

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, 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

Работа по теме состояла в решении ряда следующих задач.

Об устойчивости слоисто-неоднородной эллиптической галактики как динамической системы.

Рассмотрена задача о создании новых моделей слоисто-неоднородной эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующихся с современными представлениями о строении таких галактик. При этом считается, что ЭГ состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности – профилями и имеет форму либо трехосного эллипсоида, либо сжатого или вытянутого сфероида. На основе этих моделей следует определить некоторые ключевые динамические параметры ЭГ: гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, распределение углового момента и удельные угловые моменты в зависимости от профилей плотности. Установить равновесие и устойчивость (неустойчивость) ЭГ как динамической системы согласно известным критериям. Найти критические значения параметра семейства сфероидов, определяющие границы устойчивости (или неустойчивости) динамической системы по значениям удельных угловых моментов в зависимости от профилей плотности. Полученные результаты применить модельным ЭГ с параметрами, точно совпадающими с реально существующими и приведены в виде таблиц и рисунков.

Сравнительный анализ эфемерид планет и Луны из разных источников.

Произведено вычисление эфемерид планет и Луны, созданных в США (JPL), Франции (IMCCE) и России (ИПА РАН). Сравнение делалось на интервалах времени планируемых космических миссий. Длительность интервалов составляла около двух лет для планет и пяти месяцев для Луны. На основе сравнения сделано заключение, что ни какая из рассмотренных эфемерид не обладает преимуществом по точности. Эфемериды из любого из рассмотренных источников могут применяться на практике.

Положение барицентра Солнечной системы относительно центра Солнца в задачах физики Солнца.

Произведено вычисление гелиоцентрического расстояния и гелиоэваториальной широты барицентра Солнечной системы на интервале времени 500 лет, Показано, что цикличность физических процессов на Солнце никак не связана с движением барицентра Солнечной системы относительно центра Солнца.

Движение пробного точечного тела возле естественного спутника планеты.

Объект исследования: движение малого спутника точечной массы вокруг естественных спутников, называемых здесь лунами, планет Солнечной системы с медленно меняющимся, малым эксцентриситетом их орбиты

вокруг планеты. Цель работы: 1) установить, существуют ли такие орбиты в принципе для каких-либо наборов начальных данных, без столкновений в ближайшей перспективе с луной или планетой; 2) если существуют, исследовать устойчивость орбиты спутника вокруг луны. Методы проведения работы: 1) редукция (упрощение без существенных потерь в точности для используемого приближения модели) классических уравнений – эллиптической ограниченной задач трёх тел (ER3BP) в приближении малого, медленно меняющегося эксцентриситета и “захваченной” плоской орбиты спутника вокруг луны; 2) полуаналитическое 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 интегрирование уравнений движения в полученной модели методом Runge-Kutta 4-ого порядка с шагом 0.001 по истинной аномалии для различных наборов начальных данных.

Краткие результаты работы: представлен абсолютно новый алгоритм расчета движения спутника точечной массы вокруг естественных лун планет Солнечной системы (с медленно меняющимся, малым эксцентриситетом их орбиты вокруг планеты).

Результаты: показан квазипериодический характер сильных осцилляций для “захваченной” плоской орбиты спутника. Основные выводы: орбита спутника неустойчива для систем “Луна-Земля”, “Фобос-Марс”, “Деймос-Марс”; для системы “Каллисто-Юпитер” подобные орбиты существуют, но за счёт резких частых осцилляций и поворотов на орбите (т.е. перегрузок для спутника) они не реалистичны для его устойчивого длительного пребывания на подобной орбите. Для системы “Луна-Земля” не удалось обнаружить бесстолкновительные устойчивые орбиты, с квазипериодическим характером колебаний расстояния спутника точечной массы до Луны (в приближении “захваченной” плоской орбиты), в отличие от изученного ранее случая спутника конечных размеров, где такие орбиты обнаружить удалось. В итоге отсутствие спутников планет в Солнечной системе объясняется неустойчивостью их орбит.

Задача о фигурах равновесия двух жидких масс.

