

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
АААА-А20-120012990074-1

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК

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

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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, профессор по специальности, доцент/с.н.с. по специальности

_____ (Емельянов Н.В.)

Исполнители темы:

ведущий программист

_____ (Варфоломеев М.И.)

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Гасанов С.А.)

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Ершков С.В.)

ведущий инженер, кандидат физико-математических наук

_____ (Киреева Е.Н.)

ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор по кафедре

_____ (Кондратьев Б.П.)

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Корноухов В.С.)

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

_____ (Кудрявцев С.М.)

ведущий программист, кандидат физико-математических наук

_____ (Чепурова В.М.)

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

_____ (Ширмин Г.И.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

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

Ключевые слова по-английски:

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

Задача. Динамика эллиптических галактик.

Рассмотрены несколько новых моделей слоисто-неоднородной эллиптической галактики (ЭГ), имеющей различные формы. Согласно этим моделям ЭГ состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности - профилями. На основе этих моделей определены некоторые ключевые динамические параметры ЭГ: гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, суммарная поверхностная яркость, полная светимость, а также дисперсия скоростей в зависимости от расстояния до центра ЭГ. Установлены соотношения между важными динамическими параметрами галактики: масса - размеры, масса - дисперсия скоростей, размер - дисперсия скоростей - светимость (поверхностная яркость). Исследованы эволюционные сценарии образования ЭГ согласно этим моделям.

Полученные результаты применены к более шестидесяти модельным ЭГ с параметрами, точно совпадающими с реально существующими галактиками, и приведены в виде таблиц.

Задача. Динамика спутников планет.

Велась работа по уточнению моделей движения и эфемерид спутников планет и спутников астероидов на основе наблюдений. Для успеха дела использовались наблюдения спутников, выполненные на космической обсерватории GAIA. Ввиду отсутствия помехи от земной атмосферы точность наблюдений оказалась в тысячу раз выше точности наземных наблюдений, которые использовались ранее. В итоге с использованием этих наблюдений были построены новые модели движения и эфемериды некоторых далеких спутников больших планет. Точность новых эфемерид спутников стала в сто раз более высокой. Обеспечен значительный прогресс в точности моделей движения спутников. В процессе уточнения орбит с использованием наблюдений столь высокой точности пришлось учитывать релятивистское отклонение лучей света от спутников, обусловленное гравитацией Солнца. Обнаружено, что релятивистское отклонение света из-за притяжения планеты оказалось пренебрежимо малым. Это несмотря на то, что спутники движутся на небе вблизи планеты, а Солнце расположено в другом конце неба. Была уточнена теория движения спутников астероидов путем учета возмущений от притяжения Солнца. Для некоторых систем астероидов со спутниками получены новые значения масс. Задача. Динамика планет и спутников.

Объект исследования: движение малого спутника конечных размеров вокруг естественных лун планет Солнечной системы (с медленно меняющимся эксцентриситетом их орбиты вокруга планеты). Цель работы: 1) установить, существуют ли такие орбиты в принципе, для каких-либо наборов

начальных данных; 2) если существуют, исследовать устойчивость движения спутника вокруг луны. Метод или методология проведения работы: 1) редукция (упрощение без существенных потерь в точности для используемого приближения модели) уравнений ER3BP в форме рассмотренной в работе Ашенберга (Ashenberg in J Guid Control Dyn 19(1):68-74, 1996); 2) полу-аналитическое приближение зависимости истинной аномалии от времени для двух основных моделей приливного типа (когда приливы возникают только на поверхности планеты, или только на поверхности луны); 3) численное исследование полученной модели методом Runge-Kutta 4-ого порядка с шагом 0.001 по истинной аномалии для различных наборов нач.данных. Краткие результаты работы: представлен абсолютно новый алгоритм расчета движения спутника конечных размеров, спутник рассмотрен как твёрдый эллипсоид почти сферической формы, с гравитационным потенциалом "MacCullagh type" (авторам неизвестны другие результаты, полученные для моделей того же типа). Список обозначений и сокращений, применяемых в отчете: f - истинная аномалия; ER3BP - эллиптическая ограниченная задач трёх тел; спутник m , два массивных тела M_{planet} , m_{moon} , при этом m_{moon} это луна планеты M_{planet} ($m \ll m_{moon} < M_{planet}$); две координаты спутника $\{x, y\}$; эксцентриситет, большая полуось $\{e, ap\}$ эллиптической орбиты планеты вокруг барицентра "Луна - планета"; число Лава k_2 , фактор добротности Q спутника и планеты. Результаты: показан квази-периодический характер сильных осцилляций для "захваченной" орбиты спутника. Основные выводы: орбита спутника неустойчива для систем "Фобос-Марс", "Деймос-Марс"; для системы "Каллисто-Юпитер" подобные орбиты существуют, но за счёт резких искривлений (т.е. перегрузок для спутника), они нереалистичны для устойчивого длительного пребывания на подобной орбите. Для системы "Луна-Земля" удалось обнаружить устойчивые орбиты, с квази-периодическим характером колебаний расстояния спутника до луны планеты (в приближении "захваченной орбиты"). Задача. Теория фигур равновесия.

