

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
115021270038

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК

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

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Небесная механика и динамика космических объектов
по теме:

Небесная механика и динамика небесных тел из наблюдений
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Емельянов Н.В.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

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

_____ (Емельянов Н.В.)

Исполнители темы:

ведущий специалист , кандидат физико-математических наук

_____ (Cherupova V.M.)

ведущий специалист кандидат физико-математических наук

_____ (Варфоломеев М.И.)

_____ (Вашковьяк С.Н.)

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Гасанов С.А.)

ведущий специалист профессор, доктор физико-математических наук, профессор по кафедре

_____ (Ершков С.В.)

_____ (Кондратьев Б.П.)

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

_____ (Кудрявцев С.М.)

кандидат физико-математических наук

_____ (Уральская В.С.)

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

_____ (Ширмин Г.И.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

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

Ключевые слова по-английски:

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

Для качественного исследования движения пассивно-гравитирующего тела (ПГТ) в гравитационном поле неоднородной эллиптической галактики (ЭГ) построены две новые модели ЭГ, которые соответствуют современным представлениям о структуре таких галактик. Потенциалы в обеих моделях не разлагаются в ряд по степеням малых параметров, а берутся целиком. Это позволяет получить более точные результаты при решении дифференциальных уравнений с помощью метода численного интегрирования. Найден аналог интеграла Якоби, определена область возможности движения ПГТ и построены поверхности нулевой скорости. Установлена устойчивость в смысле Ляпунова найденных стационарных решений – точек либрации.

Определены некоторые ключевые динамические параметры эллиптических галактик на основе созданных двух новых моделей с помощью предложенного нового способа. Большинство значений таких ключевых параметров галактик, как правило, отсутствуют в базе данных астрономических объектов.

Япет является крупным регулярным спутником Сатурна. Для изучения Япета, состоящего из каменного ядра и ледяной оболочки, построена эволюционная модель. Она основана на теории неоднородных фигур равновесия, в которой применяется уравнение равновесия в конечных разностях из теории Клеро. Параметры модели определяются из наблюдений. Метод позволил уточнить, что в данную эпоху сжатие Япета не соответствует угловой скорости вращения и его оболочка находится в режиме вековой сферизации. Установлено, что Япет обладает мощной ледяной оболочкой, толщина которой составляет 50% от среднего радиуса фигуры. Разработан механизм, показывающий, что в процессе деформации и оседании масс льда ключевую роль играет каменное ядро. Сильнее всего ядро препятствует оседанию масс льда на экваторе спутника, вне же экватора сопротивление ядра быстро уменьшается. В итоге, это приводит к неравномерности в оседании льда и к образованию на Япете мощной кольцевой экваториальной горной гряды. По известной средней высоте этого хребта найдено, что в эпоху его образования период вращения Япета был в 166 раз короче нынешнего. Это согласуется с нашим исходным предположением о том, что движущим механизмом эволюции спутника было сильное замедление его вращения при захвате в резонанс 1:1. Модель предсказывает, что процесс образования ледяного горного хребта должен проходить более интенсивно на ведущем (темном, и поэтому более теплом) полушарии спутника, где лед более пластичен. Это согласуется с наблюдениями: действительно, на ведущем полушарии Япета горный хребет всюду высокий и непрерывный, а на более холодном противоположном полушарии он вырождается в разрозненные ледяные пики.

В последние годы занептунная карликовая планета Хаумеа привлекла внимание астрономов всего мира. По данным фотометрии с телескопа Хаббл, при размерах, сравнимых с Плутоном, эта планета имеет необычайно быстрое вращение (период менее 4 часов) и сильно вытянутую форму, а также два спутника и массивное кольцо. Для понимания происхождения и динамики Хаумеа надо знать её форму и строение. Для этого разработаны два базовых метода решения обратной геометрической задачи о восстановлении формы трехосного эллипсоида по его двумерной проекции на картинную плоскость и данным фотометрии. Особое внимание привлек второй метод, основанный на новой матрице поворота с тремя специальными углами, максимально адаптированными для восстановления формы эллипсоида. Исследованы геометрические свойства проекции эллипсоида и доказана важная 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. Для изучения Хаумеа составлена система из восьми уравнений. Это позволило уточнить её форму для каждого значения фотометрического параметра. Найдено изменение наклона оси вращения планеты к картинной плоскости вследствие движения Хаумеа по орбите вокруг Солнца. Важно, что с ростом параметра модель Хаумеа сильнее отклоняется от последовательности равновесных эллипсоидов Якоби. Мы приводим также аргументы в пользу того, что кольцо вокруг Хаумеа имеет эллиптическую форму и наклонено к экватору этой планеты.

Земля и Луна – единственная двойная планета в Солнечной системе. Загадка происхождения этой двойной планеты всегда привлекала внимание исследователей. Важно, что учет наблюдаемого факта смещения центра масс (ЦМ) Луны на восток может пролить дополнительный свет на проблему. С этой целью были разработаны два механизма. Показано, что одной из причин смещения ЦМ Луны к востоку является приливная эволюция орбиты и фигуры Луны в гравитационном поле Земли. И здесь необходимо учитывать тонкий эффект ориентации главной оси инерции Луны на второй фокус. Наблюдаемое отклонение ЦМ Луны к востоку заставляет из двух альтернатив выбрать тот вариант эволюции, в котором орбита Луны в раннюю историческую эпоху имела меньший эксцентриситет, чем его современное значение. Это согласуется с тем, что в настоящее время эксцентриситет лунной орбиты действительно возрастает и, следовательно, в прошлом он был меньше современного. Для полного решения проблемы смещения ЦМ был разработан второй механизм, связывающий смещение центра масс Луны к востоку с эволюцией фигуры Луны в приливном поле Земли при постепенном её удалении. Он не только объясняет эффект сдвига центра масс Луны к востоку, но и предсказывает, что сжатие фигуры Луны в раннюю эпоху могло быть значительным. В свою очередь, это позволяет установить, насколько близко к Земле могла образоваться Луна. Результаты уточняют теорию приливной эволюции Луны и проливают новый свет на загадку её происхождения.