Поставлена и решена задача о фигурах равновесия двух жидких масс, находящихся в состоянии приливного взаимозахвата. В системе выполняется условие полного синхронного (орбитального плюс спинового) вращения, оба тела имеют одинаковые массы и конгруэнтные эллипсоидальные поверхности. Для каждой фигуры, кроме собственной гравитации и центробежных сил, в приливном приближении учитывается притяжение от второго тела. Находится пространственная форма фигур равновесия в виде трехосных эллипсоидов. Установлено, что спиновое вращение эллипсоидальных фигур равновесия происходит не вокруг малых, как это обычно предполагается, а вокруг средних осей эллипсоидов. Данным методом изучается двойной астероид (190166) 2005 UP156, приближённо удовлетворяющий исходным условиям задачи. При известных на сегодня параметрах, эта система астероидов оказывается неравновесной.

Задача о вековой эволюции колец у малых небесных тел.

Разработан метод исследования вековой эволюции и сохранения формы колец у малых небесных тел, не имеющих спутников-пастухов. Построена модель составного кольца из двух близких, в общем случае некомпланарных эллиптических колечек Гаусса. Самогравитация такого кольца учиты-

ваются через взаимную гравитационную энергию W_{mut} граничных колечек. Функция W_{mut} представлена в виде ряда с точностью до 4-й степени малых параметров задачи. Вековая эволюция составного кольца описывается дифференциальными уравнениями в специальных (коллективных) переменных. Рассматриваются задачи для колец без центрального тела и для колец с центральным телом. Установлено, что самогравитация действительно способствует сохранению формы кольца без привлечения гипотезы о спутниках-пастухах, получены критерии сохранения формы колец. Теория применяется для изучения кольца карликовой планеты Хаумеа.

Формула для угловой скорости фигур равновесия гравитирующей жидкости.

Получена новая формула для угловой скорости фигур равновесия гравитирующей жидкости с политропным уравнением состояния. Её особенность в том, что угловая скорость вращения представлена через компоненты внутренней и внешней гравитационной энергии фигуры. Для решения задачи постоянная интегрирования в выражении полного потенциала впервые представлена через три глобальные характеристики: массу, полную гравитационную энергию и энергию вращения тела. Справедливость новой формулы подтверждена предельным переходом к классическим однородным фигурам равновесия: сфероидам Маклорена и эллипсоидам Якоби. Результаты работы расширяют область применения теории фигур равновесия.

Динамика двух взаимодействующих концентрических звездных колец.

Исследуется динамика двух взаимодействующих концентрических звездных колец, расположенных вокруг сверхмассивной черной дыры в центральном парсеке Галактики. Самое массивное кольцо с обратным движением звёзд моделируется R-диск. Другое кольцо с прямым движением звёзд представлено тонким круговым колечком с наклоном 62 градуса к плоскости R-диска. Из наблюдений известны массы и геометрические параметры колец. Найдены взаимная гравитационная энергия W_{mut} и момент сил M между кольцами, построены графики этих величин в зависимости от угла наклона. Вычислены угловые моменты колец. Для системы колец определена плоскость Лапласа. Установлено, что взаимное возмущение вращающихся колец приводит к прецессии узлов с периодом равным $3.53 \cdot 10^5$ лет. Это объясняет известный из наблюдений большой угол расхождения линий узлов.

Исследование приливообразующего потенциала Земли.

Современные гармонические разложения приливообразующего потенциала Земли (tide-generating potential - TGP), например, HW95, RATGP95, KSM03 включают в себя ряд членов, обусловленных совместным действием полярного сжатия Земли и гравитационного притяжения Луны и Солнца. В данной работе дополнительно рассмотрен эффект экваториального сжатия (или трехосности) Земли в значениях TGP. Получены явные аналитические выражения, представляющие соответствующую часть потенциала. Вычислены новые члены гармонического разложения TGP, обусловленные трехосностью Земли. Амплитуды 19 из них превышают пороговый уровень $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2$, принятый в современных каталогах приливообразующих потенциалов. Три новых члена разложения имеют знак основной частоты, противоположный знаку частоты вращения Земли. Такие члены разложения TGP обнаружены впервые. Для каждого найденного члена разложения

