

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
115021270038

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК

521.835 Взаимные явления покрытий и затмений спутников
521.3 Определение и улучшение орбит
521.182 Численное интегрирование орбит
521.16 Теория приливного взаимодействия и других диссипативных сил
521.14 Теория фигур, поля тяготения и вращение протяженных тел
521 Теоретическая астрономия. Небесная механика. Фундаментальная астрономия. Теория динамической и позиционной астрономии

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Небесная механика и динамика космических объектов
по теме:

Небесная механика и динамика небесных тел из наблюдений
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Емельянов Н.В.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

заведующий отделом, кандидат физико-математических наук, доктор физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности

_____ (Емельянов Н.В.)

Исполнители темы:

ведущий специалист , кандидат физико-математических наук

_____ (Cherupova V.M.)

ведущий специалист старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Варфоломеев М.И.)

_____ (Вашковьяк С.Н.)

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Гасанов С.А.)

профессор, доктор физико-математических наук, профессор по кафедре

_____ (Кондратьев Б.П.)

ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, кандидат технических наук, доцент/с.н.с. по специальности

_____ (Кудрявцев С.М.)

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Уральская В.С.)

доцент, кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности, доцент по кафедре

_____ (Ширмин Г.И.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

задача трех тел, звездная динамика, устойчивость движения, орбиты, теория движения, небесная механика, наблюдения, звездные скопления, эфемериды

Ключевые слова по-английски:

movement theory, planets, orbit, stability, celestial mechanics, observations, three-body problem, stellar dynamics, satellites, ephemeris, star clusters

1. Для качественного исследования движения пассивно гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики построены две модели эллиптических галактик, которые соответствуют современным представлениям о структуре таких галактик. В этих моделях эллиптических галактик в комплексе с барионной материей рассматриваются также эллипсоидальные или сферические слои, состоящие в основном из темной материи. Согласно этим моделям эллиптических галактик рассматривается вместе с гало как двухслойное неоднородное трехосное эллипсоидальное тело. В движении пассивно гравитирующего тела учтено притяжение светящейся части эллиптической галактики, для которой берется так называемый "астрофизический закон" распределения плотности. Также учитываются возмущения, вызываемые притяжением неоднородного сферического или эллипсоидального слоя – гомеоида, в которых преобладает темная материя с определенным законом распределения плотности – профилем.

Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциалы в обеих моделях не разлагаются в ряд по степеням малых параметров, а берутся целиком.

Найден аналог интеграла Якоби, определена область возможности движения пассивно гравитирующего тела и построены поверхности нулевой скорости. Установлена устойчивость в смысле Ляпунова найденных стационарных решений - точек либрации. Построена траектория движения пассивно гравитирующего тела внутри выбранной для примера эллиптической галактики.

2. Определены некоторые ключевые динамические параметры для одиннадцати эллиптических галактик на основе созданных двух новых моделей для неоднородной эллиптической галактики. К таковым относятся: полная гравитационная (потенциальная) энергия эллиптической галактики вместе с гало и ее дисперсия скоростей, средние значения радиуса-шкалы эллиптической галактики, плотность в ее центре и значение третьей полуоси. Предложен новый способ для определения некоторых ключевых параметров для одиннадцати эллиптических галактик, которые отсутствуют в базе данных астрономических объектов.

3. Практика определения орбит спутников астероидов затруднена тем, что результаты наблюдений разбросаны по многочисленным публикациям. В обычной ситуации при получении новых наблюдений авторы тут же переопределяют орбиту на основе всех предыдущих и новых наблюдений, публикуя только новые наблюдения и новые параметры орбиты. Теперь силами сотрудников отдела небесной механики ГАИШ создана новая база дан-

ных всех опубликованных астрометрических наблюдений спутников астероидов. Это позволит в ближайшем будущем построить модели движения всех спутников астероидов, для которых имеется достаточное число наблюдений.

4. Исследователи динамики спутников планет постоянно ищут новые способы уточнения орбит на основе наблюдений. Недавно бразильскими коллегами было предложено использовать моменты видимых сближений спутников в качестве измеряемых величин. Это предложение нуждалось в проверке. В рамках рассматриваемой темы были получены оценки точности эфемерид спутников на основе наблюдений нового типа. Показано, что положительный эффект от этого проявляется только в случае наличия значительных ошибок масштаба изображения. В любом случае нужно публиковать как моменты видимых сближений, так и наборы видимых взаимных расстояний, на основе которых эти моменты были получены.

5. Для того, чтобы иметь достоверные эфемериды планет и спутников необходимо иметь в мире не менее трех независимых источников. В качестве третьего источника для всех больших планет от Меркурия до Плутона и Луны теперь доступен в интернете сервер MULTI-SAT. Ранее он работал только для планет, имеющих спутники. Теперь, в результате работы по теме, он стал источником всех планетных эфемерид.

Созданная ранее в отделе небесной механики специальная база данных по естественным спутникам планет, доступная через интернет, постоянно пополняется новыми данными. Постоянно обновляются новыми версиями значения физических параметров спутников. Эта необходимая работа не дает непосредственно материала для публикации научных статей, но служит проведению исследований динамики спутников всегда на современном уровне.

6. Приливные взаимодействия между планетой и ее спутниками являются ключевыми явлениями, определяющими орбитальную эволюцию спутников. Управляющую систему уравнений необходимо привести к удобной форме, в которой требуется минимум вычислений. Предпочтительно получать аналитические решения. В данной задаче это приводит к необходимости обращать эллиптические интегралы. В результате работы было показано, что эволюция эксцентриситета и большой полуоси орбиты спутников имеет квазипериодический характер из-за квазипериодической приливной диссипации в планете.

