

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
АААА-А20-120012990074-1

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК

521.182 Численное интегрирование орбит

521.3 Определение и улучшение орбит

521.16 Теория приливного взаимодействия и других диссипативных сил

521.835 Взаимные явления покрытий и затмений спутников

521 Теоретическая астрономия. Небесная механика. Фундаментальная астрономия. Теория динамической и позиционной астрономии

521.14 Теория фигур, поля тяготения и вращение протяженных тел

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Небесная механика и динамика космических объектов
по теме:

Небесная механика и динамика небесных тел из наблюдений
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Емельянов Н.В.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

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

_____ (Емельянов Н.В.)

Исполнители темы:

ведущий специалист
старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Варфоломеев М.И.)

_____ (Гасанов С.А.)

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Ершков С.В.)

ведущий специалист

_____ (Киреева Е.Н.)

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

_____ (Кондратьев Б.П.)

ведущий специалист

_____ (Корноухов В.С.)

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

_____ (Кудрявцев С.М.)

_____ (Чепурова В.М.)

доцент, 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

Три новые модели слоисто-неоднородных эллиптических галактик. Движение звезд в слоисто-неоднородных эллиптических галактиках.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики созданы три новые модели эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении таких галактик. Согласно этим моделям ЭГ вместе с гало представляет собой двухслойный слоисто-неоднородный вытянутый сфероид, состоящий из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ). В качестве модели трехосной ЭГ выбран именно вытянутый сфероид потому, что его динамические свойства весьма близки к свойствам трехосного эллипсоида. На основе этих моделей определяются ключевые динамические параметры такой галактики и рассматривается задача о пространственном движении пассивно-гравитирующего тела (ПГТ) в гравитационном поле слоисто-неоднородной ЭГ. В качестве ПГТ берется звезда или центр масс шарового скопления. Исполнитель: Гасанов С.А.

Динамика спутников больших и малых планет.

Работа велась по обновлению базы данных наблюдений спутников и обновлению сервера эфемерид. Появилось много новых наблюдений далеких спутников больших планет. Приходится заново строить модели движения спутников. Новые модели почти всех далеких спутников построены заново. Модели включены в сервер эфемерид, доступный любому пользователю через интернет.

Недавно открыты два новых спутника астероидов (31) Euphrosyne и (41) Daphne. Определены орбиты этих спутников на основе наблюдений. Использовалась созданная ранее программа уточнения параметров орбит. Полученные параметры хорошо согласуются с результатами других авторов. Модели движения этих двух спутников включены в сервер эфемерид спутников астероидов, доступный любому пользователю через интернет. Исполнители: Емельянов Н.В., Варфоломеев М.И.

Движение малого спутника вблизи планеты в эллиптической ограниченной задаче 3-тел.

Применен новый подход к исследованию устойчивости движения спутника в Солнечной системе вблизи планеты. Для координаты z показан квазипериодический характер осцилляций в окрестности плоскости взаимного обращения планет. Сделан вывод что орбита спутника неустойчива. Исполнитель: Ершков С.В.

О влиянии на движение спутников дифференциального вращения большой планеты (Уран) в конвективной зоне.

Дифференциальное вращение необходимо учитывать в приливных эффектах для планет с преимущественно жидкой фазой (для корректного рас-

чета орбит спутников этих планет). Исполнитель: Ершков С.В.

Об устойчивости резонанса Лапласа для Галилеевых спутников (Европа, Гинимед).

Обмен угловым моментом между спутниками планеты важно учитывать при изучении устойчивости известных резонансных соотношений в Солнечной системе, и не только. Исполнитель: Ершков С.В.

Новые аналитические модели изучения вековой эволюции орбит планет и спутников в небесной механике.

Для исследования вековой эволюции орбит в Солнечной системе и экзопланетных систем развиты новые аналитические методы в небесной механике. Первый метод опирается на взаимную гравитационную энергию орбит в виде эллиптических колец Гаусса. Выражение для взаимной энергии колец получено в конечном аналитическом виде с точностью до членов четвертого порядка малости. На основе функции взаимной потенциальной энергии колец получены уравнения для изучения долгопериодических и вековых возмущений слабо эллиптических колец Гаусса с малым углом взаимного наклона. Адекватность метода проверена на двупланетной задаче. Опубликовано в журнале *Astronomy Reports*.

Разработана аналитическая модель R-тороида, представляющая 3D обобщение прецессирующего кольца Гаусса. Изучена форма, структура и гравитационный потенциал R-тороида. Найдена взаимная энергия R-тороида и внешнего кольца Гаусса и получена замкнутая система уравнений вековой эволюции оскулирующих орбит в гравитационном поле R-тороида и центральной прецессирующей звезды. С помощью комбинации из трех R-тороидов изучена апсидальная и нодальная прецессия орбит в циркумбинарных экзосистемах Kepler - 413 и Kepler - 453. Описан эффект влияния экзопланеты на нарушение резонанса для периодов нодальной прецессии двойной звезды. Опубликовано две статьи в журнале *Astronomy Reports*.