целочисленный множитель среднего местного лунного времени, используемый в аргументе, не равен порядку сферической гармоники, ассоциированной с этим членом. Это новое свойство, которое требует соответствующей модификации стандартного формата HW95 для представления TGP. Полученные новые члены разложения предлагаются для включения в современные и будущие каталоги приливообразующего потенциала Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимо построить новые модели слоисто-неоднородной эллиптической галактики (ЭГ), соответствующие современным представлениям о строении таких галактик. Согласно этим моделям ЭГ имеет форму либо трехосного эллипсоида, либо сжатого или вытянутого сфероида и состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности - профилями. На основе этих моделей нужно установить равновесие и устойчивость (неустойчивость) галактики как динамической системы согласно известным критериям. Нужно найти критические значения параметра семейства сфероидов, определяющие границы устойчивости (или неустойчивости) динамической системы по значениям удельных угловых моментов в зависимости от профилей плотности. Полученные результаты следует применить к более шестидесяти модельным ЭГ с параметрами, точно совпадающими с реально существующими. В мире существуют три наиболее развитых источника эфемерид планет и Луны, созданных в США (JPL), Франции (IMCCE) и России (ИПА РАН). Возникает вопрос, какой из трех вариантов эфемерид является наиболее точным. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо сравнить эфемериды между собой. Нужен также обзор этих источников - выяснить, на каких наборах наблюдений они основаны, какие возмущающие силы учитывались, какими методами построены эфемериды. При изучении физики Солнца возникает подозрение, что на активность Солнца влияет притяжение планет. Чтобы выяснить это обстоятельство, нужно определить положение барицентра Солнечной системы на интервале времени несколько сотен лет. До сих пор такие данные не были опубликованы. При рассмотрении состава Солнечной системы оказывается, что не наблюдаются спутники спутников планет. Интересно выяснить, почему. Требуется исследование вопроса о траекториях движения небольшого спутника точечной массы в рамках эллиптической ограниченной задачи 3-тел (ER3BP) по устойчивой орбите вокруг крупного естественного спутника планеты: два массивных тела массами M_{planet} и m_{moon} движутся вокруг общего барицентра по квази-кеплеровым траекториям; спутник массой m вращается по квази-эллиптической "захваченной" орбите вокруг, и на незначительном удалении от луны планеты m_{moon} ($m \ll m_{moon} \ll M_{planet}$). Ключевыми особенностями являются полу-аналитические допущения для численных решений: 1) приближение "захваченной" плоской орбиты спутника вокруг планеты (в синодической вращающейся, декартовой системе координат); 2) эксцентриситет орбиты луны планеты при обращении вокруг планеты считается малым и переменным (медленно меняющимся), зависящим от истинной аномалии. Задача относится к разделу небесной механики по устойчивости спутниковой динамики. Необычным способом рассмотрения является вторая из указанных особенностей, т.е. переменный эксцентриситет (орбиты луны планеты) в уравнениях ER3BP. Одной из актуальных задач в современной астрофизике является изучение фигур равновесия двойных астероидов. До недавнего времени среди множества двойных астероидов не было известно ни одной пары, которая: i) обладала бы двойным синхронным вращением, и при этом, ii) оба компонента имели бы одинаковые массы и размеры. Недавно такая система астероидов была обнаружена. В связи с этим поставлена задача о фигурах равновесия двух жидких масс, находящихся в состоянии тесного приливного взаимозахвата.