Получена новая формула для угловой скорости фигур равновесия. В её основе лежит введенное нами разделение полной гравитационной энергии тела на внутреннюю и внешнюю части. Новая формула для угловой скорости фигур равновесия проверена на классических сфероидах Маклорена и трехосных эллипсоидах Якоби. Формула открывает новый подход к изучению фигур неэллипсоидальной формы, а также большого семейства двухкомпонентных моделей малых небесных тел, состоящих из каменного ядра и ледяной оболочки. Задача. Метод колец Гаусса.

Для изучения вековых возмущений орбит в небесной механике важное значение имеют методы осреднения по быстрым переменным. Одним из основных здесь является метод колец Гаусса. В связи с открытием экзопланет, интерес к развитию методов, связанных с кольцами Гаусса, заметно оживился. Для изучения вековой эволюции орбит двух планет под действием взаимного гравитационного возмущения у нас развит новый подход, основанный на модели круглых колец Гаусса. Роль функции возмущений здесь играет взаимная гравитационная энергия колец. Для каждого из двух вариантов взаимного расположения орбит планет составлены и в конечном аналитическом виде решены системы из 4 дифференциальных уравнений.

Задача. Обзор задач небесной механики.

Дан развернутый очерк развития идей и некоторых достижений в со-

временной небесной механике. Акцент делается на том, что классическое определение этой науки, данное Лапласом, не полностью отражает содержание современной небесной механики, а более емким является термин динамическая астрономия. Динамическая астрономия изучает почти все, что движется и вращается в Космосе: от пылинок - до комет и астероидов, от ИСЗ, планет и их спутников - до звезд и галактик. Эта комплексная наука включает не только задачи классической, но и релятивистской небесной механики, в неё входят теория фигур равновесия, разнообразные вычислительные методы и методы компьютерного моделирования. Важное значение имеют качественные методы, вершиной которых явилось создание КАМ-теории. Ярким стимулом для развития динамической астрономии стало открытие экзопланет у других звезд. В статье прослеживается цепочка идей от кеплеровских орбит до оскулирующих лагранжевых эллипсов, от задачи двух тел - к задачам многих тел, от колец Гаусса - до моделей, построенных на основе прецессирующих аналогов этих колец. Задача. Динамика Солнечной системы. Выпущен новый каталог долгопериодических членов приливообразующего потенциала Солнца (Sun Tide-Generating Potential, STGP): http://sai.msu.ru/neb/ksm/tgp_sun/STGPv2-LongPeriods.zip. Он включает в себя в 2.5 раза больше подобных членов разложения, чем содержится в первой версии каталога STGP (Cionco, Kudryavtsev, Soon 2023). Разложение выполнено и действительно на интервале времени 30 000 лет (13 000 г. до н.э. - 17 000 г. н. э.). По сравнению с первой версией каталога нижний порог амплитуд учитываемых членов разложения понижен с 10^{-7} м²/с² до 10^{-8} м²/с², и максимальная степень времени в полиномиальном выражении для амплитуд увеличена с 3-х до 5-ти. Выполнен анализ полученных данных с целью перепроверки гипотезы о наличии существенных приливных сил на поверхности Солнца, вызванных притяжением больших планет и имеющих период ≈ 11.0 лет и/или ≈ 22.0 года. В ряде недавних исследований утверждается, что подобные приливные силы могут иметь амплитуду, достаточно существенную для того, чтобы возбуждать и поддерживать основные наблюдаемые циклы солнечной активности. При этом в качестве источника происхождения приливных сил с такими периодами, в частности, указывается совместное гравитационное действие Венеры, Земли и Юпитера на Солнце, вызванное комбинациями средних движений этих планет с множителями (6, -10, 4) и (3, -5, 2), соответственно. Поэтому в данной работе мы также специально вычисляем характеристики периодических членов разложения, обусловленных указанными комбинациями средних движений этих 3-х планет. В результате выполненных дополнительных исследований мы не подтверждаем наличие заметных приливных сил на поверхности Солнца с периодом ≈ 11.0 лет и/или ≈ 22.0 года в новом расширенном спектре STGP. Вследствие этого, гипотеза о планетных приливах на Солнце как источнике происхождения и поддержки основного 11-летнего цикла солнечной активности представляется крайне маловероятной.