Разработан алгоритм нахождения коэффициентов зональных сферических гармоник для азимутально усредненного гравитационного потенциала быстро вращающегося слоисто-неоднородного трехосного эллипсоида. Рассмотрены две модели: (i) эллипсоид из дискретных слоев конечной толщины, включая двухкомпонентную модель ядро-оболочка; (ii) неоднородный эллипсоид, состоящий из бесконечно тонких слоев равной плотности с произвольными эллиптическими профилями от центра к периферии. Получены уравнения для расчета коэффициентов зональных сферических гармоник любой степени. Изучена нодальная прецессия кольца у карликовой планеты Хаумеа. Опубликовано в журнале *Astrophysics and Space Science*.

Решена задача о разложении потенциала почти кругового эллиптического кольца Гаусса в ряд по степеням эксцентриситета. Потенциал кольца представлен степенным рядом до членов включительно на всем множестве точек главной плоскости кольца. Получены два комплекта коэффициентов для степенных рядов потенциала внутри и вне кольца, которые выражаются через полные эллиптические интегралы первого и второго рода. Алгоритм применяется для построения эквипотенциалей колец Гаусса, моделирующих орбиты всех планет Солнечной системы. Опубликовано в журнале *Solar System Research*.

Исполнители: Кондратьев Б.П. Корноухов В.С.

Модели приливных деформаций на Солнце.

Впервые точно определены все основные долгопериодические члены

разложения приливообразующего потенциала Солнца в гармонические ряды. Частоты членов разложения есть линейные комбинации орбитальных частот больших планет. Итоговые ряды разложения данного потенциала на условной поверхности Солнца включают в себя 104 члена 2-го порядка (относительно малого параметра, равного отношению условного радиуса Солнца к расстоянию до притягивающей планеты), 17 членов 3-го порядка и 4 члена 4-го порядка. При этом минимальная амплитуда членов разложения составляет $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Сопоставление периодов/амплитуд полученных членов разложения приливообразующего потенциала и соответствующих им приливных ускорений и смещений частиц Солнца с наблюдаемыми периодическими эффектами на его поверхности может помочь в проверке гипотез о возможной приливной природе этих эффектов. Исполнитель: Кудрявцев С.М.

ВВЕДЕНИЕ

Три новые модели слоисто-неоднородных эллиптических галактик. Движение звезд в слоисто-неоднородных эллиптических галактиках.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики созданы три новые модели эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении таких галактик. Согласно этим моделям ЭГ представляет собой двухслойный неоднородный вытянутый сфероид, состоящий из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ). В качестве модели трехосной ЭГ выбран именно такой сфероид потому, что его динамические свойства весьма близки к свойствам трехосного эллипсоида. Как закон распределения плотности - профиль БМ берется так называемый «астрофизический закон», а для ТМ - аналоги известных профилей. Такие галактики считаются слоисто-неоднородными (СНЭГ). На основе этих моделей определены ее полная гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, ее дисперсия скоростей на расстоянии эффективного радиуса галактики. Предложен новый способ определения средних значений радиус-шкалы ЭГ, плотности в ее центре, а также среднего значения ключевого параметра плотности и его значения, соответствующего эффективному радиусу галактики. Рассмотрена также задача о пространственном движении пассивно-гравитирующего тела (ПГТ) в гравитационном поле СНЭГ. В качестве ПГТ берется звезда или центр масс шарового скопления, в движении которого учитываются притяжения БМ и ТМ. Для получения точных результатов, потенциалы притяжения БМ и ТМ не разлагаются в ряд, а берутся их точные выражения. 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 и приведены в виде рисунков и таблиц. Исполнитель: Гасанов С.А.

Динамика спутников больших и малых планет.

За последний год появилось много новых наблюдений далеких спутников больших планет. Приходится заново строить модели движения спутников. Эту работу можно делать с помощью созданных ранее средств - вычислительных программ. Недавно открыты два новых спутника астероидов (31) Euphrosyne и (41) Daphne. Необходимо определить их орбиты. Полученные модели движения необходимо включить в сервер эфемерид спутников астероидов. Исполнители: Емельянов Н.В., Варфоломеев М.И.

Движение малого спутника вблизи планеты в эллиптической ограниченной задаче 3-тел.