7. Применен новый подход к исследованию устойчивости орбит спутников в Солнечной системе при помощи приема "присоединенной динамической массы". Речь идет о поиске приближенных решений при моделировании орбит естественных спутников планет в Солнечной системе: рассматриваются квази-круговые орбиты при длительном обращении. Установлен ключевой безразмерный параметр, определяющий движение спутника и диапазон его изменений, определяющих допустимость представления решения в заданной форме. Рассчитаны "запретные зоны" для устойчивого обращения спутников внутренних планет Солнечной системы (от "условного спутника" для Меркурия до Марса включительно).

8. Применен новый подход к исследованию плоского вращения спутников на основе комбинированного анализа уравнений Белецкого и Уиздома. Речь идет о новой схеме "револьверного" типа при моделировании вращения естественных спутников планет: эволюция вращения спутника разби-

вается на последовательные этапы при движении вокруг планеты по эллиптической орбите и, далее, рассчитываются режимы вращения для каждого этапа отдельно. При этом финальное состояние предыдущего этапа революционно определяет начальные данные для следующего. Предложенная схема применена к оценке шага истинной аномалии на примере спутников Урана: показано, что у Ариэля и Миранды наибольшие шансы для успешного расчета режимов их вращения по предложенной схеме - запас по времени для каждого шага составляет 160 и 400 секунд, соответственно, а количество итераций около 8600 для Ариэля и примерно 1900 для Миранды.

9. Применяя векторный метод, разработанный автором, впервые дано объяснение эффекта стационарного отклонения оси эллипсоида инерции Луны к югу от направления на Землю. Исследовано решение уравнений либрации в широте, которое представляет неизвестное ранее дополнительное движение оси вращения Луны по конусу с малым углом раствора. Это движение названо квазипрецессией. Механизм квазипрецессии приводит к стационарному наклону главной оси эллипсоида инерции Луны, что позволяет объяснить наблюдаемое отклонение центра масс Луны к югу от направления на Землю. Построена фигура равновесия уникального астероида-кентавра Chariklo и кинетическим методом изучаются его кольца. Потенциал тора раскладывается в ряд по степеням геометрического параметра. Это впервые позволило найти гравитационную энергию однородного кругового тора и выразить плотность и массу колец астероида через массу центрального тела. Получено уравнение для темпа диссипации энергии в кольцах. По астрономическим меркам, время эволюции колец оказывается очень коротким. Сделан важный вывод, что кольца вокруг астероида отличаются от обычных планетных колец и представляют собой новый тип колец, которые в ходе эволюции превратятся в сферические спутники.

10. Хаумеа - один из самых интересных объектов пояса Койпера. При более чем солидных размерах, она вращается вокруг своей оси очень быстро. Почему это так и как образовалась пара спутников планеты, помогает понять динамическая модель ее структуры. Разработан латентный механизм эволюции астероидов и малых планет, состоящих из каменного ядра и ледяной оболочки. Показано, что при малых отклонениях от локального равновесия внутри тела, причиной которых является отклонение формы уровней поверхностей, происходит деформация ядра и оболочки. Для тел с быстрым вращением такая деформация приводит к удлинению ядра и, как следствие, к накоплению напряжений в ледяной оболочке. При достижении предела, лед не выдерживает напряжений, трескается и накапливается на острых концах быстро вращающейся планеты или астероида. Затем избыточные массы льда отделяются от центрального тела и образуются спутники. Механизм является альтернативой известной гипотезе импактного происхождения спутников у класса каменно-ледяных небесных тел. Новый механизм предсказывает, что эти спутники в своем движении не должны сильно отклоняться от плоскости экватора Хаумеа. Это согласуется с наблюдениями.

12. Если исследователь хочет вникнуть в захватывающе интересный процесс рождения научной истины и понять, как на этом пути древние мыслители преодолевали трудности и заблуждения, то лучше всего обратиться к тому отрезку истории науки, который начинается с астрономии древних греков. Вся настоящая наука пропитана вдохновением эллинов, которые на-

учили нас искать элементы красоты в окружающем мире.

13. Построена эволюционная модель спутника Сатурна Япета. Показано, что в данную эпоху сжатие спутника не соответствует его угловой скорости вращения, из-за чего ледяная оболочка Япета находится в режиме вековой сферизации. Для изучения эволюции Япета применяется сферoidalная модель «каменное ядро + ледяная оболочка». В основу модели положено уравнение равновесия в конечных разностях из теории Клеро, параметры модели берутся из наблюдений. Найдены средний радиус ядра и сжатие его уровенной поверхности. Установлено, что Япет обладает толстой ледяной оболочкой, толщина которой составляет от среднего радиуса фигуры. Каменное ядро играет важную роль в процессе оседания льда экваториального балджа, что и приводит в итоге к образованию на поверхности спутника мощной кольцевой экваториальной горной гряды. Этот вывод согласуется с наблюдениями: действительно, на восточном полушарии Япета горный хребет всюду высокий и непрерывный, а на более холодном противоположном полушарии он вырождается в отдельные ледяные пики.

