h - \psi_{ch}}{2}. \quad (6)$$

Разность фаз $\psi_h - \psi_{ch}$ определяется из выражения:

$$a_p = \frac{1}{2} \left(a_{\max}^2 + a_{\min}^2 + (a_{\max}^2 - a_{\min}^2) \cos(\psi_{ch} - \psi_h) \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Таким образом, для определения вариаций полярного угла $\delta\varphi$ достаточно знать амплитуду a_p , полярный угол ψ_p движения полюса вокруг среднего положения и временные моменты перехода колебаний полюса из одного режима в другой.

В разделе 3.4 показано, что найденные колебания полюса, согласованные с пространственным движением орбиты Луны, обусловлены вариациями амплитуды и фазы как чандлеровской, так и годичной составляющих одновременно.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена уточнению модели прогнозирования движения земного полюса с учетом долгопериодических лунных возмущений с частотой прецессии орбиты Луны.

В разделе 4.1 с помощью численной обработки данных наблюдений на основе спектрального анализа показано, что амплитуда найденного 18-летнего колебательного процесса не является постоянной, а его частота и фаза стабильны и согласованы с изменением угла наклона плоскости лунной орбиты к земному экватору.

Разделим спектр колебаний земного полюса на области. В спектре чандлеровской компоненты по каждой из координат оставим окрестность частоты 0.843 циклов в год с границами $0.843 \pm 0.157/2$ циклов в год. Аналогично, к спектру годичной компоненты отнесем окрестность частоты 1 цикл в год с границами $1 \pm 0.157/2$ циклов в год. Совокупность чандлеровской и годичной

компонент будут содержать все колебания из спектрального интервала $0.765 \div 1.0785$ циклов в год. В результате дополнительные гармоники, приводящие к 18-летней модуляции основных компонент с частотой прецессии орбиты Луны попадают в соответствующие области. Для каждой из выделенной компоненты применим преобразование, аналогичное рассмотренному во второй главе. Совершив поворот системы координат на переменный угол, соответствующий средней чандлеровской или годичной частотам, получим чандлеровское и годичное колебания в преобразованных системах (ξ_{ch}, η_{ch}) и (ξ_h, η_h) соответственно. После выполненных преобразований спектры модулирующих гармоник, близких к чандлеровской и годичной частотам, перейдут в низкочастотную область, в которой выделяются колебания с 18-летним периодом. Эти колебания в $\xi_{ch/h}, \eta_{ch/h}$ оказываются синфазными колебаниям угла I наклона лунной орбиты к экватору Земли и угла θ отклонения вдоль экватора точки пересечения лунной орбиты с экватором, соответственно.

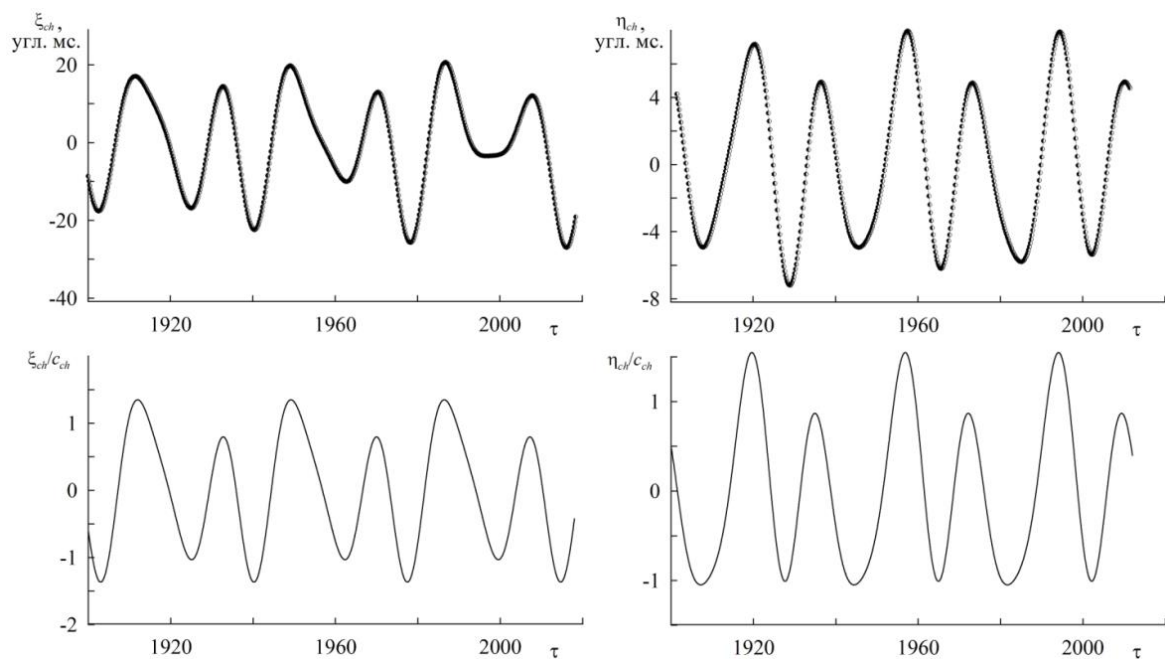


Рис.5 Сравнение суммы комбинационных гармоник (8) (сплошные линии) с колебаниями η_{ch}, ξ_{ch} , выделенными из наблюдений (дискретные точки).

В разделе 4.2 из анализа спектров чандлеровской и годичной составляющих установлено, что амплитуда 18-летней цикличности испытывает вариацию с периодом вдвое большим.

Зададим колебания по $\xi_{ch/h}$, $\eta_{ch/h}$ следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\xi_{ch} &\cong c_{ch} \left[\cos \Omega - \sin \frac{\Omega}{2} \sin \Omega \right], & \eta_{ch} &\cong c_{ch} \left[-\sin \Omega - \sin \frac{\Omega}{2} \cos \Omega \right], \\ \xi_h &\cong c_h \left[\cos \Omega + \sin \frac{\Omega}{2} \sin \Omega \right], & \eta_h &\cong c_h \left[-\sin \Omega + \sin \frac{\Omega}{2} \cos \Omega \right],\end{aligned}\quad (8)$$

где Ω - долгота восходящего узла лунной орбиты.

На рис. 5 сравниваются колебания функций ξ_{ch}/c_{ch} , η_{ch}/c_{ch} , построенных согласно (8) с выделенными из наблюдений колебаниями (для годичной компоненты аналогично). Комбинационные гармоники чандлеровской и годичной компонент входят в суммы (8) с разными знаками. Это приводит к сдвигу фаз колебаний ξ_{ch}, η_{ch} относительно колебаний ξ_h, η_h . В частности, отсюда следует, что возникают ситуации, когда выражения (8) для одной компоненты близки к нулю, а для другой компоненты имеют максимум или минимум. То есть найдутся интервалы времени, на которых по одной компоненте 18-летняя цикличность практически пропадает, а по другой - имеет максимальную амплитуду.

В разделе 4.3 приводятся результаты численного моделирования на длительном интервале времени - построения серии прогнозов траектории движения земного полюса. Показано, что учет найденных колебаний позволяет повысить точность определения положения земного полюса в среднем на 11-12 см.

Сравним точность экстраполяций трех моделей: 1 - двухчастотной модели, 2 - модели с учетом стационарной 18-летней цикличности и 3 - модели с дополнительными слагаемыми (8). На интервале верификации модель применялась в автономном режиме, то есть без коррекции параметров. Параметры чандлеровской и годичной компонент определяются на заранее выбранном тестовом интервале аппроксимации согласно двухчастотной модели. Оценка параметров основных компонент колебаний полюса влияет на оценку изменения точности модели при учете дополнительных слагаемых. Этот эффект возникает из-

за близости частот дополнительных слагаемых к чандлеровской и годичной частотам.

В этом случае необходимо произвести серию расчетов, например, осуществляя сдвиг тестового интервала по временной шкале. Для определения параметров двухчастотной модели в работе был выбран фиксированный тестовый временной интервал длиной в 15 лет. Расчеты проводились в итерационном режиме со сдвигом начала тестового интервала с 1900 года до 2005 года с шагом в 2 года. Как показали расчеты, при изменении длительности тестового интервала и увеличении шага результаты качественно друг от друга не отличаются.

Так как точность измерений до 1962 года была низкой, то значения с.к.о. экстраполяций, построенных на временные промежутки из этого интервала, будут завышены. Поэтому экстраполяции строились, начиная с 1962 года. При этом низкая точность измерений до 1962 года не является негативным фактором для выбора тестового интервала, так как интерес представляет поведение с.к.о. экстраполяций при большом разбросе возможных значений параметров чандлеровской и годичной компонент. Кроме того, значения параметров чандлеровской и годичной компонент (их амплитуды и фазы) на интервале до 1950 года сильно отличались от их современных значений, так что стохастическая составляющая в измерениях для тестового интервала не вносит негативных последствий в расчеты.

В первом численном эксперименте с.к.о. рассчитывались для двухлетних экстраполяций, начиная с 1962 года по 2020 год с шагом в 1 год. Параметры модели оценивались на 15-летнем тестовом интервале, начиная с 1900 года, который сдвигался с шагом в 2 года. Каждому тестовому интервалу ставилось в соответствие среднее значение с.к.о. двухлетних экстраполяций за весь указанный период. На рис. 6а приводятся разности средних с.к.о. экстраполяций между моделями 1, 2 и 3. Каждое значение среднего с.к.о. было отнесено к началу тестового интервала. Из рис. 6а видно, что в окрестности 1920 года графики разностей с.к.о. были отрицательными. Этот интервал соответствует изменению фазы чандлеровской компоненты. То есть, на тестовый интервал определения

параметров модели приходится изменение фазы чандлеровской компоненты. Как следствие, модель непригодна для построения экстраполяции на дальнейшее время. При этом дополнительные слагаемые, как следует из эксперимента, приводят к еще большему снижению точности.

Для тестовых интервалов, взятых после изменения фазы чандлеровского колебания, точность определения положения полюса повышается в среднем на 5 см при учете только 18-летней цикличности и на 17 см при учете комбинационных гармоник (8).

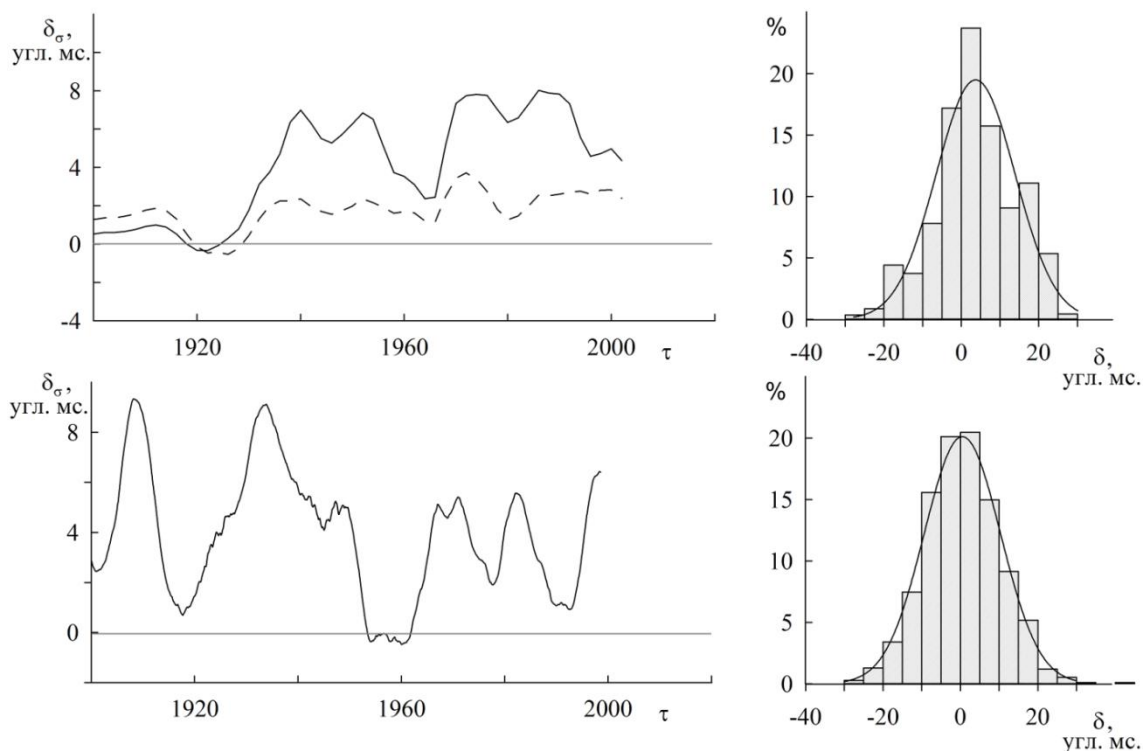


Рис. 6 а) Разности средних с.к.о. экстраполяций между моделями 1, 2 (пунктирная линия) и 1, 3 (сплошная линия). Экстраполяции отнесены к началу тестового интервала;
 б) Разности средних с.к.о. моделей (3) и (9) с учетом комбинационных гармоник (10), отнесенные к середине интервала экстраполяции;
 в) Гистограмма отклонений модели (9) от данных наблюдений в каждой точке ряда C01;
 г) Гистограмма отклонений значений ряда C01 MCB3 от сглаженных значений.

Во втором численном эксперименте рассчитывались средние значения с.к.о за каждый 18-летний интервал экстраполяции моделей 1, 3 для всех 15-летних тестовых интервалов. Тестовые интервалы сдвигались с шагом в 2 года, начиная с 1900 года. Интервал экстраполяции сдвигался с шагом, соответствующим скважности ряда C01 MCB3 начиная с 1900 года. Полученные значения средних

с.к.о ставились в соответствие началам интервалов экстраполяций. На рис. 6б приводятся разности средних с.к.о. моделей 1, 3.

В окрестности 1960 года точность модели с учетом дополнительных слагаемых ниже точности двухчастотной модели в среднем на 0.8 см. В среднем на всем интервале с 1900 года точность определения положения полюса повышается на 11.5 см.

На рис. 6в приводится гистограмма отклонений δ (разброс разности с.к.о. моделей 1 и 3 от данных наблюдений в каждой точке ряда C01). Гистограмма построена в процентах, а по оси абсцисс отложены значения отклонений δ в угловых миллисекундах. Положительная величина δ соответствует уточнению модели, а отрицательное значение – ухудшению ее точности.

В 67% всех отклонений наблюдается повышение точности в среднем на 19 см и в 33% наблюдается ухудшение точности в среднем на 7.5 см. Полученный разброс отклонений от данных в каждой точке, соответствующей ряду C01, идентичен разбросу отклонений полюса от сглаженной его траектории. Гистограмма рис. 6г построена по отклонениям значений ряда C01 от сглаженных значений (которые включают тренд и основное движение полюса). Из сравнения гистограмм видно, что максимальный разброс в отклонениях одинаковый, а среднее значение на гистограмме рис. 6в согласно нормальному закону распределения смещается в положительную сторону на 3.71 угловых миллисекунд, что и соответствует уточнению на 11.5 см.

Таким образом, графики рис. 6 свидетельствуют о повышении точности экстраполяций модели с учетом исследуемой 18-летней цикличности и ее вариаций с частотой вдвое ниже. При этом повышение точности модели достигается практически при любых оценках параметров чандлеровской и годичной компонент, даже самых неподходящих, когда фаза чандлеровской компоненты смещена на противоположную. Исключением является сам интервал резкой смены фазы чандлеровского колебания, для которого точность модели 3 падает в среднем на 1 см.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Показано, что изменение соотношения амплитуд основных гармоник колебания земного полюса приводит к изменению средних параметров его движения. Установлен эффект смены колебательного режима полюса, который заключается в согласованном изменении частоты чандлеровских колебаний и средней частоты обращения полюса вокруг полюса инерции.
2. С помощью численной обработки астрометрических данных измерений положения земного полюса найден колебательный процесс, связанный с прецессионным движением орбиты Луны. Предложено несколько способов преобразования координат земного полюса к системе, в которой его движение происходит синфазно с изменением ориентации плоскости лунной орбиты по отношению к экватору Земли. Показано, что в этой системе полярный радиус совершает колебания синфазные с колебаниями угла наклона плоскости лунной орбиты к земному экватору, а колебания полярного угла происходят синфазно с отклонением вдоль экватора точки пересечения лунной орбиты с экватором.
3. С помощью численного интегрирования уравнений движения земного полюса и обработки данных NCEP/NCAR циркуляции атмосферы и данных NASA/JPL углового момента океана исследован вклад основных геофизических возмущений (атмосферного и океанического) в колебательный процесс, синфазный с прецессией лунной орбиты. Показано, что найденные гармоники только частично могут быть обусловлены колебаниями подвижных сред атмосферы и океана.
4. Установлено, что колебания, согласованные с пространственным движением орбиты Луны, присутствуют как в чандлеровской, так и в годичной компонентах движения земного полюса. Реализован алгоритм аппроксимации и прогноза траектории движения полюса. Показано, что учет найденных колебаний в уравнениях движения земного полюса позволяет повысить точность определения его положения в среднем на 11.5 см для автономной модели без коррекции параметров.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- в изданиях, рекомендованных ВАК, индексируемых WoS, Scopus:

1. Крылов С.С., Перепёлкин В.В., Сое Вэй Ян Краткосрочный прогноз движения земного полюса с учетом лунных возмущений// Известия РАН МТТ.2020, №6, С.157-164.

2. Перепёлкин В.В., Рыхлова Л.В., Сое Вэй Ян О синфазности вариаций параметров движения земного полюса и прецессии орбиты Луны // Астрономический журнал. 2022, Т. 99, № 1, С. 75-87.

3. Perepelkin V.V., Rumyantsev D.S., Wai Yan Soe. The problem of forecasting Earth pole trajectory when changing the average parameters of its motions// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 927(2020) 012033. doi: 10.1088/1757-899X/927/1/012033.

- в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

4. Перепёлкин В.В., Филиппова А.С., Вэй Ян Сое. Уточненная модель долгосрочного прогноза движения земного полюса// Космонавтика и ракетостроение, 1(100), 2018, с.143-150.

5. Перепёлкин В.В., Румянцев Д.С., Вэй Ян Сое. Прогнозирование колебаний земного полюса при изменении средней частоты его движения // Космонавтика и ракетостроение, 5(116), 2020, с. 5-11.

6. Крылов С.С., Перепёлкин В.В., Почукаев В.Н., Вэй Ян Сое. Об изменении средней частоты движения земного полюса под действием лунно-солнечных возмущений // Космонавтика и ракетостроение, 6(117), 2020, с. 5-11.

7. ВэйЯнСое. Уточненная малопараметрическая модель движения земного полюса // Труды МАИ, 2021, № 116.

- **В других изданиях:**

8. Перепёлкин В.В., Филиппова А.С., Вэй Ян Сое. Краткосрочный прогноз движения земного полюса при нестационарных возмущениях// Тезисы докладов Всероссийской астрометрической конференции – «Пулково-2018», 1-5 октября, 2018, Санкт-Петербург. С.35.

9. Перепелкин В.В., Крылов С.С, Вэй Ян Сое. Моделирование и анализ движения земного полюса при нестационарных возмущениях// Тезисы докладов 8-й Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» КВНО-2019, 15-19 апреля 2019, Санкт-Петербург. С-170-171. СПб:ИПА РАН.

10. Перепёлкин В.В., Вэй Ян Сое. Прогноз движения земного полюса с учетом пространственного движения системы Земля-Луна// Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Выпуск 10. Часть 1 / Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». ISSN 0536-101X (print) ISSN 2618-7299 (online) Международная научно-техническая конференция МИИГАИК 2019, 15-19 апреля 2019, Москва. С. 138-142.

11. Perepelkin V.V., Filippova A.S., Wai Yan Soe. Spatial motion of the Earth-Moon system and Earth pole oscillatory process// https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2019/E_PPS06-P14/public/pdf?type=in Japan Geoscience Union Meeting 2019, 26-30 May, Chiba, Japan.

12. Вэй Ян Сое. Прогноз колебаний земного полюса на длительные интервалы времени// Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли NPNJ' 2018, 24-31 мая 2018, Алушта, Крым. С.360. Изд-во: МАИ. ISBN 978-5-4316-0491-1.

13. Вэй Ян Сое. Численно-аналитическая модель краткосрочного прогноза ПВЗ с учетом высокочастотных лунных возмущений// Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам ВМСППС' 2019, 24-31 мая 2019, Алушта, Крым. Изд-во: МАИ. ISBN 978-5-4316-0589-5.

14. Вэй Ян Сое. Построение высокоточного прогноза движения земного полюса// 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» 18-22 ноября 2019 г. Москва. С. 181-182.

15. Вэй Ян Сое. Оценка точности приближения двухчастотной модели движения полюса Земли к данным наблюдений// 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» 23-27 ноября 2020г.Москва.С.455.