

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
115021270038

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК

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

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Небесная механика и динамика космических объектов
по теме:

Небесная механика и динамика небесных тел из наблюдений
(заключительный)

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.)

ведущий специалист, 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

_____ (Кудрявцев С.М.)

ведущий специалист, кандидат физико-математических наук

_____ (Чепурова В.М.)

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

_____ (Ширмин Г.И.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

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

Ключевые слова по-английски:

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

Небесная механика, будучи первой в истории наукой о космосе, в настоящее время стала современной областью науки, решающей самые насущные практические задачи человечества. Изучаемыми объектами являются небесные тела от мельчайших пылинок до галактик и скоплений галактик. Практическая небесная механика служит удовлетворению как нашего естественного любопытства к природе, в которой мы живем, так и улучшению качества жизни на Земле, включая защиту от опасных сил природы. Именно небесная механика служит решению вечной проблемы человечества – расширению среды обитания.

Работа по теме выполнялась по нескольким направлениям, отражающим пути решения задач. Главное – это построение моделей движения небесных тел на основе наблюдений.

Модели движения являются основным инструментом в приложениях. На этом пути приходится решать теоретические задачи и совершенствовать методы исследований.

Важной и весьма необходимой областью небесной механики является изучение гравитационных свойств систем небесных тел. Этот процесс приводит к необходимости развития теории потенциала и фигур равновесия. В итоге пятилетней работы построены новые модели гравитирующих систем протяженных тел, разработаны новые методы и существенно уточнены рабочие формулы. Это позволило ставить и решать новые задачи динамики небесных тел. Новый механизм выравнивания уровней поверхностей внутри каменно-ледяных небесных тел позволил объяснить происхождение спутников у карликовой планеты Хаумеа. Открытие нового класса фигур равновесия позволило сделать важный вывод о том, что часть комет в Солнечной системе могла принадлежать соседним звездам. Исходя из теории фигур равновесия, сделаны важные выводы о свойствах тел спутников больших планет и кольцах вокруг астероидов. В частности, объяснено образование и тонкие детали строения мощного ледяного хребта на Япете. На основе новой теории объяснено отклонение центра масс Луны восточнее по отношению к ее фигуре. Сделан вывод: Луна могла образоваться в непосредственной близости от Земли на расстоянии около 4 радиусов нашей планеты.

Все знают, что мы живем в нашей Галактике. Однако подобных галактик невообразимо много. Чтобы выяснить, что творится внутри галактик, в рамках работы по теме построены две новые модели неоднородной эллиптической галактики со сферическим и эллипсоидальным распределениями плотности. Эти модели хорошо согласуются с современными представлениями о строении эллиптических галактик. Полученные результаты применены к реально существующим шестидесяти галактикам.

Развит вириальный подход к изучению динамики эллиптических галактик. Модели используют большой пласт новой наблюдательной информации и позволяют рассчитывать глобальную анизотропию дисперсии скоростей.

Многие задачи об эволюции Солнечной системы могут решаться только аналитическими методами. Это чрезвычайно громоздкий математический аппарат, поэтому любое его усовершенствование весьма ценно. В рамках работы по проекту разработано специальное представление вековой части возмущающей функции взаимного притяжения планет или спутников. Представление имеет единую аналитическую форму для внешнего и внутреннего вариантов задачи.

Для изучения вековых возмущений развит подход, опирающийся на взаимную потенциальную энергию колец Гаусса. Метод применяется для изучения двупланетной задачи Солне-Юпитер-Сатурн.

Звезды в нашей Галактике могут сближаться. Это относится и к нашему Солнцу. Что случится с планетами после такого сближения? Устойчивость Солнечной системы при таком событии подверглась анализу. Проиграны несколько вариантов сценария, приводящих к различным исходам.

Весьма сложная теория об устойчивости движения планет и других тел постоянно нуждается в усовершенствовании. В рамках работы по теме достигнуто продвижение в этом направлении. Из других исследований выяснилось, что при определенных условиях свойства орбит спутников планет могут катастрофически изменяться.

Задача учета влияния диссипации энергии в приливных горбах планеты и спутника на динамику орбитального движения тоже подверглась изучению. Эта задача сложна теоретически. Получены новые результаты об эволюции орбит спутников в этой постановке задачи. Но главная проблема здесь в недостаточной точности имеющихся наблюдений. На этом пути выяснилось, что некоторые формулы, выведенные другими авторами, ошибочны. В рамках работы по теме формулы были уточнены.

Обнаружено неожиданное свойство возмущенных движений спутника при малых эксцентриситетах орбиты. Оказалось, что существуют орбиты, в которых тело постоянно остается в перицентре орбиты, а линия апсид вращается с периодом обращения спутника.

Работы в рамках темы по теории вращения спутников привели к обнаружению при определенных условиях резких изменений характера вращения, что кажется непривычным в плавном поведении тел Солнечной системы. Для астероидов также обнаружены необычные сценарии вращения, выходящие на хаотический режим вращения.

Одна из работ по теме – аналитическое разложение параметров орбит тел Солнечной системы служит оптимизации использования моделей движения планет.

Все перечисленные выше теоретические работы по теме служат главной цели – построению моделей движения небесных тел, соответствующих наблюдениям. Именно соответствие наблюдениям позволяет нам применять модели для решения практических задач. Уточнение моделей движения на основе наблюдений – главное направление исследований по теме. В этом деле за пять лет достигнуто многое.

Постоянно уточняются параметры орбит спутников с появлением новых наблюдений. Эти необходимые работы обеспечивают адекватность применяемых моделей самым современным и наиболее точным данным наблюдений.

ний.

Открываются новые объекты Солнечной системы – новые естественные спутники. Обязанностью работников по теме является незамедлительное определение орбит новых объектов на основе наблюдений. Это было сделано для 10 новых спутников Юпитера и 20 новых спутников Сатурна.

Исполнители работ по теме имеют большой опыт по созданию аналитических теорий движения спутников. Это опыт успешно применен – построена новая аналитическая теория движения спутника Нептуна Тритон. Именно аналитический подход дал этой теории преимущества по сравнению с разработанными в мире численными моделями.

Точность моделей движения небесных тел неизбежно зависит от точности наблюдений, что в свою очередь зависит от прогресса в технических средствах – оптике и электронике. Однако небесные механики стараются быть независимыми от этого процесса – находятся новые методы наблюдений имеющимися техническими средствами. Оказалось, что фотометрические наблюдения редких явлений, взаимных покрытий и затмений спутников планет, дают много новых позиционных данных с лучшей точностью, чем обычные астрометрические наблюдения. Здесь важны следующие обстоятельства. Во-первых, делаются именно фотометрические наблюдения, что сильно меняет подход к делу. Во-вторых, явления весьма редки, и приходится проводить международные кампании наблюдений. В третьих, получение астрометрических результатов из фотометрии спутников во время взаимных явлений – это весьма сложный процесс. Здесь замечательно то, что исполнители работ по теме имеют в этом деле оригинальные разработки и большой опыт. Результаты шести всемирных кампаний таких наблюдений за последние 15 лет обрабатывались только в отделе небесной механики ГАИШ. Итог – масса новых астрометрических данных, которые позволили получить качественно новые результаты. На основе таких данных французскими исследователями определены параметры вязко-упругих свойств Юпитера, Сатурна и их спутников.

Очень важный вид работ по теме – обеспечение доступа всех коллег в мире к результатам исследований. В этом направлении были усовершенствованы созданные ранее в отделе небесной механики ГАИШ базы данных и служба эфемерид тел Солнечной системы. В последние два года была создана новая уникальная в мире база данных всех астрометрических наблюдений спутников астероидов.

Среди работ по теме в области практической небесной механики – разработка алгоритма автономного прогнозирования движения КА систем GPS и ГЛОНАСС.

Широту тематики подчеркивают занятия по моделированию дезинтеграции кометы 1P/Halley. Показано, что орбиты фрагментов выброшенной массы ядра будут эллиптическими. Они будут оставаться в Солнечной системе.

В целом работы по теме характеризуются большой разносторонностью. Это обусловлено местом исполнителей в системе университетского образования.

ВВЕДЕНИЕ

Работа по теме велась по нескольким направлениям исследований.

Теория потенциала. Изучение гравитационных свойств систем небесных тел.

Цикл наших работ посвящен развитию теории потенциала и теории фигур равновесия небесных тел. Интерес к этим областям знания обусловлен их важным значением для всей астрономии, включая небесную механику, космогонию и астрофизику, в частности, необходимостью эффективного использования данных, полученных средствами наземной астрономии и космических аппаратов, посетивших разные уголки Солнечной системы. Большое внимание по итогам миссии «Кассини» привлек Япет – крупный спутник Сатурна. Особенности его строения и загадка образования на его поверхности мощного экваториального ледяного хребта высотой до 10 км требуют дальнейшего развития теории фигур равновесия.

В русле современной астрономии лежит изучение многочисленного класса астероидов из пояса Койпера и спутников планет, имеющих каменное ядро и ледяную оболочку. Типичным примером являются карликовая планета Хаумеа с периодом вращения 4 часа, имеющая два спутника и массивное кольцо. Для понимания происхождения и динамики Хаумеа надо знать её форму и строение. Однако до сих пор нет эффективных методов решения обратной задачи: как восстановить пространственную форму вращающегося объекта по его двумерной проекции на картинную плоскость и данным фотометрии.

Кольца обнаружены и у некоторых астероидов-кентавров. Большой интерес астрономов вызвало открытие в 2014 году колец у астероида Chariklo. Актуальность проблемы изучения колец вокруг малых небесных тел очевидна. Ученых интересует, например, как произошли эти кольца и в каком направлении они эволюционируют. В связи с этим подчеркнем, что до сих пор не решена важная для многих астрономических приложений задача о нахождении взаимной потенциальной энергии колец. Без её решения нельзя объяснить, например, влияние самогравитации колец на их строение и существование у колец резких границ. Для этого необходимо развивать теорию, опирающуюся на взаимную потенциальную энергию колец Гаусса. Кроме того, при изучении динамики тел в небесной механике и звездной астрономии важное значение будет иметь 2-мерное обобщение кольца Гаусса. Такая модель позволит объяснить загадку существования вторичных минимумов на кривых вращения галактик. Огромный интерес вызывают вопросы глобальной динамики Солнечной системы. С точки зрения теории фигур равновесия очень важно уточнить, какую форму может иметь облако Оорта, где каждая частица находится под влиянием притяжения Солнца, гравитационного поля Галактики и центробежных сил. Все это важно для изучения источника происхождения долгопериодических комет. Известно, что центр масс у Луны не совпадает с геометрическим центром её фигуры, причем линия, связывающая эти две точки, направлена не прямо на центр Земли, а отклоняется от него к юго-востоку. До сих пор этот важный факт не имеет объяснения. Изучение фигуры и внутреннего строения Луны – актуальная задача, назрела необходимость создания современной теории вращения Луны, что необходимо для выяснения причин её происхождения и вековой эволюции. Решение этих задач представляет едва ли не самую

актуальную задачу в современной астрономии.