14. Получено аналитическое разложение оскулирующих элементов орбит всех больших планет Солнечной системы в компактные аналитические ряды. Использовался метод спектрального анализа численных эфемерид планет DE431 на всем интервале ее действия в 30000 лет. В отличие от классического анализа Фурье, разложение выполнялось в тригонометрические ряды с амплитудами и аргументами, представляющими собой полиномы высокой степени от времени. Полученные ряды содержат в себе, в зависимости от планеты, от 5793 до 8239 членов (суммарно для всех элементов орбит). Разложение сохраняет высокую точность на интервале времени 24000 лет: 10000 г. до н.э. – 14000 г. н.э. В частности, на данном промежутке максимальное отклонение между средней долготой планеты в орбите, вычисляемой на основе исходных численных эфемерид, и, альтернативно, с помощью новых рядов, составило (в долях секунды дуги) 0.0011 для Меркурия, 0.024 для Венеры, 0.0089 для барицентра системы Земля-Луна, 0.071 для Марса, 0.080 для Юпитера, 0.22 для Сатурна, 0.10 для Урана и 0.043 для Нептуна. Полученные ряды по своей компактности и точности представления эфемерид планет на длительных интервалах времени (несколько десятков тысяч лет) существенно превосходят все известные аналоги.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования проводились по нескольким задачам. Объектами изучения были спутники планет, планеты, астероиды и галактики. Целью работы являлось получение новых знаний о небесных телах. Методы состоят в основном в построении моделей движения на основе всех имеющихся наблюдений. Модели движения являются главным результатом исследований и содержат все наши знания о небесных телах. Модели движения являются также главным инструментом исследований, поскольку содержат все наши знания о небесных телах. Особенность задач такова, что исследования по некоторым задачам ведутся несколько лет, прежде чем может быть получен конкретный результат. В мире актуальные задачи практической небесной механики решаются коллективами, состоящими из исследователей разных стран. В отделе небесной механики ГАИШ во всем многообразии задач исследования проводятся так, что для каждой задачи имеется, как правило, один исполнитель. Поэтому перечислим здесь задачи и назовем конкретных исполнителей.

1. Задача "О движении пассивно-гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики". Моделируются два типа эллиптических галактик вместе с гало. Согласно этим моделям, эллиптическая галактика рассматривается вместе с гало как двухслойное неоднородное трехосное эллипсоидальное тело. Внутренний слой - светящаяся часть эллиптической галактики представляет собой неоднородное трехосное эллипсоидальное тело, в котором преобладает барионная масса. Для светящейся части эллиптической галактики берется так называемый «астрофизический закон» распределения плотности. Внешняя часть представляет собой неоднородный сферический (или эллипсоидальный) слой, в котором преобладает темная материя с определенным законом распределения плотности. Исполнитель Гасанов С.А.

2. Динамические параметры эллиптических галактик. Предложены решения некоторых задач небесной механики и астрофизики. На основе созданных двух новых моделей для неоднородной эллиптической галактики (см. работу выше), определены некоторые ключевые динамические параметры для одиннадцати эллиптических галактик. Исполнитель Гасанов С.А.

3. Создание базы данных всех опубликованных наблюдений спутников астероидов. База данных должна быть доступна через интернет. Это необходимо для построения моделей движения и эфемерид спутников. Исполнители Вашковьяк С.Н., Емельянов Н.В., Уральская В.С.

4. Оценки точности эфемерид спутников планет, построенных на основе нового типа измерений - моментов видимых сближений спутников. Этот тип измерений предложен в работе бразильских коллег. Необходимо выяснить, насколько предлагаемый метод эффективен и какой выигрыш в точности эфемерид он дает. Исполнитель Емельянов Н.В.

5. Развитие эфемеридной службы естественных спутников планет MULTI-SAT, которая доступна через интернет и разработана ранее Н.В. Емельяновым. Необходимо дополнить вычислительную программу возможностью вычисления эфемерид не только естественных спутников, но и всех больших планет от Меркурия до Плутона, включая Луну. Созданная ранее и поддерживаемая сотрудниками отдела база данных естественных спутников планет Natural satellites Database (NSDB) должна постоянно пополняться

новыми данными, чтобы всегда соответствовать современному состоянию данных. Эта работа необходима, но она не дает материала для публикации с научных статьях. Исполнители Варфоломеев М.И., Емельянов Н.В.

6. Моделирование орбит естественных спутников твердотельных планет в Солнечной системе (с преимущественной твердой фазой) при учете влияния фактора диссипации энергии в приливных горбах планеты и спутника на орбитальную динамику спутника. Данная задача решается в рамках задачи 2-тел в условиях совпадения периода вращения спутника и периода орбитального движения спутника (спин-орбитальный резонанс 1:1) на временной шкале значительных масштабов, но не превышающих времени существования Солнечной системы. Исполнитель Ершков С.В.

7. Актуальной задачей небесной механики является исследование устойчивости орбит спутников в Солнечной системе. Для прогресса в этой области необходимы новые подходы и новые решения. С.В. Ершковым предложен новый подход, ключевыми особенностями которого являются: 1) представление уравнений ограниченной задачи 3-тел в лагранжевой форме, задающей относительные расстояния и движения между телами; 2) применение приема "присоединенной динамической массы" при исследовании особенностей динамики уравнений, определяющих движение 3-его (малого) тела, движущегося в поле тяготения двух других массивных тел (пары "Солнце-планета"). В итоге получены новые результаты, которые изложены ниже. Исполнитель Ершков С.В.