Кольца вокруг небесных тел давно привлекают внимание исследователей. Ранее резкий край колец объяснялся механизмом столкновений частиц и резонансами орбит частиц со спутниками - пастухами. После недавнего открытия колец у малых небесных тел (астероида-кентавра Chariklo и двух объектов пояса Койпера Haumea и Quaoar) интерес к динамике колец ещё более возрос. Эти кольца отличаются от классических колец планетного типа: они узкие и не имеют спутников-пастухов, поэтому для них остро встаёт проблема описания вековой эволюции и открытия новых механизмов сохранения формы. Для решения этой проблемы у нас особое внимание уделяется механизму самогравитации колец. Актуальным в современной динамической астрономии является изучение фигур равновесия небесных тел. В астрофизике для этих целей 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. Новые возможности открывает представление угловой скорости через величины внутренней и внешней гравитационной энергии тела. Данный метод применяется к изучению вращения политроп. Важное значение в современной астрофизике имеет изучение динамики взаимодействующих концентрических звёздных колец, расположенных вокруг сверхмассивной черной дыры в центральном парсеке Галактики. В настоящее время в этой области Галактики известны два звездных кольца: массивное кольцо с обратным движением звёзд, и менее массивное кольцо с прямым движением звёзд. Представляет большой интерес изучить прецессию этих колец под влиянием гравитационных возмущений друг от друга. Земля не является сферой однородной плотности, поэтому гравитационная сила, действующая на нашу планету со стороны Луны, Солнца и больших планет, зависит от нецентральности геопотенциала. Как следствие, приливообразующий потенциал Земли (tide-generating potential или TGP) также зависит от несферичности фигуры Земли и неравномерностей в распределении ее плотности. Совместное влияние полярного сжатия Земли и гравитационного притяжения Луны/Солнца на TGP Земли хорошо изучено, и наиболее точные разложения приливообразующего потенциала HW95, RATGP95, KSM03 включают в себя ряд соответствующих членов. Аналитические выражения, описывающие данный эффект используют либо значение J_2 , второго зонального коэффициента разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям, либо величины главных моментов инерции Земли. Оба подхода эквивалентны в силу известных соотношений между главными моментами инерции планеты и значением J_2 . Однако влияние экваториального сжатия Земли на приливообразующий потенциал планеты до сих пор детально не изучалось, и ни одно из известных разложений TGP не включает соответствующие члены. (Здесь и далее под "экваториальным сжатием" мы понимаем эффект трехосности Земли, т.е. того факта, что фигура Земли не является точным эллипсоидом вращения). Влияние трехосности Земли учитывается во многих исследованиях и практических приложениях геодинамики и небесной механики таких, как теории нутации, при изучении нерегулярного вращения Земли и движения полюсов и др. Экваториальное сжатие Земли может быть, в частности, описано с помощью коэффициентов C_{22} , S_{22} - секториальных гармоник второго порядка разложения геопотенциала. Значения

данных коэффициентов хорошо определены по многочисленным гравиметрическим и спутниковым измерениям. Поэтому, первый этап исследования состоит в том, чтобы вывести явные аналитические выражения, описывающие влияние коэффициентов разложения геопотенциала C_{22} , S_{22} на TGP Земли. Затем можно вычислить численные значения соответствующих членов гармонического разложения TGP. Если амплитуда какого-либо нового члена превышает минимальный порог $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2$ (принятый в каталогах HW95 и KSM03), то он предлагается к включению в существующие и будущие каталоги разложения приливообразующего потенциала Земли.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Об устойчивости слоисто-неоднородной эллиптической галактики как динамической системы.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики созданы новые модели слоисто-неоднородной эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении таких галактик. Согласно этим моделям ЭГ состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) и представляет собой либо слоисто-неоднородной трехосный эллипсоид (Модель I), либо слоисто-неоднородной сжатый сфероид - сфероид Маклорена (Модель II), либо слоисто-неоднородной вытянутый сфероид (Модель III). При этом законом распределения плотности - профилем БМ является так называемый астрофизический профиль. Такое название связано, с тем, что такой профиль получается из закона распределения поверхностной яркости, открытого Хабблом посредством решения интегрального уравнения Абеля. В качестве профиля ТМ берется один из аналогов профилей авторов NFW (Navarro, Frenk, White) и Хернквиста. Эти профили названы аналогами, так как они получены из оригинальных профилей NFW и Хернквиста, путем адаптации их к эллиптическим галактикам. На основе моделей I, II и III найдены явные выражения: полной гравитационной (потенциальной) энергии и кинетической энергии вращения ЭГ, распределения углового момента и удельного углового момента в зависимости от профилей плотности. Установлена устойчивость (или неустойчивость) динамической системы согласно критерию Пиблса - Острайкера и по критерию Вандерворта, а также по значениям удельных угловых моментов. Найдены критические значения параметра семейства сфероидов, определяющие границы устойчивости (или неустойчивости) динамической системы по значениям удельных угловых моментов в рассмотренных выше профилях.

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

Сравнительный анализ эфемерид планет и Луны из разных источников.

Произведено вычисление эфемерид планет и Луны, созданных в США (JPL), Франции (IMCCE) и России (ИПА РАН). Выполнено сравнение положений планет и Луны по указанным эфемеридам с целью выявления наиболее точного источника эфемерид. Сравнение делалось на интервалах времени планируемых космических миссий. Длительность интервалов составляла около двух лет для планет и пяти месяцев для Луны. На основе сравнения сделано заключение, что ни какая из рассмотренных эфемерид не обладает преимуществом по точности. Эфемериды из любого из рассмотренных источников могут применяться на практике.