За последние 10-15 лет появились новые методы наблюдений эллиптических галактик (большие наземные телескопы и спектрометры интегрального поля), что позволило получить много ценной информации об этих звездных системах. Обилие новой информации о строении E-галактик вновь привлекло внимание к построению динамических моделей этих звездных систем. Перспективным здесь является метод построения динамических моделей E-галактик с помощью вириального метода. Его преимущество в том, что он позволяет описывать строение каждой галактики с учетом новой наблюдательной информации для нахождения анизотропии дисперсии скоростей.

Движение пассивно гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики.

Рассматривалась задача "О движении пассивно-гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики". Это необходимо для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики. Необходимо создать новые модели для неоднородной эллиптической галактики и определить ее ключевые динамические параметры. Отсутствие значений таких динамических параметров затрудняет применение полученных результатов к реально существующим галактикам.

Нужно рассмотреть несколько моделей эллиптической галактики, согласно которым, она представляет собой неоднородное трехосное эллипсоидальное тело, либо неоднородный сфероид, состоящий из БМ и ТМ. В качестве закона распределения плотности (профиля) барионной массы берется так называемый «астрофизический закон», а для темной материи – аналоги известных профилей.

Аналитические модели движения небесных тел.

Обнаружено необычное свойство возмущенного движения материальной точки при малых эксцентриситетах орбиты. Выяснилось, что при малых эксцентриситетах такая модель возмущенной орбиты не соответствует свойствам движения тела. Существует круговое возмущенное движение, при котором средняя аномалия постоянна и равна нулю.

Возникла необходимость подробного исследования этого частного случая, который часто возникает на практике.

Оставалась нерешенной актуальная задача представления вековой части возмущающей функции взаимного притяжения планет (спутников). Нужно было разработать такую форму разложения, которая, в отличие от известных разложений, использует ее асимптотику при близких значениях больших полуосей орбит возмущаемого и возмущающего тел, а также имеет единую аналитическую форму для внешнего и внутреннего вариантов задачи.

Нужно решить проблему совместного влияния сжатия центральной планеты, притяжения ее наиболее массивных (или главных) спутников и Солнца на эволюцию орбиты спутника пренебрежимо малой массы. Нужно получить эволюционные уравнения в планетозекваториальных элементах спутниковой орбиты, рассмотреть интегрируемые случаи эволюционной задачи.

Необходимо исследовать устойчивость движения планет при звездных сближениях.

Эволюция орбит спутников планет.

Выполняется моделирование орбит естественных спутников твердотельных планет в Солнечной системе (с преимущественной твердой фазой) при

учете влияния фактора диссипации энергии в приливных горбах планеты и спутника на орбитальную динамику спутника. Данная задача решается в рамках задачи 2-тел в условиях совпадения периода вращения спутника и периода орбитального движения спутника (спин-орбитальный резонанс 1:1) на временной шкале значительных масштабов, но не превышающих времени существования Солнечной системы.

Актуальной задачей небесной механики является исследование устойчивости орбит спутников в Солнечной системе. Для прогресса в этой области необходимы новые подходы и новые решения.

Вращение тел Солнечной системы (естественные спутники планет).

Исследование динамики вращений спутников планет является весьма актуальной задачей. Это связано с возможным использованием спутников как мест посадки космических аппаратов, а также с тем, что из наблюдений вращения можно получить физические характеристики спутников, в частности, параметры вязкости.

Вращение тел Солнечной системы (астероиды).

Рассматривалась задача о вращении астероида под действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение. Речь идет об исследовании динамики вращения твердотельного астероида на основе уравнений Эйлера вращения твердого тела, с дополнительным учётом инфинитезимального YORP-эффекта (негравитационной природы). Астероид движется по эллиптической орбите, за пределами сферы Хилла. Дополнительные возмущающие факторы (приливные воздействия, столкновения с другими объектами, прохождение вблизи массивных небесных тел) - не учитываются. Рассматривается состояние почти постоянного углового момента астероида, с минимальной энергией вращения (после воздействия различных возмущающих факторов). При этом основное вращение астероида происходит вокруг оси с максимальным моментом инерции, с небольшими колебаниями вокруг остальных двух главных осей.

Данная задача относится к разделу небесной механики, изучающему динамику и устойчивость орбитального вращения малых небесных (твердотельных) тел при учете воздействия на этот процесс дополнительных вращающих моментов.

Движение малой массы в окрестности точек либрации.

В данной работе применяется новый подход, разработанный С. В. Ершковым и успешно примененный для решения различных задач механики в разных её областях: гидродинамика, динамика вращения твердого тела. Ключевыми особенностями подхода являются: 1) представление 3D уравнений ограниченной круговой задачи 3-х тел в окрестности точек либрации в форме, позволяющей применить авторский подход в синодической системе координат "Земля - Солнце" (нулевой угол наклона эклиптики); 2) существование точного аналитического решения, определяемого через решения пары уравнений Риккати (в случае ненулевого наклона орбиты планеты по отношению к эклиптике, участвующей в движении "планета - Солнце").

Речь идет о поиске решений при моделировании орбит движения малой массы в окрестности точек либрации в рамках CR3BP: рассматриваются квази-круговые орбиты на временной шкале длительного периода обращения планеты вокруг Солнца. В случае нулевого наклона орбиты планеты показано что данные орбиты являются круговыми. Данная задача относится к разделу небесной механики, изучающему устойчивость орбитальной спут-

никовой динамики в рамках круговой ограниченной задачи 3-х тел (CR3BP, Circular Restricted 3 Bodies Problem).

Построение новых моделей движения небесных тел на основе наблюдений.

Решалась задача построения моделей движения небесных тел на основе наблюдений. Именно в этом направлении работы добываются новые данные о Солнечной системе. Модели движения являются главным результатом исследований и содержат все наши знания о небесных телах. Модели движения являются также главным инструментом исследований, поскольку содержат все наши знания о небесных телах.

К началу отчетного периода по теме появились все предпосылки для построения новой модели движения главного спутника Нептуна Тритона. Накопилось много новых наблюдений. Оставались неиспользованными другими авторами некоторые наблюдения, выполненные в прошлом. Следовало бы использовать научный опыт исполнителей по построению аналитических теорий движения небесных тел. Это дало бы преимущества по сравнению с моделями, уже разработанными другими авторами.

Бразильскими коллегами в последнее время был предложен новый метод астрометрических наблюдений спутников планет, когда измеряемой величиной является момент видимых сближений спутников. Необходимо выяснить, насколько предлагаемый метод эффективен, и какой выигрыш в точности эфемерид он дает.

В последние годы были открыты новые далекие спутники больших планет: 10 новых спутников Юпитера и 20 новых спутников Сатурна. Появилась необходимость построить новые модели движения этих спутников на основе наблюдений. В то же время в отделе небесной механики уже накоплен опыт по решению таких задач. Нужно использовать все эти обстоятельства для успеха дела.

Получение астрометрических результатов из фотометрии спутников планет во время из взаимных покрытий и затмений.

Ценным источником позиционных данных о движении главных спутников больших планет являются фотометрические наблюдения взаимных покрытий и затмений спутников. Для выполнения фотометрии спутников во время этих редких явлений организуются всемирные кампании наблюдений. Обработка получаемой фотометрии делается в последние 15 лет только в отделе небесной механики ГАИШ. В 2014-2015 годах была проведена очередная международная кампания таких наблюдений. Требовалось выполнить обработку результатов. Ценность получаемых результатов заключается в более высокой точности по сравнению с обычными астрометрическими наблюдениями. Полученные 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. Требовалось провести обработку данных и получить уникальные астрометрические данные.

Создание и обновление баз данных наблюдений малых тел Солнечной системы.

Модели движения создаются на основе наблюдений. Наблюдения всегда

востребованы. Для этого в плане работы по теме создаются, постоянно пополняются и поддерживаются базы данных наблюдений. Эти базы данных, как результат работы по теме, размещаются в сети Интернет и доступны любому пользователю. Работа заключается в формировании стандартных порций данных, составлении описаний наблюдений, необходимых для их использования, и размещения данных на страницах интернета.

База данных естественных спутников планет была создана ранее в отделе небесной механики ГАИШ МГУ. Смысл этой базы данных состоит в ее постоянном обновлении. Эта большая работа постоянно ведется участниками настоящей темы госзадания. В публикациях постоянно появляются новые данные. Необходимо включать их в базу.

Для спутников астероидов ситуация была неудовлетворительной. В частности, не существовало базы данных всех опубликованных наблюдений спутников астероидов. Необходимо было ликвидировать этот пробел. По этим причинам нужно было создать новую базу данных всех астрометрических наблюдений спутников астероидов. Она должна иметь простую структуру и быть доступной через Интернет. Необходимо регулярное обновление данных по мере появления в публикациях новых результатов.

Разработка и обновление службы эфемерид тел Солнечной системы.

Эфемеридная служба естественных спутников планет MULTI-SAT, доступная через интернет, разработана ранее Н.В Емельяновым. Имеется необходимость постоянного совершенствования службы. Нужно добавлять новые модели движения небесных тел и новые функциональные возможности сервера.

Было бы весьма актуальным дополнить вычислительную программу возможностью вычисления эфемерид не только естественных спутников, но и всех больших планет от Меркурия до Плутона, а также Луны.

Появилась идея добавить в службу эфемерид MULTI-SAT планетные эфемериды, вычисляемые по старой теории, разработанной в начале XX-го века французским ученым Леверье. Это дало бы возможность проверять и использовать старые наблюдения и оценивать старые модели.

Аналитическое разложение параметров орбит тел Солнечной системы.

В практике исследований динамики тел Солнечной системы при решении большинства задач необходимо вычислять координаты больших планет, что востребовано в большом ряде практических задач прогнозирования движения планет и спутников и освоения космического пространства. Модели, которые построены методами численного интегрирования, имеют представление в виде разложений по полиномам Чебышева. В итоге, модели движения планет, которые в настоящее время разрабатываются на интервале времени 30 тысяч лет, представлены огромными файлами, содержащими коэффициенты разложений. Существовала необходимость создания компактного аналитического представления эфемерид планет, единого на всем интервале времени. Именно такую задачу по теме и была поставлена в отделе небесной механики ГАИШ.