8. Исследование динамики вращений спутников планет является весьма актуальной задачей. Это связано с возможным использованием спутников как мест посадки космических аппаратов, а также с тем, что из наблюдений вращения можно получить физические характеристики спутников, в частности, параметры вязкости. С.В. Ершковым предложена новая схема представления вращения спутника, позволяющая разбить эволюцию вращения спутника на последовательные этапы при движении спутника вокруг планеты по эллиптической орбите и, далее, рассчитывать режимы вращения для каждого этапа отдельно. Этот подход был применен. Детали метода и полученные результаты изложены ниже. Исполнитель Ершков С.В.

9. Из наблюдений стало известно, что центр масс Луны не совпадает с геометрическим центром её фигуры, а смещен таким образом, что линия, связывающая эти два центра, «смотрит» не прямо на Землю, а отклоняется для земного наблюдателя к юго-востоку. Объяснение указанного смещения центра масс в литературе до сих пор отсутствует. Актуальность решения этой задачи прямо связана с необходимостью создания современной точной теории вращения Луны. Исполнитель Кондратьев Б.П.

10. При изучении астероидов-кентавров недавно были открыты два кольца вокруг наибольшего из Кентавров астероида Chariklo. Особый интерес эти кольца вызвали тем, что по своей динамической природе они резко отличаются от обычных планетных колец. Актуальной поэтому является задача исследования этих колец. Исполнитель Кондратьев Б.П.

11. Задача построения фигур равновесия и сценариев эволюции каменно-ледяных тел лежит в русле современных исследований в динамической астрономии. Особо важно то, что в современной литературе, по сложившейся традиции, рассматривается только импактный вариант происхождения спутников у этих небесных тел. Однако, гипотеза импакта часто противоречит результатам точных наблюдений. Актуальным поэтому является раз-

работка новых механизмов эволюции каменно-ледяных тел, позволяющих объяснить загадку происхождения спутников. Конкретно, большой интерес представляет происхождение и эволюция одного из самых больших и загадочных тел в поясе Койпера - карликовой планеты Хаумеа . Исполнитель Кондратьев Б.П.

12. В современной научно-популярной литературе мало работ, посвященных последовательному описанию генезиса основных понятий астрономии. Особо важное значение имеет описание процесса возникновения новых понятий в небесной механике. Так как вся современная наука пропитана вдохновением эллинов, мы обращаемся в своей работе к наследию древних греков. Исполнитель Кондратьев Б.П.

13. С началом полетов космических аппаратов к планете Сатурн было получено много ценной информации о спутниках этой планеты-гиганта. Особо много удивительных открытий связано со спутником Япет. В литературе появился ряд наивных и ошибочных гипотез по такому важному вопросу, как причина появления на поверхности Япета мощной кольцевой экваториальной горной гряды. Наша работа посвящена решению этой важной проблемы. Исполнитель Кондратьев Б.П.

14. В практике исследований динамики тел Солнечной системы при решении большинства задач необходимо вычислять координаты больших планет. Модели, которые построены методами численного интегрирования, имеют представление в виде разложений по полиномам Чебышева. Для каждого небольшого отрезка времени от 4 до 16 суток строится отдельное разложение. В итоге, модели движения планет, которые в настоящее время разрабатываются на интервале времени 30 тысяч лет, представлены огромными файлами, содержащими коэффициенты разложений. Существовала необходимость создания компактного аналитического представления эфемерид планет, единого на всем интервале времени. Именно такую задачу по теме отдела поставил и решал С.М. Кудрявцев.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. На основе созданных двух моделей для неоднородной эллиптической галактики рассматривается задача о пространственном движении пассивно-гравитирующего тела в ее поле притяжения. Под пассивно-гравитирующим телом подразумевается звезда или центр масс шарового звездного скопления, в движении которого учитываются притяжения светящейся части эллиптической галактики, как центрального тела, и сферического или эллипсоидального слоя, как возмущающего тела, в котором преобладает темная материя. Природа темной материи неизвестна и нет ясного понимания физической ее взаимосвязи с наблюдаемыми астрономическими объектами. Тем не менее, ее наличие в галактиках признается и подтверждается косвенно и считается, что основная часть темной материи содержится вне светящейся части эллиптической галактики.

Созданные модели служат для решения некоторых задач небесной механики, в частности, вычисление потенциала такой галактики, как трехосного неоднородного эллипсоидального тела, получение уравнения движения пассивно-гравитирующего тела, определение точек либрации и установление их устойчивости в смысле Ляпунова, нахождение возможных первых интегралов - аналога интеграла Якоби, определение области возможности движения пассивно-гравитирующего тела, построение поверхностей нулевой скорости.

Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциалы в обеих моделях не разлагаются в ряд по степеням малых параметров, а берутся целиком. Полученные результаты применяются к реально существующим эллиптическим галактикам. При этом применение этих результатов ко многим эллиптической галактики затруднено из-за отсутствия значений некоторых динамических параметров.

2. На основе созданных двух новых моделей для неоднородной эллиптической галактики, определены некоторые ключевые динамические параметры для одиннадцати эллиптических галактик. К таковым относятся: полная гравитационная (потенциальная) энергия эллиптической галактики вместе с гало и ее дисперсия скоростей, средние значения радиуса-шкалы эллиптической галактики, плотность в ее центре и значение третьей полуоси. Предложен новый способ для определения последних трех параметров эллиптической галактики. Такие параметры, которые отсутствуют в базе данных (HyperLeda, Ned, Vizier), вычислены для одиннадцати эллиптических галактик. Сравнение полученных значений данных параметров почти согласуется со значениями, полученными другими авторами.