Кроме того, написан и опубликован обзор работ по построению трех указанных выше эфемерид планет и Луны. Рассмотрены наборы наблюдений, на которых основаны эфемериды. Поскольку сравнение эфемерид делалось на интервалах времени планируемых космических миссий, то написан и опубликован обзор планируемых космических миссий.

Положение барицентра Солнечной системы относительно центра Солнца в задачах физики Солнца.

В ряде публикаций высказывалось подозрение, что изменения активно-

сти Солнца связаны с притяжением планет. Возникла необходимость определения положения центра масс Солнечной системы относительно центра Солнца на больших интервалах времени.

В работе по теме произведено вычисление гелиоцентрического расстояния и гелиоэкваториальной широты барицентра Солнечной системы на интервале времени 500 лет, Движение центра масс Солнечной системы имеет периодический характер и определяется орбитальным движением наиболее массивной планеты - Юпитера. Поскольку тело Солнца вращается с периодом примерно 25 суток, а период орбитального движения Юпитера составляет около 12 лет, очевидно, что барицентр Солнечной системы обрывается вокруг центра Солнца с периодом около 25 суток. Оказалось, что часть времени барицентр выходит за пределы тела Солнца.

Сделано сравнение с изменениями параметров солнечной активности. Показано, что цикличность физических процессов на Солнце никак не связана с движением барицентра Солнечной системы относительно центра Солнца.

Движение пробного точечного тела возле естественного спутника планеты. За основу постановки задачи взяты уравнения эллиптической ограниченной задачи трёх тел (ER3BP) в классической форме, но с переменным малым эксцентриситетом. 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 точечной массы вокруг естественного спутника планеты, движущегося по своей квази-кеплеровой орбите вокруг планеты, с медленно меняющимся малым эксцентриситетом и называемый здесь луной.

В уравнениях переменными являются: координаты спутника (x, y, z); малый эксцентриситет, большая полуось (e, ap) эллиптической орбиты луны планеты вокруг барицентра "Луна-Планета" (их переменность обусловлена приливными явлениями). В работе уделено внимание переходу от аргумента (независимой переменной) в виде времени в приливных явлениях к аргументу истинной аномалии. Постоянными задачи являются: пренебрежимо малая масса малого спутника; массы Луны планеты, самой планеты (Земли), их размеры; гравитационная постоянная; число Лава k_2 , фактор добротности Q спутника и планеты. Получены полуаналитические и численные решения при выбранных начальных значениях. Сделан вывод о вынужденном характере частых колебаний расстояния спутника до луны планеты (в приближении "захваченной орбиты"). Установление данного факта для системы "Луна-Земля" есть основной результат работы - что и планировалось: устойчивых орбит спутника в течение длительного времени, без столкновений с Луной и/или Землей, в численном эксперименте обнаружить не удалось; кроме того, частые осцилляции спутника при движении по орбите обуславливают существенную динамическую перегрузку для спутника. Для системы "Фобос-Марс", "Деймос-Марс" подобных орбит обнаружить не удалось также ни для каких начальных данных; для системы "Каллисто-Юпитер" подобные орбиты существуют, но за счёт частых осцилляций расстояния спутника до луны планеты, а значит и резких динамических разворотов на орбите (перегрузок для спутника), они нереалистичны для его устойчивого пребывания на такой орбите. Основные результаты получены С.В. Ершковым. Оценка результатов: поставленная задача решена

полностью для внутренних планет Солнечной системы, а также для спутника Юпитера, Каллисто (единственного, не вовлеченного в устойчивые орбитальные резонансы, резонанс Лапласа).

Задача о фигурах равновесия двух жидких масс Поставлена и решена задача о фигурах равновесия двух жидких масс, находящихся в состоянии приливного взаимозахвата. В системе выполняется условие полного синхронного (орбитального плюс спинового) вращения, оба тела имеют одинаковые массы и конгруэнтные эллипсоидальные поверхности. Для каждой фигуры, кроме собственной гравитации и центробежных сил, в приливном приближении учитывается притяжение от второго тела. Аналитико-численным методом находится пространственная форма фигур равновесия в виде трехосных эллипсоидов. Установлено, что спиновое вращение эллипсоидальных фигур равновесия происходит не вокруг малых, как это обычно предполагается, а вокруг средних осей эллипсоидов. Данным методом изучается двойной астероид (190166) 2005 UP156, приближённо удовлетворяющий исходным условиям задачи. Исследование показало, что при известных на сегодня параметрах, система двух астероидов (190166) 2005 UP156 оказывается неравновесной.