В мае 2018 г. космическое агенство США NASA запустило миссию InSight к Марсу, и 26 ноября 2018 г. спускаемый аппарат достиг поверхности планеты. Одним из трех основных экспериментов, запланированных в миссии, является Rotation and Interior Structure Experiment (RISE), в котором высокоточными радиометодами измеряется мгновенное положение аппарата на поверхности планеты в инерциальной системе координат. Как следствие,

становится возможным определение движения коры Марса и его северного полюса. При этом текущее положение оси вращения есть «отклик» коры планеты на приливообразующий потенциал, создаваемый на поверхности Марса притяжением Солнца, другими большими планетами, а также спутниками Марса Фобосом и Деймосом. В настоящем исследовании поставлена задача построить новое разложение этого потенциала в тригонометрические ряды.

Эфемериды искусственных спутников Земли.

Сигналы современных навигационных спутников включают в себя так называемые «псевдодальности», т.е. измерения времени прохождения радиосигнала от космического аппарата (КА) до пользователя и «штатные» эфемериды КА, которые каждый спутник транслирует в своем навигационном сообщении. Эти данные далее используются для прогнозирования движения КА в приемнике («размножения» эфемерид) и последующего определения координат пользователя. Интервал прогнозирования движения КА на основе этих эфемерид с помощью стандартного алгоритма приемника составляет до 2-х часов для КА GPS и до 30 мин. для КА ГЛОНАСС. Из-за низкой пропускной способности используемых каналов связи, время приема псевдодальностей составляет около 6 сек, а время приема полного навигационного сообщения, включающего эфемериды всех спутников, составляет 30 сек. Поэтому нередко ситуации, когда в условиях плохой радиовидимости спутников навигационное сообщение полностью не принимается, и, соответственно, плохо определяются координаты потребителя, если принятые ранее эфемериды КА «устарели». В таких ситуациях можно использовать так называемые «расширенные» эфемериды навигационных КА, ранее предвычисленные в приемнике на существенно большем интервале времени (до нескольких суток). Также использование «расширенных» эфемерид позволяет сократить время получения первого определения координат пользователя после включения приемника, с 30 до 6-10 сек. Необходимо было разработать новые средства решения задач.

Метеорные потоки.

С кометой 1P/Halley обычно связывают два метеорных потока: эта-Аквариды (майские Аквариды) в восходящем узле и Ориониды в нисходящем узле. Это ежегодные потоки, максимум их активности достаточно устойчив. Необходим анализ и моделирование дезинтеграции этой кометы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Работа по теме велась по нескольким направлениям исследований.

Теория потенциала. Изучение гравитационных свойств систем небесных тел.

I. Разработан новый метод изучения гравитирующих сферических систем, основанный на рассмотрении потенциалов подсистем и оболочек. Получены результаты, дополняющие классическую теорию потенциала. Открыт класс моделей, в которых: 1) отношение вклада в потенциал в точке r от сферической подсистемы ко вкладу от оболочки не зависит от радиуса и равно постоянной; 2) для сферической подсистемы отношение гравитационной энергии $W(r)$ к величине вириала $Z(r)$ не зависит от r ; 3) обнаружен предельный случай, когда потенциал любой подсистемы в точности равен потенциалу от внешней оболочки и выполняется равенство $W(r)=Z(r)$. Модели применяются к сверхплотному звездному скоплению в центре Галактики. Изучена прецессия узлов звездных дисков в центральном парсеке Галактики.

II. Поставлена задача о вытекании жидкости (газа) через небольшое отверстие из сферической емкости с упругой оболочкой. Вытекание происходит в медленном режиме с постоянной скоростью. Для этого решена внутренняя задача Неймана для уравнения Пуассона со сложными граничными условиями. Установлено, что потенциал нелинейного поля скоростей и давление внутри резервуара описываются гармоническими функциями, а на поверхности вблизи отверстия эти величины имеют сингулярность.

III. Сформулирован критерий существования точек перегиба потенциала внутри сферических тел. Он гласит: геометрические места точек перегиба потенциала появляются не только на разрывах плотности, но и там, где плотность составляет две трети от средней плотности внутри шара указанного радиуса. Критерий выполняется для тел с любым распределением плотности. Проверка на модели Буллена для Земли подтвердила адекватность критерия. С его помощью получен нижний предел для осевого момента инерции сферического тела, разделяющий планеты и спутники Солнечной системы на две группы. К первой относятся небесные тела, имеющие внутренние точки экстремума силы притяжения. Ко второй группе относятся планеты и спутники, его не имеющие: это Луна, Плутон, Ио, Фобос, и что показательно - Марс.

IV. Разработан метод построения 2-мерного обобщения кольца Гаусса. С помощью таких колец мы объяснили существование вторичных (локальных) минимумов на кривых скоростей у спиральных галактик. Развита теория прецессии узлов звездных дисков в центральном парсеке Галактики. Для исследования орбитальной прецессии, широкие ядерные кольца заменены средневзвешенными узкими круглыми кольцами. Модель с узкими кольцами адекватно описывает прецессию узлов. Установлено, что в центре Галактики релятивистский эффект в движении линии апсид оказывается ничтожно мал в сравнении с эффектом прецессии узлов из-за взаимных гравитационных возмущений ядерных колец. Это объясняет, почему линии узлов ядерных дисков не совпадают.

V. Построен класс фигур равновесия холодных газопылевых облаков, находящихся под влиянием притягивающего центра (звезда) и общего гравитационного поля Галактики; учитываются также центробежные силы от

вращения облака вместе с главной звездой вокруг центра Галактики. Фигура равновесия облака напоминает «лимон» с заострениями на концах длинной оси. Средняя плотность внутри этой фигуры близка к средней плотности материи в Галактике и такие фигуры занимают весь объем Галактики; вследствие этого кометные облака у близлежащих звезд в Галактике могут касаться или пересекаться. Поэтому звезды могут обмениваться кометами, и часть комет в Солнечной системы могла принадлежать соседним звездам.

VI. Решена задача о разложении пространственного потенциала однородного гравитирующего (или заряженного статическим электрическим зарядом) эллиптического диска в ряд по степеням эксцентриситета с точностью до квадрата эксцентриситета. Рассмотрена также задача о приливном потенциале однородного гравитирующего тора с эллиптическим сечением рукава. Потенциал получен в конечном аналитическом виде. Модель может описывать пояс Койпера.

VII. Разработан механизм происхождения спутников у каменно-ледяных небесных тел, являющийся альтернативным для стандартной импактной теории. Суть его - в постепенном выравнивании уровнями поверхностей внутри двухкомпонентных небесных тел. Появляющиеся при этом выравнивании 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 астероида. Затем скапливающиеся массы льда отделяются от центрального тела, что и приводит к образованию спутников. Механизм позволяет объяснить происхождение двух спутников у карликовой планеты Хаумеа и предсказывает, что эти спутники в своем движении не должны сильно отклоняться от плоскости экватора Хаумеа. Это согласуется с наблюдениями.

VIII. Изучен класс фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости, находящихся внутри колец. Они образуют семейство последовательностей обобщенных сжатых сфероидов. Для любого значения приливного параметра есть своя последовательность сфероидов с некоторым предельным сжатием. При отсутствии приливного возмущения получается серия классических сфероидов Маклорена. При максимально возможном значении приливного параметра последовательность фигур вырождается в единственный сфероид, который имеет сжатие, соответствующее предельному сжатию E-галактик. Таким образом, внешние кольца из темной материи могут пролить новый свет на загадку существования E-галактик с критическим сжатием.

Построена фигура равновесия астероида-кентавра Chariklo и кинетическим методом изучаются его кольца. Кольца моделируются гравитирующими торами из малых каменно-ледяных тел, которые обращаются вокруг астероида с небольшой дисперсией скоростей. Модель не предполагает наличия скрытых спутников у астероида, и равновесие кольца определяется только соотношением между дисперсией скоростей частиц и самогравитацией кольца. Решена задача о разложении потенциала тора в ряд по степеням его геометрического параметра, что позволило найти гравитационную энергию тора и выразить массу колец через массу центрального тела. Получено и решено уравнение для темпа диссипации энергии в кольцах. По астрономическим меркам, время эволюции колец оказывается коротким. Построена эволюционная модель спутника Сатурна Япета. Сейчас сжатие

спутника не соответствует его угловой скорости вращения, и ледяная оболочка Япета находится в режиме вековой сферизации. Для изучения в этих условиях эволюции Япета применяется модель "каменное ядро + ледяная оболочка". В основу модели положено уравнение равновесия в конечных разностях, параметры модели берутся из наблюдений. Изучена внутренняя структура Япета. Главное внимание уделяется той роли, которую играет каменное ядро в процессе оседания льда. Показано, что именно оседание льда и приводит к образованию на поверхности спутника мощной кольцевой горной гряды. Модель также предсказывает, что процесс образования ледяного горного хребта должен проходить более интенсивно на ведущем (темном, и поэтому более теплом) полушарии спутника, где лед более пластичен. Этот тонкий вывод согласуется с наблюдениями.

Развит новый подход к изучению динамики эллиптических галактик, основанный на тензорной теореме вириала. Важно, что: а) теорема вириала записывается для каждой слоисто-неоднородной подсистемы; б) учитывается, что пространственная форма гигантских E-галактик представлена трехосными эллипсоидами. Модели используют большой пласт новой наблюдательной информации и максимально точно описывают строение каждой галактики. Для всех галактик выборки было найдено отношение энергии вращения к их потенциальной энергии и рассчитан параметр анизотропии дисперсии скоростей β . Обнаружена корреляция между β и сплюснутостью внешних областей E-галактик. Заметное влияние на динамику оказывает учет градиента отношения «масса-светимость». Для небольших галактик наши значения анизотропии β хорошо согласуются с полученными в проекте 3D ATLAS, однако для гигантских E-галактик наши модели обеспечивают лучшее согласие с наблюдениями.

Разработаны два метода решения задачи о восстановлении формы трехосного эллипсоида по его двумерной проекции на картинную плоскость. Особо важное значение имеет второй метод, основанный на матрице поворота с углами, специально адаптированными для восстановления формы эллипсоида. Доказана теорема: площадь проекции эллипсоида на картинную плоскость будет максимальной (минимальной), когда проекция оси вращения исходного трехосного эллипсоида на картинную плоскость совпадает с малой (большой) осью этой эллиптической проекции. Составлена система из восьми уравнений для решения задачи о пространственной форме и вращении карликовой планеты Хаумеа. Метод позволил заметно уточнить параметры этого планетоида. Приводятся аргументы в пользу того, что кольцо вокруг Хаумеа эллиптическое и наклонено к экватору планеты.

IX. Как известно, центр масс (ЦМ) Луны не совпадает с геометрическим центром фигуры (ЦФ), а линия, связывающая эти две точки, направлена не прямо на центр Земли, а немного отклоняется к юго-востоку.

9.1 Для объяснения смещения ЦМ Луны к югу, используются система из пяти дифференциальных уравнений, описывающих физическую либрацию Луны в широте. Найдены все решения характеристического уравнения, и среди них выделено решение с нулевой частотой. Оно описывает неизвестную ранее коническую прецессию оси вращения Луны и предсказывает стационарный наклон к югу длинной оси тела Луны.

9.2 Для изучения отклонения ЦМ Луны к востоку разработаны два механизма. Первый учитывает эффект ориентации главной оси инерции Луны на второй (пустой) фокус орбиты. Установлено, что сам факт отклонения ЦМ

Луны к востоку (а не к западу) неизбежно приводит к выводу, что в истории Луны был реализован вариант с постепенным возрастанием эксцентриситета орбиты. Это согласуется с современными прецизионными численными расчетами. Для полного решения проблемы был разработан второй механизм, связывающий смещение ЦМ Луны к востоку с эволюцией её формы в приливном поле при постепенном удалении от Земли. Сделан вывод: Луна могла образоваться в непосредственной близости от Земли на расстоянии около 4 радиусов нашей планеты.

Х. Для изучения динамики колец, открытых у малых небесных тел, развита новый подход. Он опирается не на возмущающую функцию Лагранжа, а на взаимную потенциальную энергию колец Гаусса. Рассматривается задача, когда два кольца Гаусса имеют малые эксцентриситеты и небольшой угол взаимного наклона. Получено выражение для взаимной энергии колец в виде ряда с точностью до членов 4-го порядка малости. Сравнение с традиционным методом разложения возмущающей функции Лагранжа показало адекватность нового подхода: вместо усреднения полученного очень сложным образом выражения для возмущающей функции Лагранжа, методически проще сразу вычислить взаимную энергию двух колец Гаусса. Выражение взаимной энергии двух колец используется для вывода и решения системы дифференциальных уравнений, описывающих их эволюцию. Метод применяется для детального изучения двупланетной задачи Солнце-Юпитер-Сатурн, где наши результаты дополняют и уточняют результаты других авторов.

Движение пассивно гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики (ЭГ).

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 эллипсоидального 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) распределениями плотности, хорошо согласующиеся с современными представлениями о строении ЭГ, и определена динамика пространственного движения ПГТ в поле притяжения такой галактики.

На основе созданных двух моделей для неоднородной эллиптической га-

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

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

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

В рамках работы по теме создавались две новые модели для неоднородной эллиптической галактики (ЭГ). Рассматривается задача о пространственном движении пассивно-гравитирующего тела (ПГТ) в ее поле притяжения. Под ПГТ подразумевается звезда или центр масс шарового скопления (ШС), в движении которого учитываются притяжения светящейся части ЭГ, как центрального тела, и сферического (или эллипсоидального) слоя, как возмущающего тела, в котором преобладает темная материя (ТМ). При этом считается, что основная часть ТМ содержится вне светящейся части ЭГ, в которой преобладает барионная масса (БМ). Однако, по мнению других авторов, содержание ТМ в центральных областях ЭГ сравнимо с содержанием БМ. По этой причине в обеих моделях рассматриваются оба варианта. Новые модели созданы в рамках работы по теме.

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

Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциалы в обеих моделях не

разлагаются в ряд по степеням малых параметров, а берутся целиком.

С помощью предложенного нового способа определены некоторые ключевые динамические параметры эллиптических галактик. К таковым относятся: полная гравитационная (потенциальная) энергия ЭГ вместе с гало и ее дисперсия скоростей, средние значения радиуса-шкалы ЭГ, плотность в ее центре и значение третьей полуоси. Такие параметры, как правило, отсутствуют в базе данных (HyperLeda, Ned, Vizier).

Полученные результаты применены к реально существующим эллиптическим галактикам. Сравнение полученных значений данных параметров почти согласуется со значениями, полученными другими авторами.

В рамках работы по теме создавались несколько новых моделей для неоднородной эллиптической галактики. Созданные модели служат для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики. ЭГ рассматривается как трехосный неоднородный эллипсоид, или неоднородный сфероид, состоящий из БМ и ТМ с определенными законами распределения плотности. В качестве профиля БМ берется «астрофизический закон», а для темной материи – аналоги известных профилей, которые применимы только к сферическим галактикам. К таким профилям относятся: модели Дэнена, NFW, Хернквиста и Джаффа. Эти модели могут быть объединены в один универсальный профиль, приведенный в книге Бинни, Тремайна 2008 года. Для применения вышеперечисленных моделей к ЭГ, они нами усовершенствованы и названы аналогами соответствующих профилей.

Для решения задач небесной механики вычисляются согласно этим моделям потенциалы притяжения ЭГ, которые для получения точных результатов в ряд не разлагаются, а берутся их точное выражение. Затем выводятся уравнения движения пассивно-гравитирующего тела (ПГТ), под которым подразумевается отдельная звезда ЭГ. Определяются точки либрации, устанавливается их устойчивость в смысле Ляпунова, находятся возможные первые интегралы - аналоги интеграла Якоби, определяются области возможности движения ПГТ и строятся поверхности нулевой скорости.

В рамках астрофизической задачи, на основе этих моделей будут определены ключевые параметры: полная гравитационная (потенциальная) энергия и кинетическая энергия вращения ЭГ. Для получения точных результатов, эти величины в ряд не разлагаются, а берутся их точное выражение. Если ЭГ как динамическая система имеет форму неоднородного сфероида, то с помощью этих параметров удастся исследовать ее устойчивость согласно критерию Пиблса-Острайкера. При этом условные границы ЭГ определяются согласно известным формулам, из каталога Вокулера.

Полученные результаты применяются к реально существующим шестидесяти ЭГ.

Аналитические модели движения небесных тел.

1. При изучении движения планет и спутников часто возникает необходимость иметь простую приближенную аналитическую модель движения, которая учитывает основные возмущения и сохраняет примерно одинаковую точность на больших интервалах времени. Для этого используется модель прецессирующего эллипса. В настоящей работе показано, что при малых эксцентриситетах такая модель возмущенной орбиты не соответствует свойствам движения тела. Существует круговое возмущенное движение, при котором средняя аномалия постоянна и равна нулю. Соответствующее решение удовлетворяет уравнениям Лагранжа относительно элемен-

тов кеплеровой орбиты. Вблизи такого частного решения существуют два семейства решений с либрационным и циркуляционным изменениями средней аномалии. В работе показано, как изменяются эксцентриситет и средняя аномалия в этих решениях.

2. Разработано специальное представление вековой части возмущающей функции взаимного притяжения планет (спутников). В отличие от известных разложений оно использует ее асимптотику при близких значениях больших полуосей орбит возмущаемого и возмущающего тел, а также имеет единую аналитическую форму для внешнего и внутреннего вариантов задачи. Полученное выражение представляет собой частичную сумму степенного ряда по малым эксцентриситетам и синусам углов взаимных наклонов орбит. Эта работа велась при сотрудничестве с ИПМ РАН.

3. Решалась задача о совместном влиянии сжатия центральной планеты, притяжения ее наиболее массивных (или главных) спутников и Солнца на эволюцию орбиты спутника пренебрежимо малой массы. Для произвольного угла между экваториальной плоскостью планеты и плоскостью ее гелиоцентрической орбиты получены эволюционные уравнения в плането-экваториальных элементах спутниковой орбиты. Описаны интегрируемые случаи эволюционной задачи. С помощью численных расчетов и аналитических оценок выявлено влияние главных спутников Урана на эволюцию орбит его реальных и гипотетических спутников. Эта работа велась при сотрудничестве с ИПМ РАН.

4. Исследовалась 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.

5. 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.

6. В последние годы в литературе опубликованы дифференциальные уравнения движения спутника планеты под действием приливов в вязкоупругих телах планеты и спутника. Уравнения относительно прямоугольных координат не вызывают сомнений, однако вывод уравнений относительно большой полуоси и эксцентриситета орбиты оказывается невозможным проследить в публикациях по этой теме. Именно эти уравнения описывают эволюцию орбит. Поэтому исполнителями работы по теме была выполнена работа по выводу этих уравнений заново независимым методом. Выведенные уравнения были проверены путем сравнения решений с решениями уравнений в прямоугольных координатах. Решения получались методами численного интегрирования. Результат работы показал принципиальное отличие двух из четырех новых уравнений с теми уравнениями, которые опубликованы в предшествующих работах других авторов.

7. Решалась задача поиска приближенных решений при моделировании орбит естественных спутников планет и исследованию устойчивости орбит спутников.

Рассмотрены уравнения задачи 3-тел для движения спутника в поле тяготения двух других массивных тел, обращающихся по эллиптическим орбитам вокруг общего барицентра. В приближении круговой орбиты для спутника, уравнения усреднены по времени при длительном его обращении. Это редуцирует систему к уравнениям Риккати (для радиус-вектора "спутник-планета", в Лагранжевой форме). Переменные величины: 3 координаты радиус-вектора "центр планеты - спутник". Отношение модуля радиус-вектора/к расстоянию "планета-Солнце" много меньше единицы. Константы задачи: масса спутника, масса планеты, масса Солнца; гравитационная постоянная, среднее расстояние планеты до Солнца. Формула для управляющего параметра: параметр = (масса планеты/масса Солнца) x (куб расстояния "планета-Солнце"/куб расстояния "спутник-планета"). Диапазон параметра 0.001-0.01 (и менее) для устойчивой аппроксимации орбиты спутника. Основной результат: оценены "зоны безопасности" (стабильные орбиты); выброс из зоны происходит за счет резонансных особенностей Риккати: локальное резкое увеличение амплитуды решения.

Эволюция орбит спутников планет.

Решалась задача моделирования орбит естественных спутников твердых планет в Солнечной системе (планет с преимущественной твердой фазой) при учете влияния диссипации энергии в приливных горбах планеты и спутника на динамику его обращения вокруг барицентра, в рамках задачи

2-тел в условиях резонанса 1:1 на временной шкале масштабов, сравнимых с временем существования Солнечной системы. Подход является новым и необходим как альтернатива численным методам.

За основу постановки задачи взяты базовые уравнения, определяющие орбитальную эволюцию спутника в условиях резонанса 1:1 и приливных взаимодействий "спутник - приливные горбы - планета" отдельно в планете и спутнике. Переменными являются: эксцентриситет, большая полуось. Константами задачи являются: масса спутника, масса планеты; число Лава k_2 спутника и планеты; радиус спутника и планеты. Фактор добротности Q определяется как степенная функция от приливной частоты, которая задается как двойная по модулю разница между угловой скоростью вращения планеты и средним движением спутника. При этом учитываются реологические зависимости при подсчете потерь на приливное трение в процессе коррекции орбиты спутника.

Основным результатом (что и планировалось) является следующий: фактор добротности Q при моделировании определяется как степенная функция от приливной частоты, это приводит к квазипериодической эволюции орбит спутников.

Вращение тел Солнечной системы (естественные спутники планет).

Исследована динамика и устойчивость плоского вращения спутников (уравнение В.В. Белецкого) в рамках новой схемы, когда эволюция вращения спутника разбивается на этапы при его движении вокруг планеты по эллиптической орбите; далее рассчитывается режим вращения для каждого этапа - финальное состояние предыдущего этапа определяет начальные данные для следующего. Масштаб разбиения на этапы определяется шагом изменения истинной аномалии при движении спутника по орбите, в пределах одного этапа пренебрегают приливным воздействием (от планеты и спутника) на вращение спутника.

За основу взято уравнение динамики плоского вращения спутника (уравнение В.В. Белецкого). Переменным (зависящим от истинной аномалии) является двойной угол между радиус-вектором центра масс спутника и одной из главных осей инерции. Константы задачи: главные моменты инерции спутника $\{A, B, C\}$, эксцентриситет орбиты спутника.

Необычным приемом является револьверная схема расчета режима вращения: в пределах одного шага истинной аномалии, исходное уравнение Белецкого редуцируется к уравнению Абеля, при этом начальным состоянием для следующего этапа является финальное состояние предыдущего. В предложенной схеме, шаг истинной аномалии должен быть малым (не учитывается приливное воздействие на динамику вращения спутника). Основным результатом работы: показано, что спутник может испытать внезапное ускорение или замедление вращения из-за характерной особенности решений уравнений типа Риккати.

Вращение тел Солнечной системы (астероиды).

Решалась задача о вращении астероида на эллиптической орбите под действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение. Было получено новое аналитическое решение для вращения астероида с учетом негравитационных эффектов.

Исследовалась динамика вращения твердотельного астероида на основе уравнений Эйлера вращения твёрдого тела, с дополнительным учётом инфинитезимального YORP-эффекта (негравитационной природы). Астеро-

ид движется по эллиптической орбите, за пределами сферы Хилла. Дополнительные возмущающие факторы (приливные воздействия, столкновения с другими объектами, прохождение вблизи массивных небесных тел) - не учитывались. Рассматривалось состояние почти постоянного углового момента астероида, с минимальной энергией вращения (после воздействия различных возмущающих факторов). При этом основное вращение астероида происходит вокруг оси с максимальным моментом инерции, с небольшими колебаниями вокруг остальных двух главных осей.

Новое решение уравнений Эйлера вращения твёрдого тела получено в кинематической постановке задачи. Кинематическая постановка означает, что YORP-эффект зависит только от времени (по данным из наблюдений); не рассматриваются механизмы его возникновения, зависимость от строения, структуры астероида, а также физики процессов внутри астероида. Просчитаны некоторые режимы вращения, приводятся примеры точных и аппроксимирующих (приблизительных) решений.

Данная задача относится к разделу небесной механики, изучающему динамику и устойчивость орбитального вращения малых небесных (твёрдых) тел при учете воздействия на этот процесс дополнительных вращающих моментов.

Движение малой массы в окрестности точек либрации.

За основу постановки задачи взяты базовые уравнения круговой ограниченной задачи 3-тел, определяющие движение малой массы (спутника) в поле тяготения двух других массивных тел, обращающихся по законам Кеплера вокруг общего барицентра по круговым орбитам. Рассмотрено 2 синодических системы координат, одна связана с Землей и Солнцем, другая с новой планетой (орбита которой наклонена по отношению к плоскости эклиптики Земли) и также с Солнцем. Уравнения представлены в виде, который автоматически позволяет применить новый подход к их решению, ранее предложенный Ершковым С.В. при исследовании различных задач механики (в правой части уравнений градиент силовой функции представлен покомпонентно); новая силовая функция, составляющие которой изменены, зависят от наклона орбиты новой планеты (по отношению к эклиптике Земли) - выражена, тем не менее, в старой системе координат, связанной с нулевым наклоном относительно эклиптики Земли. Это позволяет свести модельные уравнения к паре уравнений Риккати (для поля скорости малой массы, в окрестности точек либрации). В уравнениях переменными (зависящими от времени) являются величины: три составляющие поля скорости, новая силовая функция (составляющие которой изменены и зависят от наклона орбиты новой планеты по отношению к эклиптике Земли). Динамика движения малой массы рассматривается только в окрестности точек либрации. Постоянными (константами задачи) являются: масса спутника, масса планеты, масса Солнца; гравитационная постоянная, среднее движение (планеты вокруг Солнца); составляющие угловой скорости вращения новой планеты вокруг общего центра масс с Солнцем; угол наклона плоскости орбиты новой планеты к плоскости эклиптики Земли. Среднее расстояние планеты до Солнца считается также постоянным в первом приближении. Исходя из указанных допущений и ограничений, были получены аналитические формулы, определяющие составляющие скорости малого тела (в окрестности точек либрации). Сделано предположение, что спутник может быть выброшен за пределы зоны близкого расположения (к точкам

либрации) за счет резонансных особенностей определяющих его движение уравнений. Решения уравнений типа Риккати обладают специфической особенностью: в определенный момент времени возможно резкое увеличение амплитуды решения. Установление подобного факта для спутниковой навигации в окрестности точек либрации можно назвать основным результатом работы - что и планировалось.

Построение новых моделей движения небесных тел на основе наблюдений.

Результатом работы является новая аналитическая модель движения спутника Нептуна Тритон. Параметры модели уточнены на основе всех опубликованных наблюдений спутника. В итоге предлагаются новые эфемериды Тритона. Построенная модель и эфемериды обладают следующими преимуществами по сравнению с предыдущими результатами других авторов. Эфемериды можно вычислять на любые моменты времени по простым формулам аналитической теории, предлагаемым в настоящей работе. Модель движения основана на наблюдениях Тритона, выполненных на интервале времени 1847-2012 годы. Этот интервал на 4 года больше интервала времени наблюдений, использованных в работе Якобсона 2009 года.

Для уточнения параметров движения Тритона использовались 16096 измерений координат спутника, полученных из 10254 наблюдений. Среднеквадратическая величина остаточных невязок наблюдений в топоцентрических угловых координатах составила 0.228 секунд дуги. Соответствующее средневзвешенное значение невязки оказалось равным 0.036 секунд дуги. Впервые сделана попытка определения коэффициента k при квадратичном члене в возмущениях орбитальной долготы спутника. Такие возмущения могут быть вызваны негравитационными эффектами, в частности, приливами в теле Нептуна или ошибками наблюдений. Значение коэффициента k оказалось сравнимым с его ошибкой, оцененной по методу наименьших квадратов. Очевидно, что доступных наблюдений не достаточно, чтобы надежно определить квадратичный член в долготе, обусловленный диссипацией энергии орбитального движения. Новые эфемериды Тритона включены в службу эфемерид спутников планет.

Предложены простые аналитические модели движения четырех близких спутников Юпитера, согласованные с имеющимися эфемеридами, которые в свою очередь получены численным интегрированием уравнений движения и уточнены по наблюдениям.

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

В 2018 году были открыты 10 новых спутников Юпитера. Было необходимо определить орбиты этих спутников на основе наблюдений. Такая работа была сделана. Параметры орбит определены.

В 2019 году было открыто 20 новых далеких спутников Сатурна. В рамках темы было выполнено определение орбит этих новых спутников на основе

наблюдений.

Точность определения орбит оказалась не хуже точности определений, выполненных в американском институте JPL.

В мире существует еще только один научный центр, где разрабатываются модели движения далеких спутников больших планет с максимальной точностью – это JPL в США. Работы по теме конкурируют с американскими работами.

Все новые орбиты включены в сервер эфемерид MULTI-SAT, который разработан и поддерживается в доступе через интернет в отделе небесной механики ГАИШ.

Получение астрометрических результатов из фотометрии спутников планет во время их взаимных покрытий и затмений. 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 всегда велась и ведется при сотрудничестве с IMCCE.

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 опубликованной статье дается описание всех наблюдений, методов обработки и фрагменты таблиц астрометрических результатов. Полные таблицы публикуются в электронном виде с доступом к ним через интернет на сайте журнала.

Проведена работа по составлению эфемерид взаимных покрытий и затмений главных спутников Юпитера и Сатурна на будущие периоды этих явлений в 2021-2024 годах. Определены обстоятельства явлений. Все это необходимо для планирования и проведения будущих международных кампаний наблюдений. Все необходимые данные размещены в доступе через интернет.

Создание и обновление баз данных наблюдений малых тел Солнечной системы.

Исследования динамики спутников больших планет и астероидов состоят в построении моделей движения на основе наблюдений. Модели являются одновременно и результатом и средством исследования. Поэтому они всегда востребованы.

Модели движения создаются на основе наблюдений. Для этого в плане работы по теме создаются, постоянно пополняются и поддерживаются базы данных наблюдений. Эти базы данных, как результат работы по теме, размещаются на страницах интернета и доступны любому пользователю. Рабо-

та заключается в формировании стандартных порций данных, составлении описаний наблюдений, необходимых для их использования, и размещения данных в сети Интернет.

Исполнителями работ по теме ранее была создана, пополняется и поддерживается база данных всех опубликованных наблюдений спутников планет. В англоязычной терминологии она имеет обозначение Natural Satellites Data Base (NSDB). Эта база данных широко используется наблюдателями и специалистами по динамике спутников. Следующим естественным этапом было расширение этой базы данных на спутники астероидов. До сих пор такой базы данных не существовало. Теперь силами сотрудников отдела небесной механики собрана база данных всех опубликованных наблюдений спутников астероидов. В базе данных собраны 1003 положения спутников астероидов. Каждая порция данных доступна пользователю в виде двух файлов - двух страниц в интернете: файл данных (результаты измерений) и файл объяснений. Файл объяснений содержит описание наблюдений: на какой обсерватории они выполнены, какими наблюдателями, с помощью какого телескопа. Дается также библиографическая ссылка, которая на странице совмещена с гиперссылкой на публикацию в библиографической базе данных NASA ADS Abstract Service, так что пользователь может сразу получить текст статьи, если текст бесплатно доступен в ADS Abstract Service. Таким образом, любому пользователю по его желанию доступны сразу все имеющиеся в мире наблюдения интересующего его спутника астероида.