3. Исполнителями проекта по теме ранее была создана, пополняется и поддерживается база данных всех опубликованных наблюдений спутников планет. В англоязычной терминологии она имеет обозначение Natural Satellites Data Base (NSDB). Эта база данных широко используется наблюдателями и специалистами по динамике спутников. Следующим естественным этапом было расширение этой база данных на спутники астероидов. До сих пор такой базы данных не существовало. Теперь силами сотрудников отдела небесной механики собрана база данных всех опубликованных наблюдений спутников астероидов. В базе данных собраны 1003 положения спутников астероидов. Каждая порция данных доступна пользователю в виде

двух файлов - двух страниц в интернете: файл данных (результаты измерений) и файл объяснений. Файл объяснений содержит описание наблюдений: на какой обсерватории, какими наблюдателями с помощью какого телескопа сделаны. Дается также библиографическая ссылка, которая на странице совмещена с гиперссылкой на публикацию в библиографической базе данных NASA ADS Abstract Service. Так что пользователь может сразу получить текст статьи, если текст бесплатно доступен в ADS Abstract Service. Таким образом, любому пользователю по его желанию доступны сразу все имеющиеся в мире наблюдения интересующего его спутника астероида.

4. В работе бразильских коллег был предложен новый тип позиционных измерений, для спутников планет. Целью было исключить систематические ошибки масштаба, которые проявляются при измерениях взаимных видимых расстояний между спутниками. Не известно заранее, какая точность эфемерид будет получаться в итоге. На основе модельных наблюдений такой анализ был сделан. Получилось, что при незначительных ошибках масштаба лучше использовать видимые взаимные расстояния, а при больших ошибках масштаба предпочтительнее использовать новый тип данных - моменты видимых сближений спутников.

5. В течение последних 15 лет в отделе небесной механики ГАИШ при сотрудничестве с французским институтом небесной механики разрабатывался и развивался сервер эфемерид естественных спутников планет MULTI-SAT. Это средство, доступное через интернет, широко используется специалистами по динамике спутников. Что касается всех больших планет, то в мире существовало только два независимых источника планетных эфемерид: сайт Jet Propulsion Laboratory (США) и сайт Института Прикладной Астрономии РАН. Третий независимый источник мог бы дать в итоге достоверные эфемериды планет. Такой источник был создан путем развития сервера эфемерид MULTI-SAT. Теперь он позволяет получать эфемериды всех больших планет от Меркурия до Плутона, включая Луну.

База данных естественных спутников планет Natural Satellites Data Base постоянно пополняется новыми данными. Отслеживается появление в публикациях новых наблюдений и новых версий физических параметров. В частности за последний год более половины всех данных по физическим параметрам было обновлено. Раз в год пополняется новыми ссылками специализированная база данных по естественным спутникам планет. Всю эту работу по базе данных ведет М.И. Варфоломеев. Размещением данных на страницах интернета занимается Н.В. Емельянов.

6. В задаче об эволюции орбит спутников планет, с учетом влияния приливной диссипации механической энергии орбитального движения, за основу были взяты дифференциальные уравнения относительно кеплеровых оскулирующих элементов: большой полуоси и эксцентриситета. Рассмотрен частный случай постановки задачи, когда вращение спутника и орбитальное движение спутника происходят синхронно. В уравнениях фигурирует фактор добротности Q , характеризующий вязкость вещества. В задаче принята гипотеза о том, что фактор добротности Q определяется как степенная функция от приливной частоты, то есть скорость пробегания приливной волны по небесному телу. Коэффициенты такой модели также составляют принятую гипотезу. Они учитывают реологические зависимости в свойствах тел. Предложена явная связь эксцентриситета и большой полуоси, следующая из рассмотренных уравнений орбитальной динамики обра-

щения спутников. Сделан вывод о том что коэффициенты, участвующие в задании правых частей уравнений, необходимо подбирать в каждом случае исходя из данных прямых астрометрических наблюдений для того, чтобы можно было учитывать объединенный вклад фактора приливной диссипации как в теле спутника, так и в теле планеты. Также основным результатом является следующий: в случае, если фактор добротности Q при моделировании определяется как степенная функция от приливной частоты, это однозначно приводит к квазипериодической эволюции орбит спутников. Этот вывод следует из того, что в решении возникает эллиптический интеграл дробного порядка, который при обращении переводит решение (эксцентриситет и, как следствие, большую полуось) в квазипериодические циклы.

7. В задаче по исследованию устойчивости орбит спутников в Солнечной системе за основу взяты базовые уравнения задачи трех тел, определяющие движение спутника в поле тяготения двух других массивных тел, обращающихся по законам Кеплера вокруг общего барицентра по эллиптическим орбитам. В приближении круговой орбиты, уравнения усреднены по времени при длительном обращении спутника. Это позволяет свести модельные уравнения к разновидности уравнений типа Риккати для радиуса-вектора "спутник-планета", в Лагранжевой форме относительных расстояний. В уравнениях переменными, зависящими от времени, являются следующие величины: три пространственные координаты радиуса-вектора "центр планеты - спутник" (спутник принимается за тело точечной массы). Отношение модуля радиуса-вектора к расстоянию "планета-Солнце" считается много меньше единицы. Постоянными задачи являются: масса спутника, масса планеты, масса Солнца; гравитационная постоянная. Среднее расстояние планеты до Солнца считается также постоянным в первом приближении. Это позволяет произвести некоторые оценки ключевого безразмерного параметра, обеспечивающего сохранение общего вида уравнений орбитальной динамики спутника при длительном обращении вокруг планеты. Формула для безразмерного управляющего параметра: ключевой параметр равен произведению отношения массы планеты к массе Солнца и отношения куба расстояния "планета-Солнце" к кубу расстояния "спутник-планета". Данный безразмерный параметр должен сохраняться в пределах 0.001 - 0.01 (или меньше 0.001), чтобы уравнения круговой ограниченной задачи трех тел адекватно описывали орбитальную динамику, при этом отклонения в большую сторону не допускаются. Исходя из указанных ограничений, были оценены "зоны безопасности" (разрешенные орбиты или расстояния от центра планеты до спутника), в пределах которых орбитальная динамика спутника будет пребывать в инволюции (или сохранять свое движение в течение длительного времени), если спутник не выходит за пределы этих зон. В противном случае, спутник может быть выброшен за пределы зоны близкого расположения к планете за счет резонансных особенностей определяющих его движение уравнений. Решения уравнений типа Риккати обладают специфической особенностью: в определенный момент времени, возможно резкое увеличение амплитуды решения. Установление таких "запретных зон" для спутниковой навигации можно назвать основным результатом работы - что и планировалось.

