

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
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 _____ (Емельянов Н.В.)
физико-математических наук, доктор физико-математических наук,
доцент/с.н.с. по специальности

Исполнители темы:

ведущий специалист , кандидат _____ (Черугова V.M.)
физико-математических наук
ведущий специалист _____ (Варфоломеев М.И.)
старший научный сотрудник, кандидат _____ (Вашковьяк С.Н.)
физико-математических наук
старший научный сотрудник, кандидат _____ (Гасанов С.А.)
физико-математических наук
ведущий специалист _____ (Ершков С.В.)
профессор, доктор физико-математических наук, профессор _____ (Кондратьев Б.П.)
по кафедре
ведущий научный сотрудник, доктор _____ (Кудрявцев С.М.)
физико-математических наук, кандидат технических наук, доцент/с.н.с. по специальности
старший научный сотрудник, кандидат _____ (Уральская В.С.)
физико-математических наук
доцент, кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. _____ (Ширмин Г.И.)
по специальности, доцент по кафедре

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

Объектами исследования являются всевозможные небесные тела: планеты, спутники планет, Солнце, звезды, звездные скопления, галактики. Целью работы является создание моделей движения небесных тел на основе наблюдений, выявление свойств механических движений, объяснение наблюдаемых эффектов. Методы исследований заключаются в решении дифференциальных уравнений движения, качественном анализе свойств решений, построении аналитических представлений гравитационных потенциалов небесных тел. Результаты работы. В рамках ограниченной эллиптической, параболической и гиперболической задач трех тел определены области устойчивости (или неустойчивости) по Хиллу движения пассивно-гравитирующего тела в зависимости от параметров орбиты сближающейся с центральным телом пробной звезды. Построены две динамические модели неоднородной эллиптической галактики (ЭГ) со сферическим (Модель 1) и эллипсоидальным (Модель 2) распределением плотности. В рамках этих моделей определяется динамика пространственного движения пассивно-гравитирующего тела (ПГТ) в поле притяжения такой неоднородной ЭГ. Получено новое решение классической задачи аналитического представления эфемерид всех 8 больших планет Солнечной системы. В качестве источника данных использованы современные численные эфемериды планет DE431, действительные на интервале времени более 30 000 лет – с 13 200 г. до н.э. по 17 191 г. н.э. Это первая работа, которая описывает с высокой точностью движение всех больших планет Солнечной системы аналитическими рядами на интервале времени в несколько десятков тысяч лет. Впервые разработан скрытый механизм эволюции каменно-ледяных небесных тел. Изучен класс фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости внутри гравитирующего кольца или тора. Построена фазовая модель бесстолкновительного звездного цилиндра, внедренного во вращающееся гало из темной материи. В приливном приближении в аналитическом виде найден гравитационный потенциал однородного тора с эллиптическим сечением рукава. Поставлена и решена задача о разложении пространственного потенциала однородного гравитирующего (или заряженного статическим электрическим зарядом) эллиптического диска в ряд по степеням эксцентриситета с точностью до второй степени включительно. Для добычи новых астрометрических данных о спутниках планет французский институт небесной механики и вычисления эфемерид регулярно организует всемирные кампании фотометрических наблюдений главных спутников больших планет во время их взаимных покрытий и затмений. Астрометрическая обработка всех данных, то есть получение координат спутников из фотометрических наблюдений, регулярно делается в отделе небесной механики ГАИШ в рамках данной научной темы. В 2016 году выполнена очередная обработка данных. Оригинальным методом, разработанным в отделе, обработаны 607 кривых яркости Галилеевых спутников Юпитера, полученных во время всемирной кампании 2015 года. Получено столько же разностей координат спутников, которые будут использованы в научных центрах мира для уточнения моделей движения спутников. В рамках данной темы исследований была выполнена обработка уникальных фотометрических наблюдений двух близких спутников Юпитера во время их затмений Галилеевыми спутниками выполненные французскими коллегами. Получены уникальные

позиционные данные, которые послужат уточнению моделей движения близких спутников Юпитера.

ВВЕДЕНИЕ

Работа по теме состояла в решении ряда отдельных задач по разным небесным объектам. Устойчивость движения планет при звездных сближениях. Данная работа относится к задачам качественной небесной механики, в которой определены необходимые условия устойчивости или неустойчивости по Хиллу движения пассивно-гравитирующего тела в рамках ограниченной эллиптической, параболической и гиперболической задач трех тел. Движение пассивно-гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики. Данная работа относится к задачам аналитической и качественной небесной механики и имеет цель определить динамику пространственного движения звезд или центра масс ШС, принадлежащих ЭГ. Аналитическое представление эфемерид больших планет. Проблема состоит в создании эффективного средства определения координат больших планет, что востребовано в большом ряде практических задач прогнозирования движения планет и спутников и освоения космического пространства. Задачи, связанные с моделированием гравитационных потенциалов небесных тел. Впервые разработан скрытый (латентный) механизм эволюции каменно-ледяных небесных тел. Механизм позволяет объяснить происхождение спутников малой планеты Хаумеа. Изучен класс фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости внутри гравитирующего кольца или тора. Показано, что эти фигуры образуют семейство последовательностей обобщенных сжатых сфероидов. Установлено, что кольца не только влияют на форму звездной системы и на анизотропию внутреннего давления, но могут пролить новый свет и на загадку существования критического сжатия E7. Построена фазовая модель бесстолкновительного звездного цилиндра, внедренного во вращающееся гало из темной материи. В приливном приближении в аналитическом виде найден гравитационный потенциал однородного тора с эллиптическим сечением рукава. Модель представляет большой интерес для исследования многих объектов в Космосе. Поставлена и решена задача о разложении пространственного потенциала однородного гравитирующего (или заряженного статическим электрическим зарядом) эллиптического диска в ряд по степеням эксцентриситета с точностью до второй степени включительно. Найденное выражение представляет потенциал во всем пространстве, включая и внутреннюю область диска. Ценным источником позиционных данных о движении главных спутников больших планет являются фотометрические наблюдений взаимных покрытий и затмений спутников. Для выполнения фотометрии спутников во время этих редких явлений организуются всемирные кампании наблюдений. Обработка получаемой фотометрии, то есть вычисление взаимных координат спутников делается в последнее время только в отделе небесной механики ГАИШ. В 2016 году выполнена очередная такая обработка. Получено более 600 разностей координат Галилеевых спутников Юпитера. Ценность получаемых результатов заключается в более высокой точности по сравнению с обычными астрометрическими наблюдениями. Подученные данные будут использованы для уточнения модели движения и эфемерид спутников. Редкими явлениями являются попадания близких спутников Юпитера в тень от Галилеевых спутников. В прошлом наблюдалось только одно такое явление. В 2015 году французскими наблюдателями удалось выполнить наблюдения еще четырех таких явлений. Обработка данных и получение уникальных астрометрических данных о спутника было выполнено в отделе небесной механики ГАИШ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Работа по теме состояла в решении ряда отдельных задач по разным небесным объектам. Устойчивость движения планет при звездных сближениях. Активно-гравитирующими телами являются центральное и возмущающее тела. Для исследования движения пассивно-гравитирующего тела относительно центрального выбирается вращающаяся и пульсирующая система координат. Уравнения движения в этой системе координат записываются с использованием точного выражения силовой функции – аналога функции Якоби без разложения ее в ряд. Развита теория Л.Г. Лукьянова (доцента физфака МГУ) о существовании интегрального инвариантного соотношения (квазиинтеграла) в ограниченных эллиптических, параболических и гиперболических задачах трех тел. Существование аналога интеграла Якоби в ограниченной эллиптической, параболической и гиперболической задачах трех тел отрицалось. Однако, в своей работе Л.Г. Лукьянов доказал, что такой аналог – квазиинтеграл – существует. С помощью квазиинтеграла доказано существование поверхностей минимальной энергии - обобщения поверхностей нулевой скорости и определены области возможности движения пассивно-гравитирующего тела. Найдены поверхности минимальной энергии, являющиеся обобщением поверхностей нулевой скорости, определены особые точки, установлены их тип и устойчивость в смысле Ляпунова. Установлено необходимое условие – выполнение критерия неустойчивости по Хиллу для обмена спутником в ограниченной эллиптической задаче трех тел. Для иллюстрации полученных результатов, в качестве примера рассмотрены ограниченные гиперболическая, параболическая и эллиптическая задачи трех тел: Солнце - планета-пробная звезда. При этом гелиоцентрическое расстояние пробной звезды и ее масса колеблются в пределах от 50 до 100 а.е. и от одной до пяти солнечных масс соответственно. Согласно критериям устойчивости по Хиллу 1-го и 2-го типов, установлены критические значения параметров орбиты пробной звезды, при которых планеты Солнечной системы либо становятся спутниками пробной звезды, либо покидают пределы Солнечной системы. Полученные результаты могут быть использованы: а) при исследовании траектории космического аппарата от планеты (Земли) к ее спутнику (Луне) или к другой планете, а также при изучении возможного осуществления временного захвата космического аппарата Луной, или астероида планетой, б) при исследовании эволюции тройных и тесных двойных звездных систем на больших временных интервалах, в) учитывая переменность масс звезд, в том числе Солнца, можно рассматривать и ограниченную задачу трех тел с переменной массой. В рамках этой задачи, можно оценить влияния звездных сближений с центральным телом (например, Солнцем) на орбиты пассивно-гравитирующего тела (планеты) и установления устойчивости (или неустойчивости) по Хиллу движения планет. Движение пассивно-гравитирующего тела в гравитационно поле неоднородной эллиптической галактики. В данных моделях светящаяся часть галактики считается неоднородным эллипсоидом с "астрофизическим законом" распределения плотности, который хорошо согласуется с современными представлениями о строении ЭГ. Пространство между границами светящейся части ЭГ и ее гало представляет собой неоднородный сферический (Модель 1) или эллипсоидальный (Модель 2) слой, заполненные темной материей и обладающие сферической (эллипсоидальной) структурой. При этом эти слои считаются концентрическими, центры которых совпадают с центром ЭГ. Под ПГТ подразумевается звезда или центр масс шарового скопления (ШС). Задача состоит в построении модели неоднородной эллиптической галактики со сферическим (Модель 1) и эллипсоидальным (Модель 2) распределением плотности, хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении ЭГ и определении динамики пространственного движения ПГТ в поле притяжения такой галактики. В движении ПГТ учитываются: притяжение светящейся части ЭГ и возмущения, вызываемые притяжением неоднородного сферического или эллипсо-