Задача о вековой эволюции колец у малых небесных тел.

Разработан метод исследования вековой эволюции и сохранения формы колец у малых небесных тел, не имеющих спутников-пастухов. Для решения задачи построена модель составного кольца из двух близких, в общем случае некомпланарных эллиптических колечек Гаусса. Самогравитация такого кольца учитывается через взаимную гравитационную энергию W_{mut} граничных колечек. Функция W_{mut} представлена в виде ряда с точностью до 4-й степени малых эксцентриситетов и взаимного наклона колечек. Вековая эволюция составного кольца описывается дифференциальными уравнениями в специальных (коллективных) переменных. Рассматриваются два варианта задачи. Для колец без центрального тела (задача 1) с помощью функции взаимной энергии получена замкнутая система из 8 дифференциальных уравнений. В задаче 2 изучается эволюция колец в азимутально усреднённом потенциале вращающегося трёхосного тела; здесь получена вторая система из восьми дифференциальных уравнений. В обеих задачах рассматриваются два частных случая: i) случай компланарных эллиптических колец, и ii) случай круглых колец с наклоном. Установлено, что самогравитация действительно способствует сохранению формы кольца без привлечения гипотезы о спутниках-пастухах. Теория применяется для изучения недавно открытого кольца карликовой планеты Хаумеа. Показано, что без учёта самогравитации время нодальной прецессии кольца Хаумеа равно 12.9 суток, но учёт самогравитации кольца может уменьшить этот период. Получены критерии сохранения формы колец, позволившие оценить интервал для отношения массы кольца к массе Хаумеа $10^{-4} < m/M < 10^{-3}$.

Формула для угловой скорости фигур равновесия гравитирующей жидкости.

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 ско-

рости 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. Данный метод применяется к изучению вращения гравитирующих политроп.

Динамика двух взаимодействующих концентрических звездных колец.

Рассчитан период нодальной прецессии двух звездных взаимодействующих концентрических звездных колец, расположенных вокруг сверхмассивной черной дыры в центральной парсеке Галактики. Самое массивное из них кольцо с обратным движением звезд (известное в литературе как «clockwise» диск) моделируется R-диском с небольшим вырезом в центре. Другое кольцо с прямым движением звезд («counter-clockwise» диск) представлено тонким круговым колечком с наклоном 62° к плоскости R-диска. Из наблюдений известны массы этих колец M_1 , M_2 ($M_1/M_2=60$), их геометрические параметры и пространственная ориентация. Найдены взаимная гравитационная энергия W_{mut} и момент сил M между кольцами, построены графики этих величин в зависимости от угла наклона. Вычислены угловые моменты колец L_1 и L_2 отношение которых $L_1/L_2=23.4$. Для системы колец определена плоскость Лапласа и углы её ориентации. Установлено, что взаимное возмущение вращающихся колец приводит к прецессии узлов с периодом $3.53 \cdot 10^5$ лет. Линии узлов обоих колец в плоскости Лапласа движутся с одинаковой угловой скоростью, но в противоположных направлениях. Это объясняет известный из наблюдений большой угол расхождения линий узлов.

Исследование приливообразующего потенциала Земли.

Влияние экваториального сжатия Земли на приливообразующий потенциал планеты до сих пор детально не изучалось, и ни одно из известных разложений TGP (tide-generating potential) не включает соответствующие члены. Здесь и далее под «экваториальным сжатием» мы понимаем эффект трехосности Земли, т.е. того факта, что фигура Земли не является точным эллипсоидом вращения. При этом влияние трехосности Земли учитывается во многих исследованиях и практических приложениях геодинамики и небесной механики, таких как теории нутации, при изучении нерегулярного вращения Земли и движения полюсов и др.