ВВЕДЕНИЕ

Задача. Динамика эллиптических галактик.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики созданы новые модели эллиптической галактики (ЭГ), имеющей форму либо трехосного эллипсоида, либо сжатого или вытянутого сфероида. Согласно этим моделям ЭГ состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности - профилями. На основе этих моделей определены некоторые ключевые динамические параметры ЭГ: гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, суммарная поверхностная яркость, полная светимость, а также дисперсия скоростей в зависимости от расстояния до центра ЭГ. Установлены соотношения между важными динамическими параметрами галактики: масса - размеры, масса - дисперсия скоростей, размер - дисперсия скоростей - светимость (поверхностная яркость). Исследованы эволюционные сценарии образования ЭГ согласно этим моделям. Полученные результаты применены к более шестидесяти модельным ЭГ с параметрами, точно совпадающими с реально существующими галактиками,

Задача. Динамика спутников планет.

В деле моделирования движения спутников планет основное стремление заключается в повышении точности. При этом точность теории всегда должна соответствовать точности наблюдений. Улучшение точности моделей определяется прогрессом в точности наблюдений. В настоящее время интенсивно эксплуатируется космическая обсерватория GAIA. При отсутствии помехи от земной атмосферы получают значительно более высокоточные измерения. В прошлые годы были опубликованы только результаты определения координат звезд. Только в 2022 году появились публикации координат спутников планет. При этом точность измерения координат спутников возросла в тысячу раз. Естественно, в нашем отделе было решено использовать такой значительный прогресс в точности наблюдений, чтобы повысить точность моделей и эфемерид спутников. При моделировании движения спутников астероидов в основном используется кеплерова модель движения. Для обеспечения соответствия наблюдениям точности теории движения спутников астероидов необходимо учитывать возмущения от притяжения Солнца. Этой задачей занялись в отделе небесной механики ГАИШ. Задача. Динамика планет и спутников.

Исследован вопрос (в развитие темы) о существовании/траекториях движения небольшого спутника конечных размеров в рамках эллиптической ограниченной задачи 3-тел, ER3BP (по устойчивой орбите вокруг крупного естественного спутника планеты): два массивных тела M_{planet} , m_{moon} вращаются вокруг общего барицентра по кеплеровым траекториям; спутник m вращается по квази-эллиптической "захваченной" орбите вокруг, и на незначительном удалении от луны планеты m_{moon} ($m \ll m_{\text{moon}} < M_{\text{planet}}$). Ключевыми особенностями являются полу-аналитические допущения для численных решений: 1) приближение "захваченной" плоской орбиты $\{x, y\}$ спутника вокруг планеты (в синодической вращающейся, декартовой системе координат); 2) спутник рассмотрен как твёрдый эллипсоид почти сферической формы, с гравитационным потенциалом "MacCullagh type". Задача относится к разделу небесной механики по устойчивости спутниковой динамики. Необычным приемом является рассмотрение спутника

конечных размеров, с гравитационным потенциалом “MacCullagh type” при поиске решений уравнений ER3BP.