8. Исследование динамики вращений спутников планет. За основу постановки задачи взято базовое уравнение динамики плоского вращения спутника (уравнение В.В. Белецкого) при движении вокруг планеты по эллип-

тической орбите. В уравнении переменной, зависящей от истинной аномалии, выбранной в качестве независимой переменной, является двойной угол между радиус-вектором центра масс спутника и одной из главных осей инерции. Постоянными задачи являются: главные моменты инерции спутника, эксцентриситет орбиты спутника. Кроме того, в статье рассматривается переход от уравнения Белецкого к уравнению Уиздома при инфинитезимальных значениях эксцентриситета орбиты спутника. Напомним что значительно ранее Дж. Уиздом показал - в рамках модели вращения спутника Сатурна Гипериона - возможность (и даже необходимость) возникновения режима хаотического вращения этого спутника при определенных неблагоприятных условиях. В рамках изученного в данной статье подхода показано что, в дополнении к режиму хаотического вращения Уиздома, в процесс эволюции может также вмешаться внезапное ускорение или замедление вращения спутника. Это становится возможным благодаря характерной особенности решений уравнений типа Риккати или уравнения Абеля, к которому редуцируется уравнение Белецкого на каждом новом этапе вращения спутника. Можно назвать это основным результатом работы - что и планировалось сделать.

Необычным приемом является револьверная схема расчета режима вращения спутника при его обращении по эллиптической орбите вокруг планеты: в пределах одного малого шага истинной аномалии, исходное уравнение Белецкого редуцируется к определенному уравнению Абеля, которое затем решается аналитически или численно для определения режима вращения. При этом начальным состоянием для каждого следующего этапа является финальное состояние предыдущего шага. Если на предыдущем шаге не происходит срыва режима вращения в градиентную катастрофу (внезапное замедление или ускорение вращения спутника), то происходит плавный переход от одного шага к другому. То, что градиентная катастрофа может произойти в режиме вращения спутника, на определенном этапе, не означает что она должна произойти - все зависит от начальных условий задачи. В предложенной схеме, шаг истинной аномалии должен быть малым, в пределах которого можно пренебречь приливным воздействием на динамику вращения спутника, но достаточным для того чтобы вовремя рассчитать (аналитически или на компьютере) режим вращения спутника и его результаты в виде начальных данных для следующего этапа.

9. Для объяснения смещения центра масс Луны к югу, используются полученные нами ранее пять новых дифференциальных уравнений, описывающих физическую либрацию Луны в широте. Эти дифференциальные уравнения были получены в рамках нового векторного подхода к проблеме физической либрации Луны. Найдены все решения характеристического уравнения этой системы уравнений. Особое внимание мы обращаем на пятую (нулевую) частоту. Решение с нулевой частотой описывает неизвестную ранее коническую прецессию оси вращения Луны. Эта прецессия происходит по конусу в положительном направлении (т.е. против часовой стрелки) с периодом в один сидерический лунный месяц и предсказывает требуемый стационарный наклон к югу длинной оси тела Луны.

10. Построена фигура равновесия уникального астероида Chariklo и кинетическим методом изучаются его кольца. Впервые правильно найдены плотность, масса и средний радиус астероида. Внешние кольца астероида моделируются круговыми гравитирующими торами, состоящими из ма-

лых каменно-ледяных тел, которые обращаются вокруг астероида, с небольшой дисперсией скоростей. Важно, что наша модель не предполагает наличия скрытых спутников у астероида. При этих условиях, равновесие кольца определяется соотношением между малой дисперсией скоростей частиц и его самогравитацией. Решена общетеоретическая задача о разложении потенциала тора в ряд по степеням его геометрического параметра, что позволило найти гравитационную энергию однородного кругового тора и выразить плотность и массу колец через массу центрального тела. Выводится и решается уравнение для темпа диссипации энергии в кольцах. Установлено, что по астрономическим меркам, время эволюции колец оказывается коротким.