Экваториальное сжатие Земли может быть, в частности, описано с помощью коэффициентов C_{22} , S_{22} - секториальных гармоник второго порядка разложения геопотенциала. Значения данных коэффициентов хорошо определены по многочисленным гравиметрическим и спутниковым измерениям. Поэтому, первый этап исследования состоял в том, чтобы вывести аналитические выражения, описывающие влияние коэффициентов разложения геопотенциала C_{22} , S_{22} на TGP Земли. Такие выражения были получены в данной работе. Выведена точная аналитическая формула, в которой явно разделяются переменные, относящиеся к координатам произвольной точки P на поверхности Земли, и набор функций, зависящих только от координат притягивающих тел. Далее численные значения этих функций вычислялись на интервале времени 30000 лет с шагом 1 день. При этом использовались современные долгосрочные численные эфемериды больших планет и Луны DE-441. Таблицы полученных значений функций были обработаны с помощью модифицированного метода спектрального анализа и представле-

ны гармоническими рядами, равно как и соответствующая часть TGP. При этом аргументы всех членов рядов представляют собою линейные комбинации следующих пяти переменных Дудсона, которые, в свою очередь, есть полиномы до 5-го порядка от времени:

- среднее лунное время на меридиане точки P;
- средняя долгота Луны в орбите;
- средняя долгота Солнца в орбите;
- средняя долгота перицентра Луны;
- средняя долгота восходящего узла Луны, взятая с противоположным знаком.

Целочисленные множители при переменных Дудсона в аргументе каждого члена ряда и его амплитуда определялись в процессе спектрального анализа рассчитанных таблиц значений всех необходимых функций.

Если амплитуда превышала минимальный пороговый уровень $10^{(-8)} \text{ м}^2/\text{с}^2$, то соответствующий член включался в TGP каталог. Такой порог для амплитуд членов рядов разложения принят в наиболее современных TGP каталогах HW95 и KSM03. В результате, были найдены 19 новых членов гармонического разложения TGP Земли, обусловленные экваториальным сжатием планеты. Разложение дано в двух форматах: KSM03 (http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/ksm/tgp/tgp_coefficients_flattening_cs22.zip) и HW95 (http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/ksm/tgp/ksm03_flattening_cs22.dat).

Первый формат позволяет представлять разложение TGP Земли на длительных интервалах времени, поскольку включает в себя стабильную переменную времени TDB (на практике, TT). Во втором формате дополнительно используется относительно нестабильная переменная времени UT1, однако этот формат является основным в некоторых современных программах обработки приливов, например, ETERNA.

Анализ полученных новых членов разложения TGP показывает, что аргументы всех полученных новых членов в гармоническом разложении TGP Земли содержат целочисленный множитель при среднем местном лунном времени, который не равен порядку сферической гармоники, ассоциированной с этим членом. Эта свойство членов ряда разложения TGP является новым. Стандартный формат HW95 не содержит поле для такого множителя, поэтому нуждается в соответствующей модификации. Другим интересным результатом работы является то, что три из новых членов разложения TGP имеют знак основной частоты, противоположный знаку частоты вращения Земли. Эта особенность не присуща ни одному из известных до этого членов разложения TGP Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены несколько новых моделей слоисто-неоднородной эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении таких галактик. При этом полагается, что ЭГ состоит из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ) с разными законами распределения плотности – профилями и имеет форму либо трехосного эллипсоида, либо сжатого или вытянутого сфероида. Во всех моделях в качестве профиля БМ берется астрофизический закон распределения плотности, а в качестве профиля ТМ – один из аналогов профилей NFW и Хернквиста. На основе этих моделей определены некоторые ключевые динамические параметры ЭГ: гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, распределение углового момента и удельные угловые моменты в зависимости от профилей плотности. В качестве примеров взяты более шестидесяти модельных эллиптических галактик с параметрами, точно совпадающими с реально существующими. Проверено, что выполняется с достаточной гарантией необходимое условие – неравенство Пуанкаре для существования неоднородной ЭГ как фигуры равновесия. Кроме того, установлена устойчивость (неустойчивость) ЭГ как динамической системы согласно критерию Вандерворта и проверено выполнение критерия Пиблса-Острайкера. Найдены критические значения параметра семейства сфероидов, определяющие границы устойчивости (или неустойчивости) динамической системы по значениям удельных угловых моментов в зависимости от профилей плотности. Полученные результаты приведены в виде таблиц и рисунков.

Выполнено сравнение эфемерид планет и Луны, созданных в США (JPL), Франции (IMCCE) и России (ИПА РАН). Сравнение делалось на интервалах времени планируемых космических миссий. Длительность интервалов составляла около двух лет для планет и пяти месяцев для Луны. На основе сравнения сделано заключение, что ни какая из рассмотренных эфемерид не обладает преимуществом по точности. Эфемериды из любого из рассмотренных источников может применяться на практике.