Задача. Теория фигур равновесия. Актуальным в современной динамической астрономии является изучение фигур равновесия небесных тел. В астрофизике для этих целей широко применяется теория жидких фигур равновесия. Особенно часто используются фигуры равновесия сфероидов Маклорена и трехосных эллипсоидов Якоби, угловая скорость которых известна в аналитическом виде. Однако для других фигур равновесия, например, тороидальных, угловая скорость вращения в общем аналитическом виде не известна. С помощью введенных нами понятий внутренней и внешней гравитационной энергии тела была получена новая формула для угловой скорости вращения фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости. Задача. Метод колец Гаусса.

- Для изучения вековых возмущений орбит в небесной механике важное значение имеют методы осреднения по быстрым переменным, и одним из основных здесь является метод колец Гаусса. В связи с открытием экзопланет, интерес к развитию методов, связанных с кольцами Гаусса, заметно оживился. У нас развит расширенный подход к модели круглых колец Гаусса для изучения вековой эволюции орбит двух планет под действием взаимного гравитационного возмущения. Существенно, что роль функции возмущений здесь играет взаимная гравитационная энергия колец. Для двух вариантов расположения орбит составлены и в конечном аналитическом виде решены (а это уже достижение в небесной механике) системы из 4 дифференциальных уравнений.

Задача. Обзор задач небесной механики.

Важное значение для любой отрасли знаний имеет создание обзоров, осмысливающих и прослеживающих развитие этой науки. В таких обзорах должны обсуждаться ключевые методы и понятия. Весьма актуальным является создание такого обзора для небесной механики, которая имеет богатейшую историю развития и где трудились все великие математики прошлых веков. Нами дан оригинальный обзор развития идей и достижений в современной небесной механике. В статье прослеживается цепочка идей от кеплеровских орбит до оскулирующих лагранжевых эллипсов, от задачи двух тел – к задачам многих тел, от колец Гаусса – до моделей, построенных на основе прецессирующих аналогов этих колец. \ Задача. Динамика Солнечной системы.

Существует популярная гипотеза о том, что планетные приливы могут оказывать модулирующее воздействие на циклы солнечной активности. В частности, в ряде недавних исследований (напр., Scafetta 2020) предполагается, что определенные орбитальные конфигурации Венеры, Земли и Юпитера (конфигурации “V-E-J”) имеют периодичность ≈ 11.0 лет и ≈ 22.0 года, и что работа солнечного динамо может быть синхронизирована с этими конфигурациями. Указывается, что подобные периоды появляются в результате комбинаций частот $6n_2 - 10n_3 + 4n_5$ и $3n_2 - 5n_3 + 2n_5$, где n_2 , n_3 и n_5 есть средние движения Венеры, Земли и Юпитера, соответственно. Тем не менее, предложенные до сих пор доказательства того, что планетные приливы на Солнце могут быть одним из источников возбуждения и поддержки основного 11-летнего солнечного цикла, не представляются достаточно строгими. В работе (Cionco, Kudryavtsev, Soon 2023) мы впервые выполнили разложение STGP в высокоточные гармонические ряды. При этом не бы-