11. Построена гравитирующая неоднородная модель планеты Хаумеа, состоящая из плотного каменного ядра и толстой ледяной оболочки. Инструментом исследования служит теория потенциала и теория неоднородных фигур равновесия. Введением комбинированной плотности гравитационный потенциал на двух главных поверхностях представлен квадратичной функцией координат. Задача о внутренней структуре планеты сводится к решению кубического уравнения. Его решение позволяет найти толщину ледяной оболочки и размеры каменного ядра. Доказано, что граничная поверхность планеты и поверхность ядра одновременно не могут быть уровнями. Важно, что из-за этого в модели появляются малые отклонения от локального равновесия и начинает действовать механизм деформации ядра и оболочки. Этот механизм приводит к удлинению ядра, и при достижении некоторого предела лед не выдерживает напряжений, трескается и скапливается на острых концах быстро вращающейся планеты. Избыточные массы льда отделяются от планеты, что и приводит к образованию спутников. Важным затем является разработка механизма приливной эволюции орбит спутников.

12. Последовательно изложен генезис понятий в динамической астрономии. При этом мы убеждаемся в существовании одного важного правила: в истории науки понятие о гармонии и красоте не является чем-то застывшим, оно развивается и обновляется в процессе познания окружающего Мира. В первой части работы мы рассматриваем развитие взглядов – от древних греков до Кеплера и Ньютона - на орбиты и траектории небесных тел. Во второй части работы рассматривается становление и развитие теории потенциала, играющую важную роль в современной физике и небесной механике. В третьей части дан эскиз современного состояния небесной механики.

13. Построена эволюционная модель спутника Сатурна Япета. Наш метод опирается на дополненную нами ранее теорию неоднородных фигур равновесия. Так как в данную эпоху сжатие спутника не соответствует его угловой скорости вращения, ледяная оболочка Япета находится в режиме вековой сферизации. Здесь для изучения эволюции Япета применяется сфероидальная модель "каменное ядро + ледяная оболочка". В основу этой модели положено уравнение равновесия в конечных разностях из теории Клеро, параметры модели берутся из наблюдений. Найдены средний радиус ядра и сжатие его уровенной поверхности. Установлено, что Япет обладает толстой ледяной оболочкой, толщина которой составляет более половины от среднего радиуса фигуры. Особое внимание уделяется той роли, которую играет каменное ядро в процессе оседания льда экваториального балджа.

Именно это оседание и приводит в итоге к образованию на поверхности спутника мощной кольцевой экваториальной горной гряды.

14. Получено аналитическое разложение оскулирующих элементов орбит всех больших планет Солнечной системы в компактные аналитические ряды. Использовался метод спектрального анализа численных эфемерид планет DE431 на всем интервале ее действия в 30000 лет. В отличие от классического анализа Фурье, разложение выполнялось в тригонометрические ряды с амплитудами и аргументами, представляющими собой полиномы высокой степени от времени. Полученные ряды содержат в себе, в зависимости от планеты, от 5793 до 8239 членов (суммарно для всех элементов орбит). Разложение сохраняет высокую точность на интервале времени 24000 лет: 10000 г. до н.э – 14000 г. н.э. В частности, на данном промежутке максимальное отклонение между средней долготой планеты в орбите, вычисляемой на основе исходных численных эфемерид и, альтернативно, с помощью новых рядов, составило (в долях секунды дуги) 0.0011 для Меркурия, 0.024 для Венеры, 0.0089 для барицентра системы Земля-Луна, 0.071 для Марса, 0.080 для Юпитера, 0.22 для Сатурна, 0.10 для Урана и 0.043 для Нептуна. Полученные ряды по своей компактности и точности представления эфемерид планет на длительных интервалах времени (несколько десятков тысяч лет) существенно превосходят все известные аналоги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге выполнения работы по теме из наблюдений в отделе небесной механики ГАИШ в 2017 году были получены следующие основные результаты.

1. В рамках задачи о пространственном движении пассивно-гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики построены две модели эллиптических галактик. Эти модели соответствуют современным представлениям о структуре таких галактик, так как они основаны на законе распределения поверхностной яркости Хаббла для эллиптических галактик. Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциал такой галактики, в отличие от других авторов, не разложен в ряд по степеням малых параметров, а берется целиком. Найден аналог интеграла Якоби, определена область возможности движения пассивно-гравитирующего тела и построены поверхности нулевой скорости. Установлена устойчивость в смысле Ляпунова найденных стационарных решений - точек либрации. Применение полученных результатов ко многим эллиптическим галактикам затруднено из-за отсутствия значений некоторых динамических параметров, которые не определены и не приведены в работах других авторов, или в базе данных астрономических объектов.

2. На основе созданных двух новых моделей для неоднородной эллиптической галактики, определены некоторые ключевые динамические параметры для одиннадцати эллиптических галактик: полная гравитационная (потенциальная) энергия эллиптической галактики вместе с гало и ее дисперсия скоростей, средние значения радиуса-шкалы эллиптической галактики, плотность в ее центре и значение третьей полуоси. Предложен новый способ для определения последних трех параметров для одиннадцати эллиптических галактик, которые отсутствуют в базах данных (HyperLeda, Ned, Vizier).

Нерешенными остались определения некоторых динамических параметров многих эллиптических галактик, которые отсутствуют в базе данных и не определены другими авторами.

3. Создана новая база данных всех опубликованных астрометрических наблюдений спутников астероидов. Это позволит в ближайшем будущем построить модели движения всех спутников астероидов, для которых имеется достаточное число наблюдений.

4. Получены оценки точности эфемерид спутников планет на основе измерений моментов видимых сближений спутников. В результате оценок наблюдателям рекомендовано публиковать не только эти моменты, но также набор значений взаимных расстояний, из которых эти моменты получены.