Представлен (в развитие темы) алгоритм расчета движения точечного спутника в рамках эллиптической ограниченной задачи 3-тел, ER3BP: два массивных тела M (Sun), m (planet) вращаются вокруг общего барицентра по кеплеровым траекториям; спутник m вращается по квази-эллиптической "захваченной" орбите вокруг, и на незначительном удалении от планеты m (planet) ($m \ll m$ (planet) $< M$ (Sun)). Ключевые особенности: детально описаны возможности аналитической части, до применения полу-аналитических допущений для численных решений: 1) приближение "захваченной" орбиты спутника вокруг планеты; 2) координата z предполагается малой, с осцилляциями в окрестности плоскости $[x, y, 0]$. Показано отличие от известного

случая “Clohessy-Wiltshire problem”. Задача относится к разделу небесной механики по устойчивости спутниковой динамики. Необычным приемом является применение метода дифференциальных связей, МДС при поиске решений уравнений ER3BP. Исполнитель: Ершков С.В.

О влиянии на движение спутников дифференциального вращения большой планеты (Уран) в конвективной зоне.

В работе идет речь о моделировании орбит естественных спутников планет с преимущественной жидкой фазой, при учете влияния дифференциального вращения на процесс приливных взаимодействий. Дифференциальное вращение означает отсутствие режима вращения твёрдого тела. Задача относится к разделу небесной механики по орбитальной спутниковой динамике в рамках задачи 2-тел в условиях резонанса 1:1 на временной шкале значительных масштабов. Подобный подход является новым и необходимым для расширения возможностей частотного способа задания Q-фактора (добротность, обратно пропорциональная количеству приливных потерь энергии в теле планеты). Исполнитель: Ершков С.В.

Об устойчивости резонанса Лапласа для Галилеевых спутников (Европа, Ганимед).

В работе анализируется устойчивость резонанса Лапласа для крупнейших спутников Юпитера (Ио, Европа, Ганимед), на основе предложенного ранее подхода. Под резонансом Лапласа имеется ввиду соотношение, связывающее средние орбитальные движения спутников, каждый из которых находится в резонансе 1:1 с Юпитером (Европа в квази-резонансе). Задача относится к разделу небесной механики по устойчивости спутниковой динамики в условиях резонансного захвата. Подход новый и необходим для анализа приливных взаимодействий при учете обмена угловым моментом между спутниками. Исполнитель: Ершков С.В.

Новые аналитические модели изучения вековой эволюции орбит планет и спутников в небесной механике.

За последние 20-25 лет заметно усовершенствовались методы поиска планет у других звезд и получено много ценной информации о новых планетных системах. В частности, были открыты планеты вокруг двойных звезд (циркумбинарные планеты). Обилие новой информации о составе и кинематике экзопланетных систем привлекло повышенное внимание исследователей к разработке и усовершенствованию методов теории возмущений в небесной механике.

Актуальным направлением в современной динамической астрономии является изучение происхождения и вековой эволюции колец непланетного типа, открытых недавно вокруг малых небесных тел, таких как карликовая планета Хаумеа и астероид-кентавр Chariklo. Перспективным для исследования происхождения и вековой эволюции данных колец является вывод уравнений с помощью функции взаимной потенциальной энергии колец Гаусса, причем учитывается также гравитация от центрального тела.

В современной динамической астрономии новые задачи требуют создания и новых методов исследования долгопериодических и вековых возмущений экзопланетных систем. Акцент делается на создание специального аналитического подхода, который опирается не на классическую возмущающую функцию Лагранжа, а на взаимную гравитационную энергию орбит в виде эллиптических колец Гаусса. Развивая эти идеи, была предложена и тщательно изучена модель R-тороида, представляющая 3D обобщение пре-

цессирующего кольца Гаусса.

Исполнители: Кондратьев Б.П., Корноухов В.С.

Модели приливных деформаций на Солнце.

Влияние наблюдаемых нестационарных явлений на поверхности Солнца на климат Земли трудно переоценить. Известно, что многие из них носят квазипериодический характер, и из многолетних наблюдений примерно определяются основные циклы солнечной активности (например, знаменитый 11-летний цикл изменения числа Вольфа). Имеются гипотезы о природе возникновения, по крайней мере, части этих эффектов, как следствие гравитационного воздействия больших планет на Солнце. В ряде работ отмечаются приблизительные совпадения некоторых периодов солнечной активности с периодами, соответствующим определенным комбинациям орбитальных частот больших планет. В качестве возможного механизма воздействия больших планет на Солнце оценивался и эффект приливов. Были выполнены примерные оценки приливных ускорений частиц на поверхности Солнца от гравитационного воздействия больших планет, и первоначально был сделан вывод о малости и даже пренебрежимости таких ускорений. Однако, позднее, этот вывод был частично скорректирован, как следствие того факта, что воздействие пусть и малых ускорений, но на больших интервалах времени может приводить к относительно большим смещениям частиц. Но отметим, что эти выводы относились к оценке гравитационных ускорений и их периодов, создаваемыми отдельными единичными планетами (Меркурием, Юпитером,..). Однако, известно, что в разложении приливообразующего потенциала того или иного тела обычно имеется много членов, частоты которых являются линейными комбинациями основных частот движения двух и более притягивающих тел. Поэтому для точного решения задачи необходимо получить полное разложение приливообразующего потенциала Солнца под гравитационным воздействием больших планет, вычислить амплитуды и периоды всех основных членов разложения и, как следствие, соответствующие им приливные ускорения частиц поверхности Солнца и возможные амплитуды смещения этих частиц. Исполнитель: Кудрявцев В.М.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Три новые модели слоисто-неоднородных эллиптических галактик. Движение звезд в слоисто-неоднородных эллиптических галактиках.

В рамках работы по теме создавались несколько новых моделей для неоднородной эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении таких галактик. Созданные модели служат для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики. Согласно этим моделям ЭГ вместе с гало представляет собой двухслойный неоднородный вытянутый сфероид, состоящий из барионной массы (БМ) и темной материи (ТМ). В качестве модели неоднородной трехосной ЭГ выбран неоднородный вытянутый сфероид потому, что его динамические свойства весьма близки к свойствам трехосного эллипсоида. Для вытянутого сфероида, как и для трехосного эллипсоида, ось вращения не совпадает с видимой малой осью, а изофоты окажутся несоосными. Случай сжатого сфероида, для которого видимая ось совпадает с осью вращения и не нарушается соосность изофот, не рассматривается.

Галактики, рассмотренные в этих моделях, считаются слоисто-неоднородными. Внешний и внутренний слой такой галактики считаются концентрическими, центры которых совпадают с центром ЭГ. Светящаяся часть эллиптической галактики (СЧ ЭГ) считается внутренним слоем и представляет собой неоднородный вытянутый сфероид. В СЧ ЭГ преобладает барионная масса (БМ) с "астрофизическим законом" распределения плотности. Внешняя часть представляет собой неоднородный сфероидальный слой, состоящий из ТМ. Внутренняя граница этого слоя совпадает с внешней СЧ ЭГ, а внешняя - с границей гало галактики.

Для ТМ берется один из аналогов известных профилей: модели Дэнена (1993), NFW (1996), Хернквиста (1990) и Джаффа (1983). Эти модели могут быть объединены в один универсальный профиль, приведенный в книге Бинни, Тремайна, опубликованной в 2008. Однако эти профили применимы исключительно к сферическим галактикам. Для применения вышеперечисленных моделей к ЭГ они нами усовершенствованы и названы аналогами соответствующих профилей.

Согласно Модели 1 гало галактики ограничено сферой радиуса, равного радиус-шкале ЭГ, а согласно Модели 2 - оно ограничено сфероидальной поверхностью с большой полуосью, равной радиус-шкале галактики. Считается, что сферический и сфероидальные слои в основном состоят из темной материи (ТМ). В зависимости от наличия ТМ во внутренних (центральных) областях ЭГ, в моделях 1 и 2 рассматриваются два варианта. Вариант а) - основная часть ТМ находится вне СЧ ЭГ и вариант б) - содержание темной материи во внутренних областях ЭГ сравнимо с содержанием БМ. В качестве закона распределения (профиля) ТМ берутся аналоги известных профилей. При этом в моделях 1 и 2 определяются условия сшивки потенциалов на границе раздела СЧ ЭГ и сферического (сфероидального) слоя.

Согласно Модели 3, ЭГ вместе с гало (вариант 1) или без него (вариант 2) представляет собой слоисто-неоднородный вытянутый эллипсоид, состоящий из БМ и ТМ. В Модели 3 не существует границы раздела между СЧ ЭГ и сфероидального слоя, поэтому выполнение условий сшивки потенциалов не рассматривается.

Для решения задач небесной механики вычислены согласно моделям 1, 2

и 3 потенциалы притяжения ЭГ и выведены уравнения движения пассивно-гравитирующего тела (ПГТ). Под ПГТ подразумевается отдельная звезда или центр тяжести шарового скопления. Определены точки либрации, установлены их устойчивость в смысле Ляпунова, найдены возможные первые интегралы - аналоги интеграла Якоби, определены области возможности движения ПГТ и построены поверхности нулевой скорости. Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциалы в этих моделях не разлагаются в ряд по степеням малых параметров, а берутся целиком. Работа принята к печати в *Астрономическом журнале* за 2021 г.

В рамках астрофизической задачи, на основе этих моделей определены ключевые параметры ЭГ: полная гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, дисперсия скоростей на расстоянии эффективного радиуса. Предложен новый способ определения средних значений радиус-шкалы ЭГ, плотности в ее центре, а также среднего значения ключевого параметра плотности и его значения, соответствующего эффективному радиусу галактики. Сравнение полученных значений данных параметров почти согласуется со значениями, полученными другими авторами. Работа опубликована в *Астрономическом журнале* в 2021 г.

Условные границы ЭГ определяются согласно известным формулам, из каталога Вокулера. Полученные результаты применены к реально существующим ЭГ и приведены в виде рисунков и таблиц. Исполнитель: Гасанов С.А.

Динамика спутников больших и малых планет.

Работа велась по обновлению базы данных наблюдений спутников и обновлению сервера эфемерид. Появилось много новых наблюдений далеких спутников больших планет. Приходится заново строить модели движения спутников. Новые модели почти всех далеких спутников построены заново. Модели включены в сервер эфемерид, доступный любому пользователю через интернет.

Недавно открыты два новых спутника астероидов (31) *Euphrosyne* и (41) *Daphne*. Определены орбиты этих спутников на основе наблюдений. Использовалась созданная ранее программа уточнения параметров орбит. Полученные параметры хорошо согласуются с результатами других авторов. Модели движения этих двух спутников включены в сервер эфемерид спутников астероидов, доступный любому пользователю через интернет. Исполнители: Емельянов Н.В., Варфоломеев М.И.

Движение малого спутника вблизи планеты в эллиптической ограниченной задаче 3-тел.

За основу постановки задачи взяты уравнения ER3BP. Рассмотрена синодическая система координат (с началом в барицентре системы), с последующим переходом в пульсирующую с новым масштабированием координат и истинной аномалией f . В уравнениях переменными являются 3 координаты спутника. Постоянными задачи являются масса спутника, планет, гравитационная постоянная, эксцентриситет, большая полуось $[e, a]$ эллиптической орбиты планет. Получены полуаналитические решения при выбранных начальных значениях. Сделан вывод о вынужденном характере колебаний координаты u и о реализуемости квазипериодического характера ос-

цилляций z в окрестности фиксированной плоскости $[x, y, 0]$. Установление данного факта есть основной результат работы, что и планировалось. Исполнитель: Ершков С.В.

О влиянии на движение спутников дифференциального вращения большой планеты (Уран) в конвективной зоне.

За основу взяты уравнения орбитальной эволюции спутника в условиях резонанса 1:1 и приливных взаимодействий (с поправкой на дифференциальное вращение), в комбинации. Они учитывают реологические зависимости с учетом измененного гравитационного поля планеты. Переменные: эксцентриситет, большая полуось. Постоянные величины: масса спутника, планеты, их радиус, число Лава k_2 , степенная функция от приливной частоты, равной двойной по модулю разнице между угловой скоростью вращения планеты и средним движением спутника, скорость углового вращения планеты на экваторе, гравитационная постоянная G , постоянная масштабирования времени E . Результаты моделирования соотношений числа Лава k_2 и фактора добротности на основании данных астрометрических наблюдений подтверждают правильность выбора твердотельной модели в случае Урана и его основных спутников (Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон, Миранда), что и планировалось. Приливные воздействия сильнее в спутниках (чем в планете), за исключением Ариэля. Исполнитель: Ершков С.В.

Об устойчивости резонанса Лапласа для Галилеевых спутников (Европа, Гинимед).

Показано что луны Юпитера обмениваются угловым моментом (через либрации, при изменении угловой скорости осевого вращения спутников). Рассмотрено соотношение, связывающее эксцентриситет, массы спутника и планеты, энергию орбитального движения и полный угловой момент. Поскольку эксцентриситет орбиты спутника постоянен, а энергия орбитального движения уменьшается из-за приливных взаимодействий, полный угловой момент должен увеличиваться за счет обмена угловым моментом с другими спутниками. В Ио угловой момент "подкачивается" только с Европы (приливные потери в Ганимеде малы). В Европе есть жидкая фаза и естественный механизм осаждения поступающего углового момента на границах смены фаз. На Ио приливные потери квазипериодичны. Но в спутнике они важнее для орбитальной динамики чем в планете. В качестве инварианта для анализа, предложена прямая связь эксцентриситета и большой полуоси орбиты спутника, выведенная ранее. Переменные: эксцентриситет, большая полуось. Постоянные: масса спутника, планеты, их радиус, число Лава k_2 , Q -фактор; гравитационная постоянная G . Основной результат: приливные взаимодействия допускают обмен угловым моментом между спутниками посредством резонанса, что и планировалось. Исполнитель: Ершков С.В.