ло найдено ни одной конфигурации "V-E-J", которая приводила бы к периодической приливной силе со сколь-либо заметной амплитудой. Однако, в некоторых последующих исследованиях (напр., Stefani et al. 2023) подобные конфигурации "V-E-J" по-прежнему рассматриваются как вероятный источник существенных приливных эффектов на поверхности Солнца. Поэтому в настоящей работе мы провели более глубокое исследование этого важного вопроса. В частности, мы снизили пороговое минимальное значение для амплитуд долгопериодических членов разложения STGP с 10^{-7} м²/с² до 10^{-8} м²/с², чтобы включить в разложение еще больше приливных членов. Под "долгопериодическими" мы условно понимаем члены разложения, аргумент которых не включает в себя скорость осевого вращения Солнца (даже если период некоторых таких членов оказывается меньшим, чем период вращения Солнца). Полученные расширенные ряды разложения STGP нами были вновь проанализированы на предмет возможного существования приливных сил с периодом ≈ 11.0 лет и/или ≈ 22.0 года. Также мы явно вычислили амплитуды приливных членов на используемых рядом авторов комбинациях частот $6n^2-10n^3+4n^5$ и $3n^2-5n^3+2n^5$.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Задача. Динамика эллиптических галактик.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики созданы три новые модели эллиптической галактики (ЭГ), имеющей различные формы. Согласно этим моделям ЭГ состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности - профилями. В первой модели ЭГ считается неоднородным трехосным эллипсоидом, во второй модели ЭГ - неоднородный сжатый сфероид, а в третьей модели ЭГ - неоднородный вытянутый сфероид. В каждой модели рассматриваются два варианта: варианты а) и б). Согласно варианту а) ЭГ состоит только из БМ с определенным профилем - законом распределения плотности, а согласно варианту б) она состоит из БМ и ТМ с различными профилями. Если рассматривается вариант а), то в качестве профиля БМ берется либо «астрофизический» профиль, либо аналог профиля NFW, либо аналог профиля Хернквиста. Если же рассматривается вариант б), то в качестве профиля БМ берется тот же «астрофизический» профиль, а в качестве профиля ТМ - один из аналогов профилей NFW и Хернквиста. Оригиналы последних профилей, рассмотренных в работах NFW и Хернквиста, предназначены для сферически симметричных галактик. Для применения этих профилей к ЭГ нами внесены соответствующие изменения и названы как аналоги этих профилей. На основе созданных новых моделей определены гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, суммарная поверхностная яркость и полная светимость галактик в зависимости от профиля плотности, а также дисперсии скоростей в зависимости от расстояния до центра галактики. Определены значения эффективного радиуса и параметра семейства гомотетических эллипсоидов, центральной и эффективной поверхностной яркости в зависимости от профиля плотности модельной галактики. Кроме того, установлены соотношения между важными динамическими параметрами галактики: масса - размеры, масса - дисперсия скоростей, размер - дисперсия скоростей - светимость (поверхностная яркость). Исследованы эволюционные сценарии образования ЭГ согласно этим моделям. Проведено сравнение этих результатов с соответствующими данными, полученными другими авторами в проектах ATLAS - 3D, SAMI и SDSS. Полученные результаты применены к более шестидесяти модельным ЭГ с параметрами, точно совпадающими с реально существующими галактиками. Данные результаты могут быть также применены при исследовании анизотропии дисперсии скоростей в ЭГ.

Задача. Динамика спутников планет.

В начале 2023 года завершалась работа по определению орбит некоторых далеких спутников Юпитера, для которых опубликованы наблюдения с космической обсерватории GAIA. В предыдущих публикациях результатов наблюдений с GAIA содержались только координаты звезд. В 2022 году появились результаты наблюдений 31 спутника больших планет. Мы занялись орбитами далеких спутников. Это были 10 спутников Юпитера, один спутник Сатурна и один спутник Урана. Орбиты этих спутников были определены ранее на основе наземных наблюдений. Особенность наблюдений на космической обсерватории GAIA состояла в том, что наблюдения велись так называемыми сканами. При использовании наблюдений важно, что в некоторых выделенных направлениях на небе вдоль этих сканов точность

отсчета положений спутников была в сто раз выше, чем поперек направлений сканов. Это привело к необходимости приводить измерения к направлениям сканов и придавать условным уравнениям соответствующие веса. В итоге точность измерения положений спутников вдоль сканов оказалась в тысячу раз выше точности наземных наблюдений. Наблюдения далеких спутников на космической обсерватории GAIA были выполнены на коротких интервалах времени. Поэтому для хорошего определения орбит наблюдения с GAIA использовались совместно с наземными наблюдениями. В работе оценивалась точность эфемерид спутников, полученных с использованием наблюдений с GAIA. Погрешность эфемерид уменьшилась в сто раз по сравнению с эфемеридами, полученными с использованием только наземных наблюдений. Таким образом, для 12 далеких спутников достигнут значительный прогресс в точности моделей движения и эфемерид. В процессе работы выяснилось, что при такой высокой точности наблюдений необходимо учитывать релятивистское отклонение света, вызванное гравитацией Солнца. Оказалось, что релятивистское отклонение света из-за притяжения планеты (Юпитер или Сатурн) оказалось пренебрежимо малым. Это несмотря на то, что спутники движутся на небе вблизи планеты, а Солнце расположено в другом конце неба. Можно ожидать, что при продолжении наблюдений спутников планет на космической обсерватории GAIA точность моделей движения спутников значительно возрастет. Это обеспечит лучшее планирование и проведение космических миссий, а также даст новый материал для изучения эволюции тел Солнечной системы. Продолжалось уточнение моделей движения спутников астероидов. Делались попытки учета возмущений от притяжения Солнца. Для ряда спутников значения масс систем получили некоторые поправки. Показано, что по сравнению с использованием моделей кеплерова движения спутников массы большинства систем изменились незначительно. Только для некоторых систем при определении масс нужно учитывать возмущения от Солнца.

Задача. Динамика планет и спутников.

За основу постановки задачи взяты уравнения ER3BP в форме рассмотренной в работе Ашенберга (Ashenberg in J Guid Control Dyn 19(1):68-74, 1996). Рассмотрена плоская синодическая система координат (с началом в барицентре системы), с последующим переходом в пульсирующую с новым масштабированием координат и истинной аномалией f . Представлен алгоритм расчета движения спутника конечных размеров, спутник рассмотрен как твёрдый эллипсоид почти сферической формы, с гравитационным потенциалом "MacCullagh type". В уравнениях переменными являются: 2 координаты спутника $\{x, y\}$; эксцентриситет, большая полуось $\{e, ap\}$ эллиптической орбиты планеты вокруг барицентра "Луна-Планета" (их переменность, обусловлена приливными явлениями). Постоянными задачи являются: пренебрежимо малая масса малого спутника (и его конечные размеры, включая отклонение от сферической формы); массы Луны планеты, самой планеты (Земли), их размеры; гравитационная постоянная; число Лава k_2 , фактор добротности Q спутника и планеты. Получены полу-аналитические и численные решения при выбранных начальных значениях. Сделан вывод о вынужденном характере колебаний расстояния спутника до луны планеты и о реализуемости квази-периодического характера осцилляций в заданной окрестности луны планеты (в приближении "захваченной орбиты"). Установление данного факта для системы "Луна-Земля" есть основной результат

работы - что и планировалось. Для системы “Фобос-Марс”, “Деймос-Марс” подобных орбит обнаружить не удалось ни для каких начальных данных; для системы “Каллисто-Юпитер” подобные орбиты существуют, но за счёт имеющих резких искривлений (поворотов, а значит и перегрузок для спутника), они нереалистичны для его устойчивого длительного пребывания на подобной орбите. Основные результаты получены С.В.Ершковым; при этом, проф. Е.Ю.Просвиряков (Уральский Федеральный Университет) осуществлял численные расчеты, проф. Д.Д.Лещенко (Одесская государственная академия строительства и архитектуры) и prof. E.I.Abouelmagd (Egypt, NRIAG, Celestial Mechanics and Space Dynamics Research Group) осуществляли работу по глубокому поиску источников/научной литературе по данной тематике. Оценка результатов: поставленная задача решена полностью для внутренних планет Солнечной системы - для всех возможных наборов начальных данных - а также для одного из наиболее крупных спутников Юпитера, Каллисто (единственного, не вовлеченного в устойчивые орбитальные резонансы, резонанс Лапласа). Дополнительные исследования необходимы для аналогичной задачи (но для движения точечного спутника конечной массы); также не решена задача о движении спутника вокруг барицентра системы “луна-планета”.

Задача. Теория фигур равновесия.

Получена новая формула для угловой скорости вращения фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости. Главной особенностью этой формулы является то, что в ней угловая скорость выражается только через компоненты внутренней и внешней гравитационной энергии тела. Понятия о компонентах внутренней и внешней гравитационной энергии тела были введены нами в монографии от 2003 года. Новая формула для угловой скорости фигур равновесия проверена на классических сфероидах Маклорена и трехосных эллипсоидах Якоби. Преимущество данной формулы перед классическими в том, что она может описывать не только эллипсоидальные фигуры равновесия, но и фигуры равновесия любой другой геометрической формы, в том числе и фигуры тороидальные формы.

Задача. Метод колец Гаусса

Развит расширенный подход к модели круглых колец Гаусса для изучения вековой эволюции орбит двух планет под действием взаимного гравитационного возмущения. Орбиты планет имеют малый угол взаимного наклона и представлены круглыми кольцами, на которые переносятся массы, большие полуоси и углы наклона орбит, а также орбитальные угловые моменты планет. Роль функции возмущений в задаче играет взаимная гравитационная энергия колец, которая получена как в интегральном виде, так и в виде ряда по степеням углов наклона, коэффициенты которого выражаются через эллиптические интегралы. Метод учитывает несовпадение узлов орбит планет и разработан в двух вариантах: i) с большим, и ii) малым углом между узлами орбит. Для каждого из этих вариантов орбит составлены и в конечном аналитическом виде решены системы из 4 дифференциальных уравнений, описывающих вековую эволюцию орбит. Доказано, что в процессе эволюции в обоих случаях угол взаимного наклона орбит остаётся постоянным. Вариант (i) проверен на примере системы Солнце-Юпитер-Сатурн, вариант (ii) - на изучении эволюции орбит экзопланет Kepler 10b и Kepler 10c. Для обеих систем вычислены параметры прецессии и построены графики.

Задача. Обзор задач небесной механики.

Дан очерк развития идей и некоторых достижений в современной небесной механике. Акцент делается на то, что классическое определение этой науки, данное Лапласом, не полностью отражает содержание современной небесной механики, и более емким является термин динамическая астрономия. Динамическая астрономия изучает почти все, что движется и вращается в Космосе: от пылинок до комет и астероидов, от ИСЗ, планет и их спутников - до звезд и галактик. Эта комплексная наука включает не только задачи классической, но и релятивистской небесной механики, в неё входят теория фигур равновесия, разнообразные вычислительные методы и методы компьютерного моделирования. Важное значение имеют качественные методы, вершиной которых явилось создание КАМ-теории. Развитие небесной механики шло через практику разнообразных приложений, и диапазон проблем в ней исключительно широкий. Новым стимулом для развития динамической астрономии стало открытие экзопланет у других звезд. В статье прослеживается цепочка идей от кеплеровских орбит до оскулирующих лагранжевых эллипсов, от задачи двух тел - к задачам многих тел, от колец Гаусса - до моделей, построенных на основе прецессирующих аналогов этих колец.

Задача. Динамика Солнечной системы.

Значение приливообразующего потенциала Солнца, $V(t)$, в произвольной точке звезды на момент времени t представляется гармоническим рядом общего вида, зависящим от r - гелиоцентрическое расстояние точки; φ, λ - ее гелиографическая широта и долгота, соответственно; R_{sun} - средний экваториальный радиус Солнца; P_{nm} - присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m ; n_{max} - максимальная степень разложения потенциала. Амплитуды $C_{(nm)_i}$ и $S_{(nm)_i}$ членов ряда в данной работе получены в виде полиномов времени пятой степени (отметим, что в первой версии разложения STGP (Cionco, Kudryavtsev, Soon 2023) амплитуды членов ряда представлялись полиномами третьей степени). Новые ряды STGP построены с помощью авторской модификации метода спектрального анализа (Kudryavtsev 2004, 2007) на временном интервале 30 000 лет: 13 000 г. до н.э. - 17 000 г. н.э. Разложение, выполненное на столь длительном интервале времени, позволяет лучше разделить близкие частоты и, как следствие, влияние различных комбинаций средних движений больших планет на STGP. В качестве источника координат больших планет на всем указанном интервале времени использовалась современная численная эфемериды планет DE-441 (Park et al. 2021). Результатом работы является новый расширенный каталог, представляющий долгопериодическую часть разложения STGP в гармонический ряды (http://sai.msu.ru/neb/ksm/tgp_sun/STGPv2-LongPeriods.zip). Каталог включает в себя 326 членов (в предыдущей версии STGP (Cionco, Kudryavtsev, Soon 2023) число таких членов составляло 128). Минимальная амплитуда членов разложения, включенных в каталог, равна 10^{-8} м²/с². Максимальное значение степени разложения n_{max} , при котором были обнаружены члены с данной минимальной амплитудой, равно 4. При анализе данных расширенного каталога STGP не были выявлены приливные возмущения на Солнце, имеющих периодичность ≈ 11.0 лет и/или ≈ 22.0 года, а также сколь-либо значительные члены STGP, обусловленные различными конфигурациями V-E-J. Отдельно были вычислены амплитуды периодических членов разложения STGP, соответствующих дискутируемым

в литературе комбинациям средних движений Венеры, Земли и Юпитера с множителями (3, -5, 2) и (6, -10, 4). Амплитуды обоих членов оказались пренебрежимо малыми: 1.5×10^{-9} м²/с² и 2.3×10^{-10} м²/с², соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача. Динамика эллиптических галактик.