Произведено вычисление гелиоцентрического расстояния и гелиоэваториальной широты барицентра Солнечной системы на интервале времени 500 лет. Показано, что цикличность физических процессов на Солнце никак не связана с движением барицентра Солнечной системы относительно центра Солнца. Найдено, что движение спутника точечной массы вблизи естественной луны планеты в рамках ER3BP (при переменном, малом эксцентриситете орбиты луны вокруг планеты) не является устойчивым: спутник может быть выброшен за пределы “захваченной” плоской орбиты в режиме сильных осцилляций квази-периодического характера, при малом отклонении от начальных данных, обеспечивающих стабильное движение по орбите вокруг луны, или в перспективе достаточно быстро столкнуться с луной или планетой. В итоге отсутствие спутников других спутников планет в Солнечной системе объясняется неустойчивостью их орбит.

В работе по теме поставлена и решена задача о фигурах равновесия двух жидких масс, находящихся в состоянии приливного взаимозахвата. В такой системе должны выполняться два условия: i) полного синхронного вращения, и ii) оба тела должны иметь одинаковые массы и конгруэнтные эллипсоидальные поверхности. Данным методом изучается двойной астероид

(190166) 2005 UP156, приближённо удовлетворяющий исходным условиям задачи. Установлено, что спиновое вращение эллипсоидальных фигур равновесия происходит не вокруг малых осей, как это обычно предполагается, а вокруг средних осей эллипсоидов. Дано объяснение этому эффекту. Важно также, что при известных на сегодня параметрах, система двух астероидов (190166) 2005 UP156 оказывается неравновесной.

В работе развит метод исследования вековой эволюции и сохранения формы колец у малых небесных тел, не имеющих спутников-пастухов. Главная идея метода - учет самогравитации колец непланетного типа. Самогравитация кольца рассчитывается через взаимную гравитационную энергию W_{mut} граничных колечек. Функция W_{mut} представлена в виде ряда с точностью до 4-й степени малых эксцентриситетов и взаимного наклона колечек. Вековая эволюция составного кольца описывается дифференциальными уравнениями в специальных (коллективных) переменных. Рассматриваются два варианта задачи. Для колец без центрального тела (задача 1) с помощью функции взаимной энергии получена замкнутая система из 8 дифференциальных уравнений. В задаче 2 изучается эволюция колец в азимутально усредненном потенциале вращающегося трёхосного тела; здесь получена вторая система из восьми дифференциальных уравнений. Установлено, что самогравитация действительно способствует сохранению формы кольца без привлечения гипотезы о спутниках-пастухах. Теория применяется для изучения недавно открытого кольца карликовой планеты Хаумеа. Получены критерии сохранения формы колец, позволившие оценить интервал для отношения массы кольца к массе Хаумеа $10^{-4} < m/M < 10^{-3}$.

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. Новая формула для угловой скорости фигур равновесия проверена на классических сфероидах Маклорена и трехосных эллипсоидах Якоби. Преимущество данной формулы перед классическими вариантами состоит 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. Данный метод впервые применяется к изучению вращения политроп.

Изучение динамики взаимодействующих концентрических звёздных колец, расположенных вокруг сверхмассивной черной дыры в центральном парсеке Галактики, имеет важное значение. В работе рассматривается прецессия двух звёздных колец: массивного кольца с обратным движением звёзд, и менее массивного кольца с прямым движением звёзд. Найдена плоскость Лапласа для этой системы колец и рассчитана скорость прецессии их узлов под влиянием взаимного гравитационного возмущения. Период прецессии примерно равен $3.53 \cdot 10^5$ лет.

Исследовано совместное влияние экваториального сжатия Земли и гравитационного влияния Луны, Солнца, больших планет на приливообразующий потенциал (TGP) Земли. Получены точные аналитические выражения, описывающие соответствующую часть TGP.

Вычислены новые члены разложения TGP Земли, обусловленные трехосностью фигуры планеты. Разложение дано в двух форматах: KSM03 и HW95; Амплитуды 19 новых членов разложения TGP Земли, представленных в

формате HW95, превышают пороговый уровень, используемый в современных TGP каталогах KSM03 и HW95. Данные новые члены предлагаются для включения в существующие и будущие каталоги приливообразующего потенциала Земли.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2024 году
Таблица А.1

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