идального слоя. Вместо приближенных выражений потенциалов светящейся части ЭГ и сферического слоя (или гомеоида) используются их точные выражения и записываются уравнения движения ПГТ в выбранной системе координат. Построены две модели неоднородной эллиптической галактики со сферическим (Модель 1) и эллипсоидальным (Модель 2) распределением плотности, хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении ЭГ и определена динамика пространственного движения ПГТ в поле притяжения такой галактики. Аналитическое представление эфемерид больших планет. Получено новое разложение оскулирующих элементов орбит 4-х планет-гигантов (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) в компактные тригонометрические ряды, где амплитуды и аргументы членов рядов являются полиномами высокой степени от времени. Разложение аппроксимирует численные эфемериды планет DE431 (Folkner 2014) на всем интервале ее действия в 30000 лет: 13000 до н.э. – 17000 н.э. Суммарное количество членов разложения для всех элементов орбит одной планеты составляет 6-8 тысяч, что примерно на порядок меньше, чем число членов в современных аналитических теориях движения больших планет VSOP2013 и TOP2013 (Simon et al. 2013). При этом новые ряды являются единственным аналитическим разложением, представляющим элементы орбит больших планет с высокой точностью на интервале времени в несколько десятков тысяч лет. В частности, на интервале 10000 до н.э. – 14000 н.э. максимальное отличие между значениями средней долготы планеты в орбите, вычисляемыми с помощью новых аналитических рядов, от аналогичных значений, получаемых из исходных численных эфемерид, составило: 0."08 для Юпитера, 0."22 для Сатурна. 0."10 для Урана и 0."05 для Нептуна. Новые ряды дополняют подобные серии, полученные нами ранее для всех 4-х планет земной группы (Kudryavtsev 2016). Задачи, связанные с моделированием гравитационных потенциалов небесных тел. Построена фазовая модель галактики из вращающегося трехосного гало с вложенным внутри него цилиндрическим баром из звезд. Составлены и решены уравнения движения звезды внутри бара. Найдены три первых однозначных интеграла движения звезд и выполняется условие сохранения границы цилиндра. Установлено, что в шестимерном фазовом пространстве модель представляет четырехмерный эллипсоид. Фазовая функция распределения звезд включает в себя произведение двух дельта-функций Дирака, аргументами которых являются изолирующие интегралы движения. Поле скоростей центроидов описывает сдвиговые продольные усредненные течения в цилиндре. Две отличные от нуля компоненты дисперсии скоростей звезд имеют квадратичную зависимость от координат и обращаются в нуль на поверхности цилиндрического бара. Поставлена и решена задача о приливном потенциале однородного гравитирующего тора с эллиптическим сечением рукава. Потенциал получен в конечном аналитическом виде и может как гравитационная модель Пояса Койпера. Впервые разработан скрытый (латентный) механизм выравнивания уровнях поверхностей внутри каменно-ледяных небесных тел. Появляющиеся при действии этого механизма малые отклонения от локального равновесия создают деформацию ядра и оболочки. Для тел с быстрым вращением это приводит к удлинению ядра, и при достижении некоторого предела лед не выдерживает напряжений, трескается и накапливается на острых концах быстро вращающейся планеты или астероида. Скапливающиеся массы льда отделяются от центрального тела, что приводит к образованию спутников. Предложенный механизм является альтернативой обычной теории импактного происхождения спутников у карликовой планеты Хаумеа. Он предсказывает, что спутники в своем движении не должны сильно отклоняться от плоскости экватора Хаумеа, и это согласуется с наблюдениями. Для обоснования данного механизма применяется теория неоднородных гравитирующих фигур равновесия. Показано, что при малых отклонениях от локального равновесия внутри тела (причиной которых является отклонение формы уровнях 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 некоторого предела, лед не выдерживает напряжений, трескается и начинает накапливаться на острых концах быстро вращающейся планеты или астероида. Затем избыточные массы льда отделяются от центрального тела, что и приводит к образованию спутников. Изучен класс фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости внутри гравитирующего кольца или тора. Показано, что эти фигуры образуют семейство последовательностей обобщенных сжатых сфероидов, где любому значению приливного параметра α соответствует последовательность сфероидов в с некоторым предельным сжатием. При отсутствии приливного возмущения получается серия классических – от шара до плоского диска – сфероидов Маклорена. Установлено, что при максимально возможном приливном параметре последовательность фигур равновесия вырождается в единственный сфероид, который не вращается и имеет сжатие, соответствующее предельному сжатию эллиптических галактик E7. По современным представлениям, многие галактики погружены в массивные внешние гало из темной материи, влияние которых на динамику галактик может быть существенным. Мы обращаем внимание на известные из наблюдений сплюснутые E-галактики с очень малым вращением, форма которых заведомо (из-за неустойчивости) не может поддерживаться одной только анизотропией дисперсии скоростей звезд. Установлено, что внешние кольца и гало не только влияют на форму звездной системы и на анизотропию внутреннего давления, но могут пролить новый свет и на загадку существования критического сжатия галактик E7. Поставлена и новым методом решена задача о разложении пространственного потенциала однородного гравитирующего (или заряженного статическим электрическим зарядом) эллиптического диска в ряд по степеням эксцентриситета с точностью до эксцентриситета во второй степени включительно. Метод заключается в наложении на круговой диск возмущающего слоя, он позволяет намного упростить математические трудности, которые встречаются при прямом разложении потенциала тела. Первый член ряда при эксцентриситете в нулевой степени совпадает с потенциалом однородного круглого диска, причем коэффициент при эксцентриситете в первой степени оказывается равен нулю. Основной член в разложении потенциала при эксцентриситете во второй степени получен в аналитическом конечном виде. Отдельно найден потенциал возмущающего слоя. Найденное выражение представляет потенциал эллиптического диска во всем пространстве, включая внутреннюю область диска. Работа по получения новых астрометрических данных о движении спутников планет на основе наблюдений их взаимных покрытий и затмений. В прошлые годы в отделе небесной механики ГАИШ был разработан и применялся метод обработки фотометрических наблюдений главных спутников больших планет во время их взаимных покрытий и затмений с целью получения новых астрометрических данных. В мире существовало всего пять реализаций такого метода с различной степенью точности и детализации. Оригинальный и наиболее точный метод такой астрометрической обработки наблюдений был разработан ранее исполнителями проекта, неоднократно применялся в рамках всемирных кампаний наблюдений, организованных парижским институтом небесной механики и вычисления эфемерид (IMCCE). Эта работа исполнителей проекта всегда велась и ведется при сотрудничестве с IMCCE. В отчетном году по теме указанным методом были обработаны более 600 кривых яркости Галилеевых спутников Юпитера, полученных на 72 обсерваториях мира во время всемирной кампании наблюдений 2014-2015 годов. Получены 607 разностей координат спутников. По сложившемуся порядку действий руководители всемирной кампании наблюдений (IMCCE) совместно с исполнителями данного проекта готовят научную статью в международном журнале *Astronomy and Astrophysics*. В список соавторов статьи включаются все наблюдатели, предоставившие свои наблюдения во всемирную кампанию. В статье дается описание всех наблюдений, методов обработки и фрагменты таблиц астрометрических результатов. Полные таблицы публикуются в элек-

тронном виде с доступом к ним через интернет на сайте журнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге работы получены новые обобщения свойств устойчивости в задаче трех тел и новые инвариантные соотношения (квазиинтегралы) между координатами и компонентами скорости. Эти результаты являются также средством для дальнейших исследований эволюции комплексов реальных небесных тел. В рамках построенных моделей найден аналог интеграла Якоби, определена область возможности движения ПГТ и построены поверхности нулевой скорости. Установлена устойчивость в смысле Ляпунова найденных стационарных решений - точек либрации. Полученные результаты применены к реально существующим эллиптическим галактикам, содержащим большое количество ШС. Построенные аналитические ряды, представляющие движение больших планет, являются новым эффективным средством и найдут применение в исследованиях динамики Солнечной системы. Теория потенциала является весьма продуктивным методом изучения образования и эволюции небесных тел. Применение теории потенциала позволяет по-новому ставить и решать задачи. Так, например, удалось пролить новый свет и на загадку существования критического сжатия галактик E7. Построена новая модель образования спутников астероидов. Отдел небесной механики ГАИШ является единственным научным центром в мире, где обрабатываются результаты всемирной кампании фотометрических наблюдений главных спутников планет во время их взаимных покрытий и затмений. Получаются ценные высокоточные астрометрические данные, которые используются в мире для уточнения параметров орбит и эфемерид спутников. В отчетном году по теме была выполнена обработка наблюдений кампании 2015 года. Кроме того была выполнена обработка уникальных фотометрических наблюдений близких спутников Юпитера во время их затмений Галилеевыми спутниками. Получены высокоточные данные о движении этих спутников. По теме в 2016 опубликованы 17 статей в научных журналах, из них 6 статей в высокорейтинговых журналах. Сделаны 5 докладов на научных конференциях.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2016 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 госзадачей МГУ, часть 2 (р. 01 10)	5 603 000,0	5 603 000,0