В настоящей работе рассмотрены несколько моделей неоднородной эллиптической галактики (ЭГ) как динамической системы, имеющей различные формы и состоящей из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности. На основе этих моделей найдены явные выражения ключевых параметров галактики. Установлены соотношения между важными динамическими параметрами галактики. Исследованы эволюционные сценарии образования ЭГ согласно этим моделям. Проведено сравнение этих результатов с соответствующими данными, полученными другими авторами в проектах ATLAS - 3D, SAMI и SDSS. Полученные результаты применены к более шестидесяти модельным ЭГ, имеющие различные формы с параметрами, точно совпадающими с параметрами реально существующих галактик и приведены в виде таблиц для некоторых ЭГ. Данные результаты могут быть также применены при исследовании анизотропии дисперсии скоростей в ЭГ.

Задача. Динамика спутников планет.

В итоге работы по уточнению моделей движения и эфемерид спутников больших планет и астероидов были получены следующие новые результаты. Было использовано позиционные наблюдения спутников на космической обсерватории GAIA. Точность этих наблюдений оказалась в тысячу раз выше точности наземных наблюдений. В итоге для 12 далеких спутников Юпитера, Сатурна и Урана точность построенных моделей движения и эфемерид улучшилась в сто раз. В теории движения спутников астероидов были учтены возмущения от притяжения Солнца. В итоге на основе наблюдений были получены более точные значения масс некоторых систем астероидов со спутниками. Задача. Динамика планет и спутников.

Задача. Динамика планет и спутников.

Движение спутника конечных размеров (твёрдый эллипсоид почти сферической формы) вблизи естественной луны планеты в рамках ER3BP не является устойчивой задачей Коши: спутник м.б. выброшен за пределы “захваченной” орбиты в режиме сильных осцилляций периодического характера, при любом малом отклонении от начальных данных (обеспечивающих условное стабильное движение по орбите вокруг луны). Нерешенной остается задача о движении спутника вокруг барицентра системы “луна-планета”.

Задача. Теория фигур равновесия.

Новая формула для угловой скорости фигур равновесия проверена нами на классических сфероидах Маклорена и трехосных эллипсоидах Якоби. Важное значение данная формула имеет при изучении тороидальных фигур, а также двухкомпонентных моделей (каменное ядро - ледяная оболочка) малых небесных тел, таких как карликовая планета Хаумеа.

Задача. Метод колец Гаусса.

Для исследования вековой эволюции орбит в экзопланетных системах важным является создание новых аналитических методов в небесной механике. Наш подход основан на круглых кольцах Гаусса, где в качестве функции возмущений применяется выражение взаимной энергии двух колец. Для двух вариантов взаимного расположения орбит планет нами составлены и в конечном аналитическом виде решены системы из 4 дифференциальных уравнений, описывающих вековую эволюцию орбит. Формулы

проверены на примере системы Солнце-Юпитер-Сатурн, а также на изучении эволюции орбит экзопланетных систем Kepler 10b и Kepler 10c.

Задача. Динамика Солнечной системы.

Выполнено новое расширенное разложение долгопериодической части приливообразующего потенциала Солнца. Порог амплитуд учитываемых членов разложения уменьшен с 10^{-7} м²/с² (используемого в первой версии каталога) до 10^{-8} м²/с². Как следствие, число найденных долгопериодических членов разложения STGP увеличилось со 128 до 326; В расширенной версии каталога также не обнаружены приливные члены с периодом ≈ 11.0 лет и/или ≈ 22.0 года; Амплитуды членов разложения STGP с аргументами, соответствующим используемым рядом авторов комбинациям средних движений Венеры, Земли и Юпитера $6n_2 - 10n_3 + 4n_5$ и $3n_2 - 5n_3 + 2n_5$, оказываются пренебрежимо малыми. Подтверждается, что приливное воздействие больших планет на Солнце является крайне маловероятным источником основного 11-летнего цикла солнечной активности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2023 году
Таблица А.1

Источник финансирования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные средства в виде субсидии на выполнение фундаментальных научных исследований в соответствии с госзаданием МГУ, часть 2 (р. 01 10)		