Новые аналитические модели изучения вековой эволюции орбит планет и спутников в небесной механике.

Для решения указанных задач и изучения долгопериодических и вековых возмущений был развит новый аналитический подход. Он опирается не на классическую возмущающую функцию Лагранжа, а на взаимную гравитационную энергию орбит в виде эллиптических колец Гаусса. Была решена

сложная математическая задача и найдена взаимная потенциальная энергия двух эллиптических гравитирующих колец Гаусса, линии апсид у которых в общем случае могут не совпадать. Указанное выражение для взаимной энергии колец было получено в конечном аналитическом виде с точностью до членов четвертого порядка малости. На основе указанной функции был развит новый метод изучения долгопериодических и вековых возмущений для двух гравитирующих слабо эллиптических колец Гаусса с малым углом взаимного наклона. Метод колец Гаусса был применен к двупланетной задаче Солнце-Юпитер-Сатурн. На этой задаче показано преимущество нового подхода: вместо традиционного усреднения полученной очень сложным образом возмущающей функции Лагранжа, эффективней сразу вычислять взаимную энергию колец Гаусса.

Прогресс в построении новых алгоритмов связан также с созданием аналитической модели R-тороида, представляющего 3D обобщение прецессирующего кольца Гаусса. Были детально изучены форма, структура и гравитационный потенциал R-тороида и, что особенно важно, найдено выражение его взаимной энергии с внешним кольцом Гаусса. Через указанную взаимную энергию были получены уравнения вековой эволюции оскулирующих орбит в гравитационном поле R-тороида и центральной прецессирующей звезды. Модель R-тороида применялась к изучению экзопланетных систем. С помощью комбинации из трех R-тороидов была изучена апсидальная и нодальная прецессия орбит в циркумбинарных экзосистемах Kepler - 413 и Kepler - 453. Здесь впервые был описан эффект влияния экзопланеты на нарушение резонанса для периодов нодальной прецессии двойной звезды.

Разработан новый алгоритм нахождения коэффициентов зональных сферических гармоник для азимутально усредненного гравитационного потенциала быстро вращающегося слоисто-неоднородного трехосного эллипсоида. Эта задача имеет общетеоретическое значение. Рассмотрены две модели: (i) эллипсоид из дискретных слоев конечной толщины, включая двухкомпонентную модель ядро-оболочка; (ii) неоднородный эллипсоид, состоящий из бесконечно тонких слоев равной плотности с произвольными эллиптическими профилями от центра к периферии. Дан удобный для практического применения метод нахождения азимутально усредненного внешнего потенциала вращающегося слоисто-неоднородного трехосного эллипсоида. В итоге, были получены уравнения расчета по единой схеме коэффициентов зональных сферических гармоник любой степени. Новый метод позволил изучить нодальную прецессию кольца у карликовой планеты Хаумеа.

Поставлена и решена задача о разложении потенциала почти кругового эллиптического кольца Гаусса в ряд по степеням эксцентриситета. Гравитационный потенциал кольца был представлен степенным рядом до членов включительно на всем множестве точек главной плоскости кольца. Получены два комплекта коэффициентов для степенных рядов потенциала внутри и вне кольца, которые выражаются через полные эллиптические интегралы первого и второго рода. Результаты расчетов применяются для построения эквипотенциалей для колец Гаусса, моделирующих орбиты всех восьми планет Солнечной системы.

Исполнители: Кондратьев Б.П., Корноухов В.С.

Модели приливных деформаций на Солнце.

Для разложения приливообразующего потенциала Солнца в гармониче-

ские ряды нами была применена оригинальная методика, ранее использованная, в частности, для разложения приливообразующего потенциала Земли и планет земной группы. Первоначально численные значения потенциала вычислялись с шагом 1 день на длительном интервале времени в 30 000 лет (13000 г. до н.э. – 17000 г. н.э.). В качестве притягивающих тел рассматривались 8 больших планет Солнечной системы и Луна. Для вычисления координат тел использовались численные эфемериды больших планет и Луны DE-441 (JPL/NASA). Далее выполнялся модифицированный спектральный анализ полученной таблицы значений потенциала. Отличительной особенностью использованной методики является возможность учитывать члены высоких порядков от времени в частотах параметров движения возмущающих тел. При этом результат разложения табулированной функции представляет собою гармонический ряд, где частоты членов ряда и их амплитуды есть, в общем случае, также нелинейные полиномы от времени. Это позволяет выполнять точное разложение функции на длительных интервалах времени и, как следствие, лучше разделять члены с близкими частотами. Отметим, что итоговое разложение является не только аппроксимацией исходной табулированной функции, а есть результат гармонического анализа этой функции. В итоговом разложении приливообразующего потенциала Солнца мы получаем не только все основные частоты/периоды, но и, в отличие от классического спектрального анализа, определяем источник возникновения той или иной вариации потенциала (как результат притяжения определенной планеты или группы планет).

В настоящей задаче нами рассматривались только долгопериодические вариации приливообразующего потенциала Солнца. Под таковыми мы понимаем вариации, частота которых не включает в себя частоту осевого вращения Солнца. Период вращения Солнца на экваторе составляет примерно 24,5 дней, и на подобном интервале получаемые приливные ускорения частиц на поверхности Солнца не приводят к сколь-либо существенным смещениям их координат. Таким образом, по сравнению с классическим разложением приливообразующего потенциала в нашем случае были опущены все члены, пропорциональные гелиографической долготе частицы, и оставлены только «широтные» члены. При этом все члены характеризуются порядком разложения, т.е. степенью n отношения условного радиуса Солнца к текущему гелиоцентрическому расстоянию притягивающей планеты ($n \geq 2$). В результате, нами были получены все долгопериодические члены разложения приливообразующего потенциала Солнца с амплитудой не менее $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Количество членов разложения: 104 для степени $n = 2$, 17 для степени $n = 3$ и 4 для степени $n = 4$. Не было обнаружено никаких членов разложения приливообразующего потенциала Солнца со степенью $n \geq 5$ и с амплитудой, превышающей заданную.

Максимальные значения амплитуды потенциала были выявлены для членов разложения 2-го порядка с периодом 0,24 года (1 орбитальный период Меркурия) и 11,86 лет (1 орбитальный период Юпитера), которые составили $0,018 \text{ м}^2/\text{с}^2$ и $0,009 \text{ м}^2/\text{с}^2$, соответственно. При этом было получено, что амплитуды некоторых «приливных» смещений частиц на поверхности Солнца могут достигать величин порядка сотен километров. Исполнитель: Кудрявцев С.М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Три новые модели слоисто-неоднородных эллиптических галактик. Движение звезд в слоисто-неоднородных эллиптических галактиках.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики созданы три новые модели эллиптической галактики (ЭГ), хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении таких галактик. Согласно этим моделям ЭГ вместе с гало рассматривается как двухслойный неоднородный эллипсоид вращения - вытянутый сфероид. В качестве модели неоднородной трехосной ЭГ выбран вытянутый сфероид потому, что его динамические свойства весьма близки к свойствам трехосного эллипсоида. Для такого сфероида, как и для трехосного эллипсоида, ось вращения не совпадает с видимой малой осью, а изофоты окажутся несоосными. Случай сжатого сфероида, для которого видимая ось совпадает с осью вращения и не нарушается соосность изофот, не рассматривается.

Для решения задач небесной механики вычислены согласно созданным моделям потенциалы притяжения ЭГ и выведены уравнения движения пассивно-гравитирующего тела (ПГТ). Под ПГТ подразумевается отдельная звезда или центр тяжести шарового скопления. Определены точки либрации, установлены их устойчивость в смысле Ляпунова, найдены возможные первые интегралы - аналоги интеграла Якоби, определены области возможности движения ПГТ и построены поверхности нулевой скорости. Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциалы в этих моделях не разлагаются в ряд по степеням малых параметров, а берутся целиком.

В рамках астрофизической задачи, на основе этих моделей определены ключевые параметры ЭГ: полная гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения, дисперсия скоростей на расстоянии эффективного радиуса. Предложен новый способ определения средних значений радиус-шкалы ЭГ, плотности в ее центре, а также среднего значения ключевого параметра плотности и его значения, соответствующего эффективному радиусу галактики. Сравнение полученных значений данных параметров почти согласуется со значениями, полученными другими авторами. Полученные результаты применены к реально существующим ЭГ и приведены в виде рисунков и таблиц. Исполнитель: Гасанов С. А.

Динамика спутников больших и малых планет.

Заново построены модели движения почти всех далеких спутников больших планет на основе значительно расширенной базы данных наблюдений. Модели включены в сервер эфемерид, доступный любому пользователю через интернет.

Недавно открыты два новых спутника астероидов (31) Euphrosyne и (41) Daphne. Определены орбиты этих спутников на основе наблюдений. Модели движения этих двух спутников включены в сервер эфемерид спутников астероидов, доступный любому пользователю через интернет.

Исполнители: Емельянов Н.В., Варфоломеев М.И.

Движение малого спутника вблизи планеты в эллиптической ограниченной задаче 3-тел.

Движение спутника в окрестности фиксированной плоскости $[x, y, 0]$ вблизи планеты не является устойчивой задачей Коши: спутник может быть выброшен за пределы "захваченной" орбиты. Нерешенной остается задача

о движении спутника возле барицентра системы. Исполнитель: Ершков С.В.

О влиянии на движение спутников дифференциального вращения большой планеты (Уран) в конвективной зоне.

Орбитальная динамика спутников может корректироваться с учетом дифференциального вращения в жидкотельных планетах. Нерешенной остается задача по приливным взаимодействиям в газообразных планетах. Исполнитель: Ершков С.В.

Об устойчивости резонанса Лапласа для Галилеевых спутников (Европа, Гинимед).

С учетом обмена угловым моментом для спутников Юпитера, устойчивость резонанса Лапласа сохраняется на временной шкале значительных масштабов с ошибкой 0.1%. Нерешенной остается задача об устойчивости других резонансов в Солнечной системе, например в системе Сатурна (2:4 Tethys-Mimas, 1:2 Dione-Enceladus, 3:4 Hyperion-Titan). Исполнитель: Ершков С.В.

Новые аналитические модели изучения вековой эволюции орбит планет и спутников в небесной механике.

Для исследования вековой эволюции орбит в Солнечной системе и экзопланетных систем были развиты новые аналитические методы в небесной механике. Первый метод опирается на взаимную гравитационную энергию орбит в виде эллиптических колец Гаусса. Выражение для взаимной энергии колец получено в виде ряда с точностью до членов четвертого порядка малости. С помощью этой функции взаимной потенциальной энергии колец были найдены уравнения, описывающие долгопериодические и вековые возмущения в системе из двух гравитирующих слабо сжатых колец Гаусса с малым углом взаимного наклона. Адекватность метода была проверена на примере двухпланетной задачи. Опубликовано в журнале *Astronomy Reports*.

Второй метод связан с разработкой аналитической модели R-тороида, который представляет 3D обобщение прецессирующего кольца Гаусса. Детально изучены форма, структура и гравитационный потенциал R-тороида. Найдено выражение взаимной энергии R-тороида и внешнего кольца Гаусса. С помощью взаимной энергии получена замкнутая система уравнения вековой эволюции оскулирующих орбит в гравитационном поле R-тороида и центральной прецессирующей звезды. С помощью комбинации из трех R-тороидов изучена апсидальная и нодальная прецессия орбит в циркумбинарных экзосистемах Kepler - 413 и Kepler - 453. Впервые описан эффект влияния экзопланеты на нарушение резонанса для периодов нодальной прецессии двойной звезды. Опубликовано две статьи в журнале *Astronomy Reports*.

Дополняя указанные методы, был разработан алгоритм нахождения коэффициентов зональных сферических гармоник для азимутально усредненного гравитационного потенциала быстро вращающегося слоисто-неоднородного трехосного эллипсоида. Рассмотрены две модели: (i) эллипсоид из дискретных слоев конечной толщины, включая двухкомпонентную модель ядро-оболочка; (ii) неоднородный эллипсоид, состоящий из бесконечно тонких слоев равной плотности с произвольными эллиптическими профилями от центра к периферии. Получены уравнения для расчета по единой схеме коэффициентов зональных сферических гармоник любой степени. Новый метод позволил изучить нодальную прецессию кольца у карликовой плане-

ты Хаумеа. Опубликовано в журнале *Astrophysics and Space Science*.

Поставлена и решена задача о разложении потенциала почти кругового эллиптического кольца Гаусса в ряд по степеням эксцентриситета. Гравитационный потенциал кольца был представлен степенным рядом до членов включительно на всем множестве точек главной плоскости кольца. Получены два комплекта коэффициентов для степенных рядов потенциала внутри и вне кольца, которые выражаются через полные эллиптические интегралы первого и второго рода. Алгоритм применяется для построения эквипотенциалей колец Гаусса для орбит всех восьми планет Солнечной системы. Опубликовано в журнале *Solar System Research*.

Исполнители: Кондратьев Б.П., Короноухов В.С.

Модели приливных деформаций на Солнце.

Впервые выполнено разложение долгопериодической части приливообразующего потенциала Солнца в точные гармонические ряды. Найдены все основные члены разложения с амплитудой, превышающей $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Показано, что амплитуды долгопериодических смещений частиц на поверхности Солнца, вызываемых приливами от больших планет, могут достигать величин порядка сотен км. Таким образом, приливные смещения частиц на поверхности Солнца не могут, в общем случае, рассматриваться как пренебрежимо малые, и приливное воздействие от больших планет может в принципе служить источником некоторых периодических процессов в солнечной активности. Знание этого механизма позволит прогнозировать такие процессы и их влияние на климат Земли с большей точностью. Исполнитель: Кудрявцев С.М.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2021 году
Таблица А.1

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