База данных естественных спутников планет Natural Satellites Data Base постоянно пополняется новыми данными. Отслеживается появление в публикациях новых наблюдений и новых версий физических параметров. В частности за последний год более половины всех данных по физическим параметрам было обновлено. Раз в год пополняется новыми ссылками специализированная база данных по естественным спутникам планет.

В рамках работы по теме было собрано много новых наблюдений, базы данных были значительно обогащены. Около 20 новых порций наблюдений спутников были включены в NSDB. Более 30 новых порций наблюдений спутников астероидов дополнили соответствующую базу данных.

Наблюдения и исследования спутников астероидов необходимы для моделирования динамики Солнечной системы. Среди используемых для этого средств важными являются базы данных, накопленных в предшествующих работах. Наличие достаточно полных баз данных с удобным доступом и сервисом является условием прогресса в исследованиях. Для спутников астероидов к настоящему времени ситуация была неудовлетворительной. В частности, не существовало базы данных всех опубликованных наблюдений спутников астероидов. Настоящая работа ликвидировала этот пробел. По этим причинам была создана новая база данных всех астрометрических наблюдений спутников астероидов. Она имеет простую структуру и доступна через Интернет. Предусмотрено регулярное обновление данных по мере появления в публикациях новых результатов наблюдений. База данных размещена на сайтах Центра данных естественных спутников планет (Natural satellites DataCenter), созданного в результате сотрудничества Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова и Института небесной механики и вычисления эфемерид, Париж, Франция (Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides – IMCCE). База данных доступна через Интернет, имеет простой интерфейс.

Адреса базы данных в интернете

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/indexr.htm> и

<http://nsdb.imcce.fr/obspos/>,

соответственно. При входе нужно выбрать один из трех языков общения: русский, английский или французский. Данные наблюдений снабжены объяснениями и гиперссылками на публикацию в библиографической базе данных ADS Abstract Service (NASA). Предусмотрено постоянное пополнение данных по мере появления новых публикаций наблюдений.

Разработка и обновление службы эфемерид тел Солнечной системы.

В течение последних 15 лет в отделе небесной механики ГАИШ при сотрудничестве с французским институтом небесной механики разрабатывался и развивался сервер эфемерид естественных спутников планет MULTI-SAT. Это средство, доступное через интернет, широко используется специалистами по динамике спутников.

Что касается всех больших планет, то в мире существовало только два независимых источника планетных эфемерид: сайт Jet Propulsion Laboratory (США) и сайт Института Прикладной Астрономии РАН. Третий независимый источник мог бы дать в итоге достоверные эфемериды планет. Такой источник был создан путем развития сервера эфемерид MULTI-SAT. Теперь он позволяет получать эфемериды всех больших планет от Меркурия до Плутона, включая Луну.

Создаваемые в плане работы по теме модели движения спутников сразу включаются в службу эфемерид MULTI-SAT, созданную ранее по теме исследований и поддерживаемую при постоянном сотрудничестве с французскими коллегами.

В 2018 году были открыты 10 новых далеких спутников Юпитера, в 2019 году – 20 новых спутников Сатурна. В текущем году в плане работы по теме были определены орбиты этих новых спутников. При этом в модели движения учитывались возмущения от Солнца, от сжатия Юпитера и от притяжения Галилеевых спутников. Соответствующие эфемериды включены в сервер эфемерид MULTI-SAT. Эта работа требовала определенной сноровки и опыта при подборе начального приближения.

В процессе работы по теме сервер эфемерид MULTI-SAT постоянно совершенствуется. В отчетном году в сервере была уточнена выдача видимых координат небесных тел путем включения таблиц параметров ориентации Земли, регулярно выдаваемых международной службой вращения Земли IERS. Были сделаны и другие усовершенствования.

Аналитическое разложение параметров орбит тел Солнечной системы.

I. Получено аналитическое разложение оскулирующих элементов орбит всех больших планет Солнечной системы в компактные аналитические ряды. Использовался метод спектрального анализа численных эфемерид планет DE431 на всем интервале ее действия в 30000 лет. В отличие от классического анализа Фурье, разложение выполнялось в тригонометрические ряды с амплитудами и аргументами, представляющими собой полиномы высокой степени от времени. Полученные ряды содержат в себе, в зависимости от планеты, от 5793 до 8239 членов (суммарно для всех элементов орбит). Разложение сохраняет высокую точность на интервале времени 24000 лет: 10000 г. до н.э – 14000 г. н.э. В частности, на данном промежутке максимальное отклонение между средней долготой планеты в орбите, вычисляемой на основе исходных численных эфемерид и, альтернативно, с помощью новых

рядов, составило: 0".0011 для Меркурия, 0".024 для Венеры, 0".0089 для барицентра системы «Земля-Луна», 0".071 для Марса, 0".080 для Юпитера, 0".22 для Сатурна, 0".10 для Урана и 0".043 для Нептуна. Полученные ряды по своей компактности и точности представления эфемерид планет на длительных интервалах времени (несколько десятков тысяч лет) существенно превосходят все известные аналоги, в т.ч. VSOP2013 и TOP2013.

II. Ведется работа по построению нового разложения приливообразующего потенциала Марса для возможного использования при обработке результатов космического эксперимента RISE (один из трех основных экспериментов действующей миссии InSight к Марсу). В данном эксперименте определяются параметры основных «волн» в положении оси вращения Марса. Расчетные величины этих параметров зависят как от физических характеристик тела планеты (таких как числа Лява на различных частотах), так и от значения возмущающего приливообразующего потенциала на поверхности планеты. При условии точного знания последнего сравнение расчетных значений параметров этих волн с наблюдаемыми позволяет определить (улучшить) ряд физических характеристик Марса, что, собственно, и является основной целью эксперимента RISE. При этом недостаточно знать само «общее» значение приливообразующего потенциала на поверхности планеты, необходимо получить расчетные значения амплитуд волн именно в разложении данного потенциала по различным частотам, т.к. наблюдаемые волны в движении полюса планеты также разделяются по частотам (периодам) этих волн.

Ранее в работе Кудрявцева нами было получено разложение приливообразующего потенциала Марса в аналитические ряды. Основные отличия нового разложения от предыдущего следующие: • в качестве источника эфемеридных данных в работе 2008 г. использовалась эфемерида больших планет DE-406, в данной работе – современная эфемерида DE-431; • в новом разложении используются более точные значения притягивающих масс Солнца и больших планет, а также масс Фобоса и Деймоса; • разложение 2008 г. было выполнено на интервале времени 200 лет (1900 - 2100 гг.), а новое разложение выполняется на интервале времени в 10 раз больше (1000 - 3000 гг.). Увеличение интервала времени, на котором проводится разложение, приводит к лучшему разделению близких частот.

Однако, увеличение интервала времени до 2000 лет в новом разложении привело к значительным вычислительным трудностям, поскольку орбитальный период Фобоса составляет всего около 7ч. 40 мин., а количество точек на одном витке, желательное для расчета таблицы значений разлагаемой функции (потенциала), достигает несколько десятков. В результате, число значений приливообразующего потенциала в первоначальной табличной функции, подлежащей разложению, составило более 73 000 000. При этом, число таких функций равно 78 (в работе предполагается выполнить разложение приливообразующего потенциала Марса до 8-й степени и порядка включительно).

В 2019 г. были написаны новые части программного кода, модифицирующие программу для вычисления разложения приливообразующего потенциала Марса 2008 г., и позволяющие разместить в оперативной памяти компьютера массивы подобной длины, а также выполнены предварительные вычисления для некоторых гармоник разложений низших порядков. Полностью работу по новому разложению приливообразующего потенци-

ала Марса планируется завершить в 2020 г.

Эфемериды искусственных спутников Земли.

Автономное прогнозирование эфемерид навигационных КА GPS и ГЛОНАСС на расширенных интервалах времени. Основные исследования и результаты состоят в следующем.

1. При работе приемника в штатном режиме он использует принимаемые им бортовые эфемериды КА для получения навигационного решения, но может и дополнительно сохранять их. Для КА GPS, в принципе, достаточно сохранять данную информацию из последнего принятого сообщения, но лучше – из двух последних. Для КА ГЛОНАСС необходимо хранить информацию из последнего сообщения и сообщений, принятых за 12-24 часов до него (то есть с 1-го - 2-х предыдущих прохождений КА).

2. При наличии свободных мощностей процессора приемника, остающихся после получения им навигационного решения (либо сразу при попадании его в радиотень) выполняется «размножение» сохраненных бортовых эфемерид КА на интервалах их применимости (в течение 2 ч. для КА GPS и 30 мин. для КА ГЛОНАСС для каждого прохождения КА). Для «размножения» бортовых эфемерид здесь используются те же самые алгоритмы прогнозирования параметров движения КА, что и для получения навигационного решения, поэтому эти алгоритмы уже реализованы в навигационном приемнике.

3. Используя вычисленные («размноженные») эфемериды КА на ряд моментов времени в пределах интервалов их применимости в качестве фиктивных «наблюдений» КА, мы уточняем ряд параметров движения КА с помощью метода наименьших квадратов. При этом интегрирование уравнений движения КА осуществляется численным методом с применением гораздо более точной модели возмущающих сил, чем в стандартном алгоритме, используемом для получения навигационного решения и «размножения» эфемерид. Было установлено, что оптимальным составом уточняемых параметров являются 3 компоненты скорости КА вдоль осей выбранной прямоугольной системы координат и 2 координаты полюса Земли (X_p , Y_p) на начальный момент времени.

4. С помощью разработанного алгоритма было проведено тестовое прогнозирование положения всех КА навигационных систем GPS и ГЛОНАСС на основе принятых бортовых эфемерид данных КА на интервале времени до 5 дней и выполнено сравнение с известными реальными данными. В качестве сравниваемых характеристик использовались SISRE (Signal-In-Space-Range-Error - оценка максимальной ошибки дальности до КА от пользователя на поверхности Земли) в предположении отсутствия накопления погрешности часов КА и абсолютная ошибка положения спутника в пространстве в системе координат WGS84.

5. Была отмечена заметная зависимость качества прогнозирования от «поколения» КА:

- блок GPS IIF (современное поколение блоков);
- блоки GPS IIR, IIRM (предыдущее поколение блоков);
- GPS блок IIA (наиболее старый блок);
- ГЛОНАСС-М (составляют большинство КА системы);
- ГЛОНАСС-К (блок нового поколения).

Для КА GPS наилучшие результаты определения и прогнозирования КА получаются для новых блоков GPS IIF (рассогласования рассмотренных па-

раметров составляют единицы метров на интервале времени в несколько дней); прогноз для блоков GPS IIR, IIRM на интервале до пяти дней имеет типичную ошибку 5-20 м; и для единственного старого блока GPS IIA расогласования достигают нескольких десятков метров. Этот эффект можно объяснить неодинаковой точностью изготовления блоков GPS разных поколений, и, как следствие, различной точностью учета сил солнечного давления, действующих на спутник. Практически для всех КА ГЛОНАСС максимальная ошибка прогноза рассмотренных параметров на несколько дней составляет единицы метров. Минимальная ошибка была отмечена для блока новейшего поколения КА ГЛОНАСС-К.

Метеорные потоки.

С кометой 1P/Halley обычно связывают два метеорных потока: эта-Аквариды (майские Аквариды) в восходящем узле и Ориониды в нисходящем узле. Это ежегодные потоки, максимум их активности достаточно устойчив. Майские Аквариды обычно появляются 19-21 апреля и наблюдаются до 12-28 мая с пиком активности 5 мая. Считается, что в Северном полушарии наблюдение этого потока затруднено, так как источник метеоров расположен за горизонтом и метеоры можно наблюдать в, основном, в предрассветные часы. В 1991 году после прохождения перигелия 14-го февраля на расстоянии 13.45 а.е. была зарегистрирована неожиданная и трудно объяснимая вспышка блеска уходящей кометы (по наблюдениям в Чили -13,379 а.е.). Анализ результатов моделирования дезинтеграции кометы на участке от перигелия до точки вспышки по компьютерной технологии, разработанной в ИАТЕ НИ-ЯУ МИФИ с участием В.М Чепуровой, показал, что основная форма орбит фрагментов выброшенной массы ядра будет эллиптической. Гиперболическую орбиту приобретают те фрагменты, изменения эксцентриситета орбит которых превысят значение 0.33. Это наиболее вероятно при скоростях выброса более 700 м/с. Данные наблюдений (по разным источникам) определяют диапазон скорости выброса в пределах 280-640 м/с. Фрагменты, выброшенные с указанными скоростями, могут пополнить метеорные потоки майских Акварид и Орионид. Фрагменты, имеющие скорость выброса 700-800 м/с, либо пополнят спорадический фон, либо возникнут новые метеороидные образования. Далее с увеличением скорости выброса фрагменты будут иметь только гиперболические орбиты, что может одноразово повлиять на активность потоков с последующим уменьшением этого показателя. Анализ изменений эллиптических орбит фрагментов показал, что первые результаты вспышки 1991 года могли проявиться для потока эта-Акварид уже в 2018 году. Дан прогноз усиления активности этих потоков до 2192 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые результаты по направлениям исследований.

Теория потенциала. Изучение гравитационных свойств систем небесных тел.

1. Разработан новый метод изучения гравитационных свойств сферических систем, основанный на анализе отношения потенциалов подсистем и оболочек. Открыт класс моделей, в которых это отношение не зависит от радиуса и равно постоянной.

2. Получено 2-мерное обобщение кольца Гаусса. Модель позволила объяснить существование вторичных минимумов на кривых вращения у спиральных галактик и развить теорию прецессии узлов звездных дисков в центральном парсеке нашей Галактики.

3. Сформулирован критерий «трех вторых» существования точек перегиба потенциала (точек экстремума силы притяжения) внутри сферических тел. Критерий позволил разделить планеты и спутники Солнечной системы на две группы.

4. Решена задача о разложении пространственного потенциала однородного гравитирующего эллиптического диска в ряд по степеням эксцентриситета до включительно.

5. Найден приливной потенциал однородного гравитирующего тора с эллиптическим сечением рукава. Потенциал может применяться как гравитационная модель Пояса Койпера.

6. Изучена задача о медленном вытекании жидкости (газа) через отверстие из сферической емкости с упругой оболочкой. Установлено, что потенциал нелинейного поля скоростей и давление внутри резервуара описываются гармоническими функциями, а на поверхности вблизи отверстия эти величины имеют сингулярность.

7. Впервые разработан скрытый механизм выравнивания уровенных поверхностей внутри каменно-ледяных небесных тел. Появляющиеся при этом отклонения от локального равновесия деформируют ядро и оболочку. Для тел с быстрым вращением это приводит к удлинению ядра, и при достижении предела лед не выдерживает напряжений, и накапливается на острых концах астероида. Затем эти массы льда отделяются, что и приводит к образованию спутников. Механизм является альтернативой импактной теории и позволяет объяснить происхождение спутников у карликовой планеты Хаумеа.

8. Изучен класс фигур равновесия внутри колец. Для каждого значения приливного параметра есть своя последовательность сжатых сфероидов. Кольца из темной материи могут пролить свет на загадку существования E-галактик с критическим сжатием.

9. Построен класс фигур равновесия холодных газопылевых облаков, находящихся под влиянием центральной звезды, гравитационного поля Галактики и центробежных сил. Такие фигуры занимают весь объем Галактики и могут пересекаться. Поэтому часть комет в Солнечной системе могла принадлежать соседним звездам.

10. Построена фигура равновесия астероида-кентавра Chariklo и кинетическим методом изучаются его кольца. Модель не предполагает наличия скрытых спутников у астероида. Найдена гравитационная энергия тора, что

позволило выразить массу колец через массу центрального тела. Установлено, что шкала времени эволюции колец весьма короткая.

11. Построена эволюционная модель спутника Сатурна Япета, которая позволила объяснить образование и тонкие детали строения мощного ледяного хребта на Япете.

12. Развита вириальный подход к изучению динамики эллиптических галактик. Модели используют большой пласт новой наблюдательной информации и описывают строение каждой галактики. Рассчитан параметр анизотропии дисперсии скоростей. Для гигантских E-галактик наши модели обеспечивают лучшее согласие с наблюдениями.

13. Разработаны два метода решения задачи о восстановлении формы трехосного эллипсоида по двумерной проекции на картинную плоскость. Особое значение имеет метод, основанный на матрице поворота с углами, специально адаптированными для восстановления формы эллипсоида. Составлена система из восьми уравнений, что позволило уточнить пространственную форму карликовой планеты Haumea и расположение её кольца.

14. Для объяснения отклонения центра масс Луны к востоку разработаны два механизма. Первый использует эффект ориентации главной оси инерции Луны на второй фокус орбиты. Установлено, что эксцентриситет орбиты Луны в прошлом был меньше, чем сейчас. Вторым механизмом связывает смещение ЦМ Луны к востоку с эволюцией её формы в приливном поле при постепенном удалении от Земли. Сделан вывод: Луна могла образоваться в непосредственной близости от Земли на расстоянии около 4 радиусов нашей планеты.

15. Для изучения динамики колец тел развита подход, опирающийся на взаимную потенциальную энергию колец Гаусса. При малых эксцентриситетах и взаимном наклоне колец получено в виде ряда с точностью до членов 4 порядка малости. Метод применяется для детального изучения двухпланетной задачи Солнце-Юпитер-Сатурн.

Движение пассивно гравитирующего тела в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики.

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики построены две модели неоднородной эллиптической галактики (ЭГ) со сферическим (Модель 1) и эллипсоидальным (Модель 2) распределениями плотности. Такие галактики можно называть слоисто-неоднородными. Эти модели созданы в рамках работы по теме и хорошо согласуются с современными представлениями о строении ЭГ.

В рамках задач небесной механики на основе этих моделей определена динамика пространственного движения пассивно-гравитирующего тела (ПГТ) в поле притяжения слоисто-неоднородной эллиптической галактики. Для получения точных результатов с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, потенциалы в обеих моделях не разложены в ряд по степеням малых параметров, а взяты целиком.

В рамках задач астрофизики предложен новый способ определения некоторых ключевых параметров ЭГ, значения которых отсутствуют в базе данных (HyperLeda, Ned, Vizier). Эти параметры вычислены для одиннадцати реально существующих эллиптических галактик. Полученные результаты хорошо согласуются со значениями, полученными другими авторами.

В рамках работы по теме также создавались несколько новых моделей для неоднородной эллиптической галактики. Эти модели служат для реше-

ния некоторых задач небесной механики и астрофизики. ЭГ рассматривается как трехосный неоднородный эллипсоид, или неоднородный сфероид, состоящий из БМ и ТМ с определенными законами распределения плотности. В качестве профиля БМ берется «астрофизический закон», а для темной материи – аналоги известных профилей, которые применимы только к сферическим галактикам. Для применения вышеперечисленных моделей к ЭГ, они нами усовершенствованы и названы аналогами соответствующих профилей.

Если ЭГ как динамическая система имеет форму неоднородного сфероида, то с помощью этих параметров удастся исследовать ее устойчивость согласно критерию Пиблса - Острайкера.

Полученные результаты применены к реально существующим шестидесяти ЭГ.

Аналитические модели движения небесных тел.

Разработано специальное представление вековой части возмущающей функции взаимного притяжения планет (спутников). В отличие от известных разложений оно использует ее асимптотику при близких значениях больших полуосей орбит возмущаемого и возмущающего тел, а также имеет единую аналитическую форму для внешнего и внутреннего вариантов задачи. Полученное выражение представляет собой частичную сумму степенного ряда по малым эксцентриситетам и синусам углов взаимных наклонов орбит.

Получены эволюционные уравнения в планетоэкваториальных элементах спутниковой орбиты при совместном влиянии сжатия центральной планеты, притяжения ее наиболее массивных (или главных) спутников и Солнца. Описаны интегрируемые случаи эволюционной задачи. С помощью численных расчетов и аналитических оценок выявлено влияние главных спутников Урана на эволюцию орбит его реальных и гипотетических спутников. Работа выполнялась в сотрудничестве с ИПМ РАН.

В рамках ограниченных эллиптических, параболических и гиперболических задач трех тел рассмотрена задача об устойчивости движений пассивно-гравитирующих тел (планет). Движения пассивно-гравитирующих тел (ПГТ) относительно центрального тела (Солнца) исследовались во вращающейся и пульсирующей системе координат. Для получения точных результатов уравнения движения ПГТ в этой системе координат записываются с использованием точного выражения силовой функции – аналога функции Якоби без разложения ее в ряд. Показано, что в этих задачах существует интегральное инвариантное соотношение – квазиинтеграл. Существование такого квазиинтеграла – аналога интеграла Якоби в этих задачах – ранее отрицалось. С помощью квазиинтеграла доказано существование поверхностей минимальной энергии - обобщения поверхностей нулевой скорости и определены области возможности движения ПГТ. 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. 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.

Орбитальная динамика спутников не является безусловно устойчивой

(предопределенной начальными условиями задачи) и может корректироваться даже в рамках круговой ограниченной задачи 3-х тел: спутник может как приближаться к планете, так и удаляться от неё (в заданных пределах), но при этом может быть внезапно выброшен за них. Нерешенной остается задача для непостоянного расстояния "планета-Солнце" (движение по эллиптическим орбитам вокруг общего барицентра).

Эволюция орбит спутников планет.

Решалась задача моделирования орбит естественных спутников твердых планет в Солнечной системе (планет с преимущественной твердой фазой) при учете влияния диссипации энергии в приливных горбах планеты и спутника на динамику его обращения вокруг барицентра, в рамках задачи 2-тел в условиях резонанса 1:1 на временной шкале масштабов, сравнимых с временем существования Солнечной системы.

Основным результатом (что и планировалось) является следующий: фактор добротности Q при моделировании определяется как степенная функция от приливной частоты, это приводит к квазипериодической эволюции орбит спутников.

Таким образом, орбитальная динамика спутников не является предопределенной: спутник может как приближаться к планете, так и удаляться от неё, в зависимости от потерь на приливную диссипацию. Нерешенной остается задача по жидко-телным планетам.

Вращение тел Солнечной системы (естественные спутники планет).

Исследована динамика и устойчивость плоского вращения спутников. Основным результатом работы: показано что спутник может испытать внезапное ускорение или замедление вращения из-за характерной особенности решений уравнений типа Риккати. При плоском вращении естественных спутников может происходить срыв вращения в градиентную катастрофу. Нерешенной остается задача трехмерного вращения спутника.

Вращение тел Солнечной системы (астероиды).

Решалась задача о вращении астероида на эллиптической орбите под действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение. Было получено новое аналитическое решение для вращения астероида с учетом негравитационных эффектов.

Динамика вращения астероидов может корректироваться в сторону возникновения хаотических режимов вращения и, кроме того, может также происходить внезапный срыв вращения в градиентную катастрофу (резкое замедление или ускорение вращения) даже в режиме плоского вращения астероида. Нерешенной остается аналогичная задача для 3D вращения астероида без использования предположения об инфинитезимальности YORP-эффекта, а также (в случае его использования) остается нерешенной задача для $I_2 - I_3$ (отсутствие симметрии вращения).

Движение малой массы в окрестности точек либрации.

Динамика малой массы в окрестности точек либрации не является безусловно устойчивой даже в рамках круговой ограниченной задачи 3-тел: спутник может быть внезапно выброшен за пределы ближайшей окрестности точки либрации (и продолжить движение в рамках CR3BP за пределами этой зоны).

Нерешенной остается аналогичная задача, если рассматривать непостоянным расстояние "планета-Солнце" (при движении по эллиптическим орбитам вокруг общего барицентра).

Построение новых моделей движения небесных тел на основе наблюдений.

Результатом работы является новая аналитическая модель движения спутника Нептуна Тритон. Параметры модели уточнены на основе всех опубликованных наблюдений спутника. В итоге предлагаются новые эфемериды Тритона. Построенная модель и эфемериды обладают следующими преимуществами по сравнению с предыдущими результатами других авторов. Эфемериды можно вычислять на любые моменты времени по простым формулам аналитической теории, предлагаемым в настоящей работе. Модель движения основана на наблюдениях Тритона, выполненных на интервале времени 1847-2012 годы. Этот интервал на 4 года больше интервала времени наблюдений, использованных в работе Якобсона 2009 г.

Впервые сделана попытка определения коэффициента при квадратичном члене в возмущениях орбитальной долготы спутника. Значение коэффициента оказалось сравнимым с его ошибкой, оцененной по методу наименьших квадратов. Ясно, что наблюдений не достаточно, чтобы надежно определить квадратичный член в долготе.

Новые эфемериды Тритона включены в службу эфемерид спутников планет.

Предложены простые аналитические модели движения четырех близких спутников Юпитера, согласованные с имеющимися эфемеридами, которые в свою очередь получены численным интегрированием уравнений движения и уточнены по наблюдениям.

В работе бразильских коллег был предложен новый тип позиционных измерений, для спутников планет. Не известно заранее, какая точность эфемерид будет получаться в итоге. На основе модельных наблюдений такой анализ был сделан. Получилось, что при незначительных ошибках масштаба лучше использовать видимые взаимные расстояния, а при больших ошибках масштаба предпочтительнее использовать новый тип данных - моменты видимых сближений спутников.

В 2018 году было открыто 10 новых спутников Юпитера и 20 новых далеких спутников Сатурна. В рамках темы было выполнено определение орбит этих новых спутников на основе наблюдений. Точность определения орбит оказалась не хуже точности определений, выполненных в американском институте JPL.

В мире существует еще только один научный центр, где разрабатываются модели движения далеких спутников больших планет с максимальной точностью – это JPL в США. Работы по теме конкурируют с американскими работами.

Все новые орбиты включены в сервер эфемерид MULTI-SAT, который разработан и поддерживается в доступе через интернет в отделе небесной механики ГАИШ.

Получение астрометрических результатов из фотометрии спутников планет во время их взаимных покрытий и затмений.

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 всегда велась и ведется при сотрудничестве с IMCCE.

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.

Проведена работа по составлению эфемерид взаимных покрытий и затмений главных спутников Юпитера и Сатурна на будущие периоды этих явлений в 2021-2024 годах. Определены обстоятельства явлений. Все это необходимо для планирования и проведения будущих международных кампаний наблюдений. Все необходимые данные размещены в доступе через интернет.

Создание и обновление баз данных наблюдений малых тел Солнечной системы.

Исполнителями работ по теме ранее была создана, пополняется и поддерживается база данных всех опубликованных наблюдений спутников планет. В англоязычной терминологии она имеет обозначение Natural Satellites Data Base (NSDB). Эта база данных широко используется наблюдателями и специалистами по динамике спутников. Следующим естественным этапом было расширение этой база данных на спутники астероидов. До сих пор такой базы данных не существовало. Теперь силами сотрудников отдела небесной механики собрана база данных всех опубликованных наблюдений спутников астероидов. В базе данных собраны 1003 положения спутников астероидов. Каждая порция данных доступна пользователю в виде двух файлов - двух страниц в интернете: файл данных (результаты измерений) и файл объяснений. Дается также библиографическая ссылка, которая на странице совмещена с гиперссылкой на публикацию в библиографической базе данных NASA ADS Abstract Service.

База данных естественных спутников планет Natural Satellites Data Base постоянно пополняется новыми данными. В частности, за последний год более половины всех данных по физическим параметрам было обновлено.

В рамках работы по теме было собрано много новых наблюдений, базы данных были значительно обогащены. Около 20 новых порций наблюдений спутников были включены в NSDB. Более 30 новых порций наблюдений спутников астероидов дополнили соответствующую базу данных.

Разработка и обновление службы эфемерид тел Солнечной системы.

В течение последних 15 лет в отделе небесной механики ГАИШ при сотрудничестве с французским институтом небесной механики разрабатывался и развивался сервер эфемерид естественных спутников планет MULTI-SAT. Это средство, доступное через интернет, широко используется специалистами по динамике спутников.

Что касается всех больших планет, то в мире существовало только два независимых источника планетных эфемерид: сайт Jet Propulsion Laboratory (США) и сайт Института Прикладной Астрономии РАН. Третий независимый источник мог бы дать в итоге достоверные эфемериды планет. Такой источник был создан путем развития сервера эфемерид MULTI-SAT. Теперь он позволяет получать эфемериды всех больших планет от Меркурия до Плу-

тона, включая Луну.

Создаваемые в плане работы по теме модели движения спутников сразу включаются в службу эфемерид MULTI-SAT, созданную ранее по теме исследований и поддерживаемую при постоянном сотрудничестве с французскими коллегами.

В 2018 году были открыты 10 новых далеких спутников Юпитера, а в 2019 году – 20 новых далеких спутников Сатурна. В текущем году в плане работы по теме в сервер эфемерид MULTI-SAT были включены новые спутники.

В процессе работы по теме сервер эфемерид MULTI-SAT постоянно совершенствуется. В отчетном году в сервере была уточнена выдача видимых координат небесных тел путем включения таблиц параметров ориентации Земли, регулярно выдаваемых международной службой вращения Земли IERS. Были сделаны и другие усовершенствования.

Аналитическое разложение параметров орбит тел Солнечной системы.

Получено аналитическое разложение оскулирующих элементов орбит всех больших планет Солнечной системы в компактные аналитические ряды (от 5793 до 8239 членов, в зависимости от планеты) на интервале времени 30 000 лет: 13000 г. до н.э – 17000 г. н.э. Полученные ряды по своей компактности и точности представления эфемерид планет на длительных интервалах времени (несколько десятков тысяч лет) являются уникальными.

Ведется работа по получению нового разложения приливообразующего потенциала Марса для возможного использования при обработке результатов космического эксперимента RISE в рамках текущей миссии NASA InSight к Марсу. В разложении используются современные эфемериды планет и значения масс возмущающих тел. Разложение планируется выполнить на интервале времени 2000 лет, что должно позволить лучше разделить частоты и, как следствие, повысить точность решения.

Эфемериды искусственных спутников Земли.

Разработан алгоритм автономного прогнозирования движения КА систем GPS и ГЛОНАСС в наземном навигационном приемнике на интервале времени, расширенном с 0.5-4 часов до 3-5 дней. Алгоритм показал свою высокую эффективность и может быть использован для существенного уменьшения времени «холодного» старта приемника и первого определения координат пользователя (с 30 до 6-10 сек.), а также в условиях плохой радиовидимости КА, когда приемником не могут быть удовлетворительно приняты «штатные» бортовые эфемериды спутников.

Метеорные потоки.

Анализ результатов моделирования дезинтеграции кометы 1P/Halley показал, что основная форма орбит фрагментов выброшенной массы ядра будет эллиптической. Анализ изменений эллиптических орбит фрагментов показал, что первые результаты вспышки 1991 года могли проявиться для потока эта-Акварид в 2018 году.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2019 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные сред- ства в виде субси- дии на выполнение фундаментальных научных исследо- ваний в соответ- ствии с госзадани- ем МГУ, часть 2 (р. 01 10)	6 688 000,0	6 688 000,0