5. Сервер эфемерид спутников планет MULTI_SAT преобразован в сервер эфемерид больших планет, Луны и спутников планет. Эфемериды получают через интернет. В мире имеется еще только два таких сервера эфемерид. Третий вариант (MULTI_SAT) позволит давать эфемериды независимо от других, что повышает их достоверность. Обновлена более, чем на 50 процентов, база данных по физическим параметрам спутников планет. Добавлены наблюдения спутников, появившиеся в публикациях за последний год. Пополнена новыми ссылками специализированная библиографическая база данных по спутникам планет.

6. Орбитальная динамика спутников больших планет такова, что из-за приливного взаимодействия "спутник-планета" спутник может, как приближаться к планете, так и удаляться от неё в зависимости от потерь на приливную диссипацию в спутнике и планете. Такой вывод сделан для твердотельных планет в частном: угловая скорость вращения спутника синхронизирована с орбитальным движением спутника. Нерешенной остается задача по приливным взаимодействиям в жидко-тельных планетах. Приливные взаимодействия между планетой и ее спутниками являются ключевыми явлениями, определяющими орбитальную эволюцию спутников. Управляющую систему уравнений необходимо привести к удобной форме, в которой требуется минимум вычислений. Предпочтительными являются аналитические решения, полученные, например, путем обращения эллиптического интеграла. Такой путь в вышеуказанном частном случае приводит к выводам о квазипериодическом характере эволюции эксцентриситета, большой полуоси орбиты спутников, а также о квазипериодическом характере приливной диссипации в планете.

7. Орбитальная динамика спутников не является безусловно устойчивой и может корректироваться даже в рамках круговой ограниченной задачи 3-тел: спутник может как приближаться к планете, так и удаляться от нее, но при этом может быть внезапно выброшен за пределы влияния планеты. Нерешенной остается аналогичная задача, если рассматривать непостоянным расстояние "планета-Солнце".

8. Орбитальная динамика вращения спутников может корректироваться в сторону возникновения хаотических режимов вращения и, кроме того, может также происходить срыв вращения в градиентную катастрофу (резкое замедление или ускорение вращения) даже в режиме плоского вращения спутника. Нерешенной остается аналогичная задача для трехмерного вращения спутника.

9. Применяя векторный метод, впервые дано объяснение эффекта стационарного отклонения оси эллипсоида инерции Луны к югу от направления на Землю. Исследовано решение уравнений либрации в широте и показано, что оно представляет собой неизвестное ранее дополнительное движение оси вращения Луны по конусу с малым углом раствора. Это движение мы назвали квазипрецессией. Механизм квазипрецессии приводит к стационарному наклону главной оси эллипсоида инерции Луны, что и объясняет наблюдаемое отклонение центра масс Луны к югу от направления на Землю.

10. Построена фигура равновесия уникального астероида-кентавра Chariklo и кинетическим методом изучаются его кольца. Это впервые позволило найти гравитационную энергию однородного кругового тора и выразить плотность и массу колец астероида через массу центрального тела. Получено уравнение для темпа диссипации энергии в кольцах. Его решение показало, что время эволюции колец по астрономическим меркам, оказывается очень коротким. Сделан вывод, что кольца вокруг астероида отличаются от обычных планетных колец и представляют собой принципиально новый тип колец, которые в ходе эволюции превратятся в сферические спутники.

11. Установлено, что для карликовой планеты Хаумеа гипотеза импакта противоречит результатам наблюдений. Разработан оригинальный механизм эволюции астероидов и малых планет, состоящих из каменного ядра и ледяной оболочки. При малых отклонениях от локального равновесия

внутри тела (причиной которых является отклонение формы уровенных поверхностей от поверхностей равной плотности) происходит деформация ядра и оболочки. Для тел с быстрым вращением такая деформация приводит к удлинению ядра и, как следствие, к накоплению напряжений в ледяной оболочке. При достижении предела, лед трескается и накапливается на острых концах быстро вращающейся планеты или астероида. Затем избыточные массы льда отделяются от центрального тела и образуются спутники. Наш механизм является альтернативой известной гипотезе импактного происхождения спутников у обширного класса каменно-ледяных небесных тел. Новый механизм предсказывает, что эти спутники в своем движении не должны сильно отклоняться от плоскости экватора Хаумеа. Это согласуется с наблюдениями. Открытое совсем недавно кольцо вокруг Хаумеа также свидетельствует в пользу нового механизма эволюции. Новый механизм имеет общее значение для многочисленного класса каменно-ледяных тел в Солнечной системе.

12. В современной научно-популярной литературе по небесной механике есть явный пробел в области описания происхождения основных понятий в небесной механике. Наша работа восполняет этот пробел и доступна не только профессионалу-астроному, но и студенту и способному школьнику.

13. Построена эволюционная модель спутника Сатурна Япета. Показано, что в основе механизма эволюции этого спутника лежит захват его в резонанс и с последующим уменьшением его угловой скорости вращения. Показано, что изменение формы ледяной оболочки и привело в итоге к образованию на поверхности спутника уникальной кольцевой экваториальной горной гряды. Наш вывод согласуется с наблюдениями: действительно, на ведущем полушарии Япета горный хребет всюду очень высокий и непрерывный, а на более холодном (ведомом) противоположном полушарии он вырождается в отдельные ледяные пики.

14. Получено аналитическое разложение оскулирующих элементов орбит всех больших планет Солнечной системы в компактные аналитические ряды. Разложение сохраняет высокую точность на интервале времени 24000 лет. Полученные ряды по своей компактности и точности представления эфемерид планет на длительных интервалах времени (несколько десятков тысяч лет) существенно превосходят все известные аналоги.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2017 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами