

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Никончук Даниил Викторович

**ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ГЛАВНЫХ СПУТНИКОВ УРАНА
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность – 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2013

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Емельянов Николай Владимирович
заведующий отделом небесной механики
Государственного астрономического института
им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Ивашкин Вячеслав Васильевич
ведущий научный сотрудник
Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

кандидат физико-математических наук,
Чазов Вадим Викторович
старший научный сотрудник отдела астрометрии
Государственного астрономического института
им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН

Защита состоится 19 декабря 2013 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), расположенном по адресу: Университетский проспект, дом 13, 119991, Москва

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, д.27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан 07 ноября 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы. Теории движения планет и спутников необходимы для получения эфемерид небесных тел и проведения космических миссий. Чтобы сделать самые точные эфемериды, нужно уточнить параметры движения по всем имеющимся наблюдениям. Необходимо постоянно уточнять эфемериды при появлении новых порций наблюдений этих небесных тел. Построение теорий движения выполняется путем решения дифференциальных уравнений движения планет и спутников. Для этого применяются как аналитические методы, так и методы численного интегрирования.

Пять главных спутников Урана расположены в следующем порядке по возрастанию расстояния от планеты: Миранда, Ариель, Умбриель, Титания, Оберон. Первыми из них были открыты Титания и Оберон в 1787 году Уильямом Гершелем. Несмотря на тот факт, что два из пяти главных спутников Урана были открыты еще в XVIII веке, теории движения этих спутников появились сравнительно недавно.

В конце восьмидесятых годов прошлого века была построена аналитическая теория движения главных спутников Урана (Laskar and Jacobson, 1987), называемая GUST86, основанная на наблюдениях, выполненных на интервале времени с 1911 по 1986 год, включая наблюдения с космического аппарата Вояджер-2. Взаимное притяжение спутников учитывалось в этой теории классическим методом вековых возмущений Лагранжа-Лапласа, а также добавлением основных короткопериодических возмущений. При этом в уравнения для вековых возмущений были добавлены члены, обусловленные влиянием несферичности планеты. Другие возмущения не учитывались. В разложении возмущающей функции по степеням наклона и эксцентриситета в теории GUST86 были оставлены только главные члены не выше второй степени, обеспечивающие тем самым вычисление линейных возмущений.

Во второй главе нашей работы построена нелинейная теория вековых возмущений спутников сжатой планеты, в которой учтены члены четвертой степени в разложении вековой части возмущающей функции по степеням малых наклонов и эксцентриситетов орбит. Показано, что вековые члены четвертых степеней вносят существенный вклад в эволюцию орбит спутников, прежде всего Миранды, на интервалах порядка ста лет.

После 1986 года было накоплено большое количество новых, в том числе более точных наблюдений главных спутников Урана. Рассогласование теории GUST86 с этими наблюдениями оказалось недопустимо большим. Появилась необходимость построения новой модели движения спутников.

Первая модель движения главных спутников Урана, основанная на численном интегрировании уравнений движения, была опубликована в работе Тейлора (Taylor, 1998). Модель основывалась на наблюдениях, выполненных на небольшом интервале времени с 1977 по 1995 год.

В 2008 году В. Ленеи (Laineu, 2008) разработал новую модель движения главных спутников Урана. Эта модель построена путем численного интегрирования дифференциальных уравнений движения спутников. В правых частях уравнений учитывались возмущения от следующих факторов: вторая и четвертая зональные гармоники разложения силовой функции притяжения Урана, взаимное притяжение спутников и возмущения от Солнца. Для уточнения своей модели В. Ленеи использовал наземные наблюдения главных спутников Урана, выполненные с 1948 по 2006 годы, и наблюдения, сделанные с помощью космического аппарата Вояджер-2 в 1985-1986 годах.

В силу свойств орбитального движения спутников точность эфемерид ухудшается с удалением момента эфемерид от момента последнего наблюдения, использованного при создании модели движения спутников. Кроме того известно, что точность эфемерид возрастает при увеличении интервала времени наблюдений, на которых они основаны (Emelyanov, 2010). Для главных спутников Урана повышения точности эфемерид можно добиться путем использования всех доступных наблюдений, включая те, которые были выполнены в прошлых веках, с подходящим подбором весов наблюдений в процедуре метода наименьших квадратов при уточнении параметров орбит по наблюдениям.

В данной работе мы предлагаем новую модель движения главных спутников Урана, разработанную методом численного интегрирования уравнений движения спутников и основанную на наблюдениях. Преимущество нашей модели по сравнению с результатами предшествующих работ заключается в том, что при улучшении орбит спутников были использованы все доступные на данный момент времени наблюдения спутников Урана, начиная с момента их открытия в 1787 году, до 2008 года, т. е. на интервале более 220 лет. Кроме того, преимущества нашей новой модели обеспечиваются также тем, что мы использовали новые высокоточные астрометрические положения спутников, выведенные из фотометрии взаимных покрытий и затмений главных спутников Урана в 2008 году.

Главные спутники планет вызывают приливы в вязко-упругом теле планеты. Действие таких приливов должно приводить к замедлению орбитального движения. В возмущениях орбитальной долготы должен появляться член, пропорциональный квадрату времени, а большая полуось орбиты должна иметь линейное по времени изменение. Этот эффект может быть обнаружен и

исследован только на основе наблюдений. До сих пор никто не определял из наблюдений параметры векового замедления главных спутников Урана. Попытка такого определения сделана в диссертации.

Актуальность работы очевидна, так как существующие теории движения главных спутников Урана требуют уточнения путем использования наблюдений на более широком интервале времени и новых высокоточных наблюдений.

Цель работы заключается в уточнении модели эволюции орбит и построении новой, более точной теории движения главных спутников Урана на основе всех доступных наблюдений.

Достижение указанной выше цели обусловило постановку и последовательное решение следующих **задач**:

- построение нелинейной теории вековых возмущений спутников сжатой планеты, применение данной теории к системе спутников Урана и оценка вклада дополнительных членов четвертой степени вековой части возмущающей функции в эволюцию элементов орбит спутников на больших интервалах времени.
- построение новой модели движения главных спутников Урана с помощью численного интегрирования дифференциальных уравнений движения спутников.
- уточнение параметров движения спутников Урана по всем доступным на данный момент наблюдениям, начиная с момента их открытия, т.е. на интервале в более 220 лет, включая новые высокоточные астрометрические данные, полученные из обработки фотометрических наблюдения взаимных покрытий и затмений спутников.
- изучение и определение негравитационных эффектов в системе спутников Урана, попытка численного определения значений коэффициентов диссипации механической энергии спутников Урана на основе имеющихся наблюдений.
- создание новых эфемерид главных спутников Урана, построенных на большем интервале времени, на основе более широкого набора наблюдений, чем это было сделано другими авторами.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем.

- Впервые классическая теория вековых возмущений Лагранжа-Лапласа уточнена и усовершенствована путем учета в вековой части возмущающей функции членов четвертой степени

относительно эксцентриситетов и наклонов орбит спутников. Показано, что учет этих членов вносит существенный вклад в эволюцию орбит спутников Урана, прежде всего Миранды, на интервалах порядка ста лет.

- Построена новая теория движения и эфемериды главных спутников Урана. Новизна по отношению к существующим теориям заключается в том, что новая модель уточнена на основе большего ряда наблюдений на более широком интервале времени, включая более точные наблюдения.
- Впервые определены коэффициенты диссипации механической энергии главных спутников Урана на основе наблюдений. На самом деле спутники приобретают энергию за счет приливов в теле Урана, который вращается быстрее орбитального движения спутников.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в создании новой теории вековых возмущений в движении спутников планет, которая представляет собой следующий шаг в развитии классических моделей в небесной механике. Теория движения спутников Урана расширена путем включения в модель движения негравитационных эффектов.

Практическая значимость диссертации состоит в создании новых эфемерид главных спутников Урана. Эфемериды являются одновременно результатом и средством исследований, поскольку содержат в себе все знания о динамике спутников, включая все выполненные наблюдения, и служат инструментом для дальнейшего изучения Солнечной системы с помощью наземных наблюдений и исследований с помощью космических межпланетных аппаратов.

В диссертационной работе применялись современные **методы исследований** с максимальным использованием мощной вычислительной техники и совершенных средств программирования. Успех дела в большой степени зависел от мастерства и изобретательности при программировании решения задачи для компьютера. Решение достигнуто путем составления весьма сложных и объемных вычислительных программ. В частности, были оптимально запрограммированы аналитические операции над тригонометрическими рядами, чтобы получить решение за приемлемое время работы компьютера.

На защиту выносятся ряд следующих результатов и положений:

- Новая теория вековых возмущений в задаче о движении системы спутников с учетом их взаимного притяжения и сжатия планеты, построенная путем развития классической теории

вековых возмущений Лагранжа-Лапласа. Получены дополнительные члены в вековых возмущениях, повышающие точность этой теории и дающие существенный вклад в эволюцию орбит главных спутников Урана, прежде всего Миранды, на больших интервалах времени.

- Новая модель движения пяти главных спутников Урана, основанная на всех опубликованных наблюдениях с моментов их открытий до 2008 года. Для спутников Титания и Оберон это период 220 лет, для спутников Ариэль и Умбриэль – 160 лет, для Миранды 60 лет. Для уточнения параметров движения спутников использованы 30139 наблюдений, включая наблюдения с космического аппарата Вояджер-2, а также астрометрические результаты фотометрических наблюдений взаимных покрытий и затмений главных спутников Урана в 2007-2008 годах. Модель построена путем численного интегрирования уравнений движения с учетом всех необходимых возмущений. Среднеквадратичная величина остаточных отклонений наблюдаемых геоцентрических положений спутников от их эфемеридных положений составляет 0.43 сек. дуги. С учетом весовых коэффициентов наблюдений эта величина оказалось равной 0.12 сек. дуги.
- Параметры диссипации механической энергии орбитального движения спутников, полученные из наблюдений. Диссипация может быть вызвана приливами планеты и приливами в телах спутников. Получены приближенные значения коэффициентов квадратичного по времени изменения орбитальной долготы спутников. Эти значения оказались равными $-(0.64 \pm 0.11) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Ариэль, $-(0.08 \pm 0.24) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Умбриэль, $-(0.29 \pm 0.09) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Титания, $-(0.32 \pm 0.07) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Оберон и $-(7.56 \pm 1.15) \times 10^{-11}$ рад./сут² для Миранды. Найденные параметры показывают замедление орбитального движения спутников, что соответствует влиянию приливов в теле Урана, который вращается быстрее спутников.
- Новые эфемериды главных спутников Урана на интервале времени с 1787 по 2031 год, основанные на всех опубликованных наблюдениях с моментов их открытий до 2008 года. Эфемериды включены в сервер эфемерид MULTI-SAT, обеспечивающий доступ к эфемеридам через интернет.

Достоверность результатов и обоснованность выводов в диссертации обеспечивается рядом обстоятельств. Во-первых, для получения наиболее адекватной действительности модели

движения и эфемерид главных спутников Урана использовался наиболее полный набор всех выполненных к настоящему времени наблюдений. Во-вторых, результаты подвергались тщательной проверке. Точность численного интегрирования контролировалась двумя различными методами. Интегрирование выполнялось методом Беликова (Belikov, 1993) и методом Эверхарта (Everhart, 1985). Выполнялось также интегрирование вперед и назад по времени. Сравнение результатов показало, что интегрирование выполняется с большим запасом точности по сравнению с точностью современных наблюдений. Точность эфемерид оценивалась путем сравнения моделей, полученных по разным составам наблюдений при различных критериях отбрасывания грубых наблюдений. Точность найденных значений коэффициентов при учете негравитационных эффектов в движении главных спутников Урана также оценивалась сравнением вычислений с различными составами наблюдательного материала. Кроме того, построенные эфемериды сопоставлялись с эфемеридами главных спутников Урана, созданными в предшествующих работах других авторов. Во всех случаях получены реальные оценки точности результатов.

Материалы, представляющие содержание диссертации, опубликованы в следующих **работах**:

- Никончук Д. В. Нелинейная теория вековых возмущений спутников сжатой планеты. Письма в *Астрономический журнал*. 2012. Т. 38. N 12. С. 904-920.
- Emelyanov N. V., Nikonchuk D.V. Ephemerides of the main Uranian satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Advance Access published October 24, 2013, doi:10.1093/mnras/stt1851.

Апробация работы. Диссертация обсуждена и рекомендована к защите на заседании кафедры небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Основные результаты диссертации докладывались на заседаниях отдела небесной механики ГАИШ, а также в докладе на Всероссийской астрономической конференции «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013), проходившей в Санкт-Петербурге (Н.В.Емельянов, Д.В.Никончук, Эфемериды главных спутников Урана).

Личный вклад автора. Разработка новой нелинейной теории вековых возмущений спутников сжатой планеты проводилась автором диссертации. Построение теории движения спутников Урана и уточнение теории по наблюдениям спутников проводилось совместно с научным руководителем, Емельяновым Н.В.

Краткое содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Введение

Обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования. Показана научная новизна работы. Представлены выносимые на защиту научные положения. Приводится список печатных работ диссертанта.

Глава 1. Обзор предшествующих работ и формулировка новых задач

В первой главе представлены предшествующие работы по данной тематике. Рассмотрены наиболее значимые теории движения главных спутников Урана. Сформулированы задачи данной работы. Обоснована необходимость решения поставленных задач.

Глава 2. Нелинейная теория вековых возмущений спутников сжатой планеты

Во второй главе описывается построение новой нелинейной теории вековых возмущений спутников сжатой планеты. Поставлена задача определения дополнительных вековых возмущений в элементах орбит главных спутников Урана по сравнению с классической теорией Лагранжа-Лапласа, в которой учитывались возмущения до второй степени разложения по степеням наклона и эксцентриситета орбит в разложении вековой части возмущающей функции включительно. Учет членов четвертой степени относительно малых наклонов и эксцентриситетов орбит спутников в разложении возмущающей функции приводит к необходимости решать нелинейные дифференциальные уравнения. Метод решения основан на последовательных приближениях. В итоге процесс решения заключается в многочисленных операциях с отрезками тригонометрических рядов, содержащих сотни членов. Следует отметить, что вековые возмущения элементов орбит спутников, обусловленные взаимным притяжением, появляются также при нахождении короткопериодических возмущений второго порядка относительно масс спутников. В классической теории Лагранжа-Лапласа и в нашей работе эти возмущения не рассматриваются. Дополнительные вековые возмущения, обусловленные учетом членов четвертой степени в разложении возмущающей функции, вносят существенный вклад в эволюцию орбит главных спутников Урана, прежде всего Миранды, на больших интервалах времени. Показано, что на интервалах времени больше 100 лет вклад полученных дополнительных вековых возмущений для спутника Миранда имеет порядок величины эксцентриситета орбиты, что в линейной мере составляет несколько тысяч километров. Для других спутников эффект учета нелинейных членов оказывается меньшим.

Глава 3. Теория движения спутников Урана на основе наблюдений

В третьей главе представлена новая теория движения спутников Урана, разработанная методом численного интегрирования уравнений движения спутников и основанная на наблюдениях. Главное отличие нашей модели от результатов предшествующих работ заключается в том, что при улучшении орбит спутников были использованы все доступные на данный момент времени наблюдения спутников Урана, начиная с момента их открытия в 1787 году, до 2008 года, т. е. на интервале более 220 лет, а также астрометрические результаты фотометрических наблюдений взаимных покрытий и затмений главных спутников Урана в 2007-2008 годах. Последовательно излагаются модель движения спутников Урана и метод улучшения орбит спутников. Подробно описывается состав использованных наблюдений. Распределение невязок всех наблюдений по времени для каждого спутника можно видеть на Рис. 1. Отдельно на Рис. 2 приводится распределение невязок по времени для наблюдений всех пяти спутников, выполненных космическим аппаратом Вояджер-2.

Проведена оценка качества эфемерид. Уточнение параметров движения спутников при разных критериях отбрасывания наблюдений дает нам несколько вариантов эфемерид, полученных с одинаковой формальной точностью, но при разных составах использованных наблюдений. Сравнение таких вариантов эфемерид между собой дает возможность получить некоторые дополнительные оценки точности. Мы провели сравнение вариантов эфемерид, полученных при $\sigma_{lim} = 5.0$ сек. дуги и $\sigma_{lim} = 1.0$ сек. дуги на интервале времени с 1787 по 2031 гг. Для ряда моментов времени с постоянным шагом вычислялось угловое расстояние между геоцентрическими положениями спутника, полученными по двум сравниваемым эфемеридам. Результаты сравнения для каждого из пяти спутников показаны на Рис. 3. На интервале времени с 2000 по 2031 год различия эфемерид не превышают 7 миллисекунд дуги.

Также было проведено сравнение результатов данной работы с результатами работы (Laineu, 2008). Для этого с помощью сервера эфемерид естественных спутников планет MULTI-SAT (Emel'yanov, Arlot, 2008) были определены геоцентрические экваториальные координаты каждого спутника для ряда моментов времени на полном интервале времени, на котором построены эфемериды Laineu (2008). Затем для каждого такого положения спутников вычислялась невязка с нашими эфемеридами, аналогично невязкам наблюдений. При этом использовался наш окончательный вариант эфемерид при $\sigma_{lim} = 5.0$ сек. дуги. Полученные таким образом различия двух эфемерид для всех пяти спутников показаны на Рис. 4.

Отдельным параграфом выполнена попытка определения коэффициентов диссипации механической энергии орбитального вращения спутников. Найденные параметры показывают замедление орбитального движения спутников, что соответствует влиянию приливов в теле Урана, который вращается быстрее спутников. Учет торможения в движении спутника должен приводить к лучшему согласованию модели движения с наблюдениями. В результате мы можем получить более точные эфемериды. Эфемерида спутника, построенная на основе наблюдений с учетом торможения спутника, будет отличаться от эфемериды построенной без учета этого эффекта.

Определены невязки топоцентрических положений спутников между двумя исследуемыми эфемеридами для ряда моментов времени. При этом в обоих случаях использовался один и тот же набор наблюдений (30139 наблюденных положений). Для спутника U5 Миранда вычисления сделаны на интервале времени с 1948 по 2031 год и показаны на Рис. 5. Для остальных четырех спутников такое сравнение сделано на интервале времени с 1788 по 2031 год, результаты даны на Рис. 6. На рисунках видно, что различия в положениях спутников превышают сделанные выше оценки погрешности эфемерид. Эти различия превосходят также уровень точность современных наблюдений. Следовательно, при производстве эфемерид главных спутников Урана на основе наблюдений необходимо учитывать эффект векового замедления орбитального движения спутников.

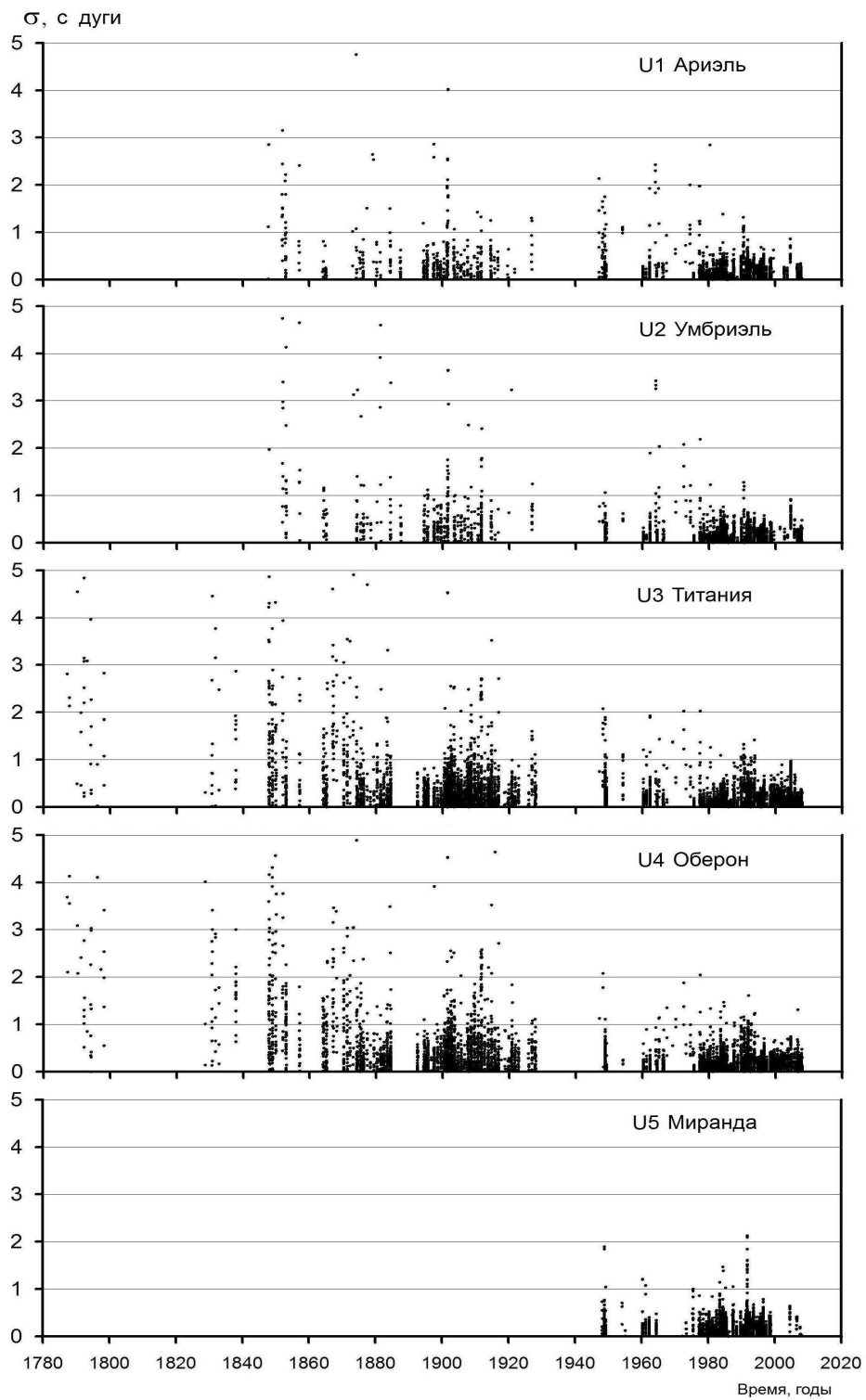


Рис. 1: Невязки наблюдений для каждого спутника.

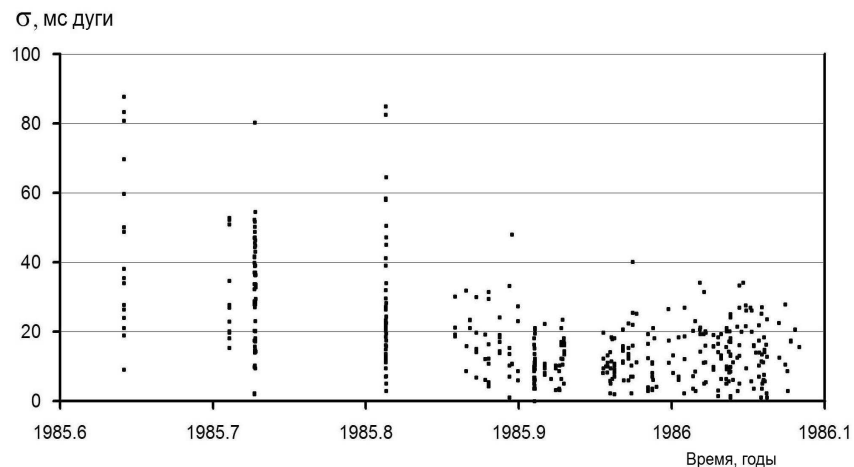


Рис. 2: Нормированные на геоцентрическое расстояние невязки наблюдений пяти спутников с космического аппарата Вояджер-2.

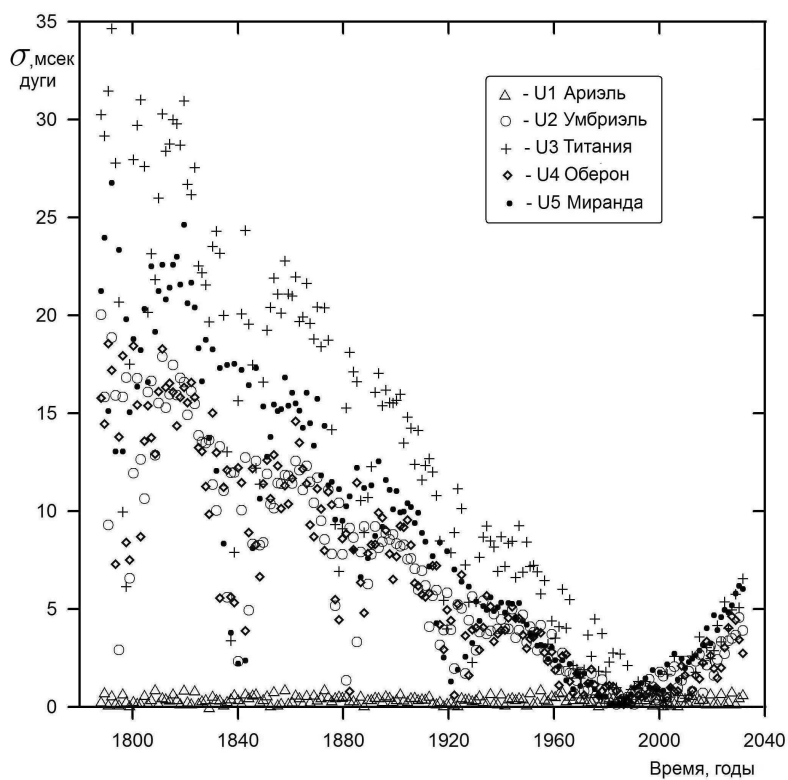


Рис. 3: Сравнение эфемерид, полученных при $\sigma_{lim} = 5.0$ и $\sigma_{lim} = 1.0$. По вертикальной оси отложено угловое расстояние между геоцентрическими положениями спутника, полученными по двум сравниваемым эфемеридам.

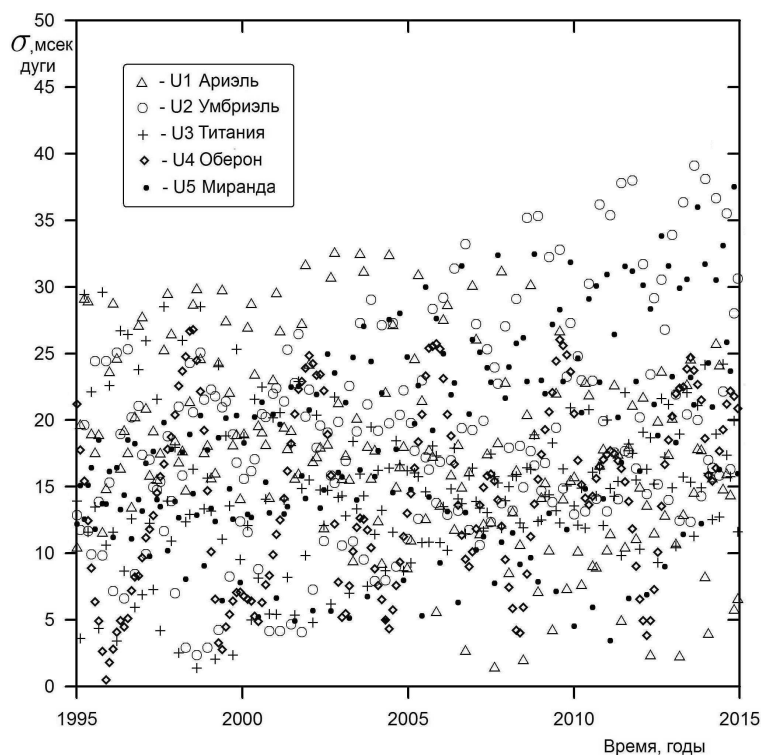


Рис. 4: Невязки эфемерид Lainey (2008) с эфемеридами настоящей работы по пяти спутникам.

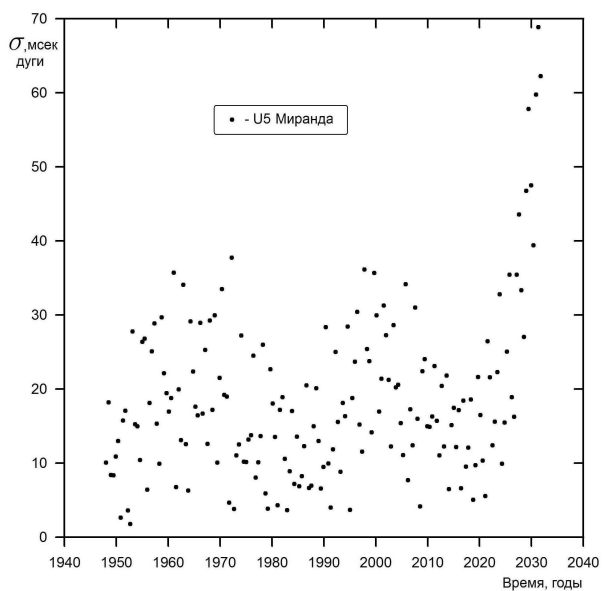


Рис. 5: Разности между топоцентрическими положениями спутника U5 Миранда по эфемеридам, построенным с учетом квадратичного по времени изменения долготы, и по эфемеридам без учета этого эффекта.

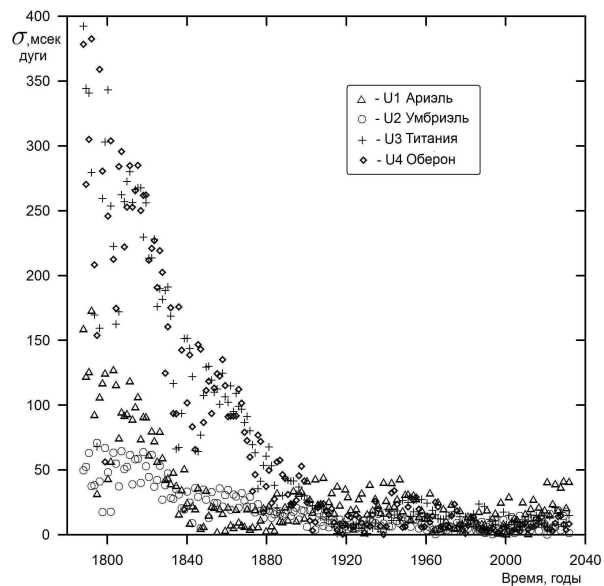


Рис. 6: Разности между топоцентрическими положениями спутников по эфемеридам, построенным с учетом квадратичного по времени изменения долготы, и по эфемеридам без учета этого эффекта.

Заключение и выводы

В заключение диссертации кратко перечислены полученные новые результаты и сформулированы сделанные выводы.

Заключение и выводы

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие новые результаты.

- Построена новая теория вековых возмущений движения спутников сжатой планеты, в которой учитываются члены четвертой степени относительно малых эксцентриситетов и наклонов орбит в разложении возмущающей функции. Тем самым классическая теория вековых возмущений Лагранжа-Лапласа существенно уточнена. Эти результаты ценны и полезны для будущих построений аналитической теории движения спутников и изучения эволюции орбит.
- Разработана новая модель движения пяти главных спутников Урана, основанная на всех опубликованных наблюдениях с моментов их открытий до 2008 года. Для спутников Титания и Оберон это период 220 лет, для спутников Ариэль и Умбриэль – 160 лет, для Миранды – 60 лет. Для уточнения параметров движения спутников использованы 30139 наблюдений, включая наблюдения с космического аппарата Вояджер-2, а также астрометрические результаты фотометрических наблюдений взаимных покрытий и затмений главных спутников Урана в 2007-2008 годах. Модель построена путем численного интегрирования уравнений движения с учетом всех необходимых возмущений. Среднеквадратичная величина остаточных отклонений наблюдаемых геоцентрических положений спутников от их эфемеридных положений составляет 0.43 сек. дуги. С учетом весовых коэффициентов наблюдений эта величина оказалась равной 0.12 сек. дуги.
- На основе новой модели созданы эфемериды главных спутников Урана на интервале времени с 1787 по 2031 год. Эфемериды включены в сервер эфемерид MULTI-SAT, обеспечивающий доступ к эфемеридам через интернет.
- Определены параметры диссипации механической энергии движения спутников из наблюдений. Диссипация может быть вызвана приливами планеты и приливами в телах спутников. Получены приближенные значения коэффициентов квадратичного по времени изменения орбитальной долготы спутников. Эти значения оказались равными $-(0.64 \pm 0.11) \times$

10^{-11} рад./сут² для спутника Ариэль, $-(0.08 \pm 0.24) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Умбриэль, $-(0.29 \pm 0.09) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Титания, $-(0.32 \pm 0.07) \times 10^{-11}$ рад./сут² для спутника Оберон и $-(7.56 \pm 1.15) \times 10^{-11}$ рад./сут² для Миранды. Найденные параметры показывают замедление орбитального движения спутников, что соответствует влиянию приливов в теле Урана, который вращается быстрее спутников. Точность определения параметров орбитального замедления не высока, однако сделанные оценки могут служить ограничениями на их возможные значения.

Сравнение эфемерид, построенных с учетом векового замедления орбитального движения главных спутников Урана, с эфемеридами, построенными без учета этого эффекта, показывает необходимость учета диссипации механической энергии движения спутников.

На основе проделанной работы и полученных результатов можно сделать следующие выводы.

- Выведенные в диссертации возмущения от дополнительных членов в вековой части возмущающей функции вносит существенный вклад в эволюцию орбит спутников Урана, прежде всего Миранды, на больших интервалах времени. На интервалах времени больше 100 лет вклад полученных дополнительных вековых возмущений для спутника Миранда имеет порядок величины эксцентриситета орбиты, что в линейной мере составляет несколько тысяч километров. Для других спутников эффект учета нелинейных членов оказывается меньшим.
- Построенная новая модель движения главных спутников Урана обеспечивает прогресс в точности эфемерид этих спутников за счет использования более широкого набора наблюдений по сравнению с предшествующими работами других авторов.
- Оценки точности эфемерид главных спутников Урана до сих пор никем не делались. Наши приближенные оценки показывают, что погрешность построенных эфемерид спутников монотонно и почти линейно возрастает от минимального значения в 1990 году до 7 мсек дуги к 2031 году.
- Сравнение новых построенных эфемерид с результатами последней из аналогичных работ других авторов (Laineu, 2008) показывает согласование в пределах 0.04 сек дуги на интервале времени 1995-2015 гг.
- Точность определения из наблюдений параметров диссипации механической энергии движения спутников оказалась низкой. Наилучший по точности результат получен для спутника

Миранда – коэффициент при квадратичном по времени члене в долготе спутника определен с точностью 15%. Однако уверенно можно утверждать, что все пять спутников испытывают вековое замедление изменения средней орбитальной долготы и удаляются от планеты. Это соответствует влиянию приливов в теле Урана, который вращается быстрее спутников.

- Сравнение эфемерид, построенных с учетом векового замедления орбитального движения главных спутников Урана, с эфемеридами, построенными без учета этого эффекта, показывает необходимость учета диссипации механической энергии движения спутников при создании эфемерид.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-00294).

В заключение автор считает приятным долгом выразить **признательность** своему научному руководителю **Емельянову Н.В.** за постоянную поддержку в работе, внимательное отношение и ценные советы.

Список литературы

- Belikov M. V. Methods of numerical integration with uniform and mean square approximation for solving problems of ephemeris astronomy and satellite geodesy. *Manuscr. Geod.* 1993. V. 18. No. 4. P. 182-200.
- Emel'yanov N. V., Arlot J.-E. The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT. *Astronomy and Astrophysics.* 2008. V. 487. P. 759–765.
- Emelyanov N. Precision of the ephemerides of outer planetary satellites. *Planet. and Space Sci.* 2010. V. 58. P. 411-420.
- Everhart E. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings. 1985. *ASSL Vol. 115: IAU Colloq. 83: Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution*, 1985.
- Lainey V. A new dynamical model for the Uranian satellites. *Planet. and Space Sci.* 2008. V. 56. P. 1766-1772.
- Laskar J., Jacobson R. A. GUST86—an analytical ephemeris of the Uranian satellites. *Astron. Astrophys.* 1987. V. 188. P. 212–224.
- Taylor D. B. Ephemerides of the five major Uranian satellites by numerical integration. *Astron. Astrophys.* 1998. V. 247. P. 362-374.