Разработан и реализован в программном виде алгоритм прогнозирования эфемерид космических аппаратов (КА) GPS и ГЛОНАСС в навигационных приемниках на «расширенном» интервале времени (до 5-7 дней вместо «стандартных» 30 минут–2-х часов). Суть работы заключается в следующем:

- приемником принимаются и сохраняются текущие бортовые эфемери-

ды каждого навигационного КА на некотором интервале времени (до 2-х суток);

- в реальном времени в приемнике происходит определение 5 параметров, необходимых для последующего прогнозирования орбиты каждого КА: 3-х скоростей КА и 2-х координат полюса Земли на начальный момент времени;

- прогнозируются параметры движения КА на «расширенный» интервал времени до 5-7 суток.

Данный алгоритм позволяет предвычислять и использовать данные «расширенные эфемериды» КА GPS и ГЛОНАСС в навигационном приемнике. Алгоритм может использоваться при плохих условиях радиовидимости КА (например, при нахождении пользователя в «радиотени» от высоких зданий и деревьев). Также при «холодном» старте приемника время получения первого навигационного решения (определения координат пользователя) сокращается с 30 до 6-10 сек.

Значительной частью работ по теме явились исследования динамики спутников больших планет и спутников астероидов на основе наблюдений. Работы в отчетном году состояли в пополнении баз данных из разных источников, определении орбит спутников планет из наблюдений, разработке новых моделей движения и эволюции орбит спутников. Кроме того, выработывались рекомендации для организации наблюдений спутников планет с борта искусственного спутника Земли. По этим направлениям получены новые результаты.

Значительно пополнены базы данных новыми результатами наблюдений спутников больших планет и спутников астероидов, найденными в публикациях и стандартизованными для включения в базу данных.

Определены орбиты 10-ти новых далеких спутников Юпитера, открытых в 2018 году. Соответствующие модели движения включены в сервер эфемерид планет и спутников MULTI-SAT.

Выведены новые уравнения относительно большой полуоси и эксцентриситета орбиты спутника при его движении под действием деформаций в вязко-упругих телах планеты и спутника. Получены примеры их решений. Обнаружено принципиальное отличие двух из четырех новых уравнений с теми уравнениями, которые опубликованы в предшествующих работах других авторов.

Выработаны и опубликованы рекомендации по организации наблюдений спутников планет с помощью ИСЗ. Обоснована высокая эффективность таких наблюдений.

Решалась задача о вращении астероида по эллиптической орбите под действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение. Было получено новое аналитическое решение для вращения астероида с учетом только притяжения Солнца и негравитационных эффектов. В этом решении негравитационные эффекты приводят к эволюции вращения так, что астероид в результате вращается вокруг оси с максимальным моментом инерции.

Были проанализированы два метеорных потока, которые обычно связывают кометой 1P/Halley: эта-Аквариды (майские Аквариды) в восходящем узле и Ориониды в нисходящем узле орбиты кометы. Это ежегодные потоки, максимум их активности достаточно устойчив.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются две новые модели эллиптической галактики (ЭГ), согласно которым, ЭГ вместе с гало считается двухслойным неоднородным трехосным эллипсоидальным телом. Внутренний слой - светящаяся часть ЭГ представляет собой неоднородное трехосное эллипсоидальное тело, в котором преобладает барионная масса с так называемым «астрофизическим законом» распределения плотности. Внешняя часть представляет собой неоднородный сферический (или эллипсоидальный) слой, в котором преобладает темная материя (ТМ) с определенным законом распределения плотности. 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.

Япет - крупный спутник Сатурна, по итогам миссии «Кассини» привлек большое внимание особенностями своего строения. Его ведущее полушарие чёрное, а ведомое имеет высокое альbedo. Загадкой остается его экваториальный ледяной горный хребет высотой до 10 км.

В последние годы большой интерес у астрономов вызвала карликовая планета Хаумеа из пояса Койпера. По данным фотометрии с телескопа Хаббл, при размерах, сравнимых с Плутоном, эта планета имеет необычайно быстрое вращение (период менее 4 ч.) и вытянутую форму, а также два спутника и массивное кольцо. Для понимания происхождения и динамики Хаумеа надо знать её форму и строение. Однако для решения трудной обратной задачи - восстановления пространственной формы объекта по двумерной проекции на картинную плоскость и данным фотометрии, до сих пор нет общих методов решения.

Сейчас фигура и движение Луны изучается столь детально, что необходимо учитывать даже небольшую асимметрию её внутренней структуры, проявляющуюся в смещении центра фигуры Луны относительно её центра масс. Однако до сих пор сам эффект смещения не объяснен. Актуальность решения этой задачи связана с необходимостью создания современной теории вращения Луны и выяснения особенностей её происхождения и эволюции.

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 нередки ситуации, когда в условиях плохой радиовидимости спутников навигационное сообщение полностью не принимается, и, соответственно, плохо определяются координаты потребителя, если при-

нятые 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.

Важное направление исследований по теме - это динамика спутников больших планет и спутников астероидов на основе наблюдений. Работа состоит из следующих этапов: проведение наблюдений, составление баз данных, разработка теоретических моделей, уточнение моделей на основе наблюдений, создание эфемерид. Работа по теме в этом году проводилась по этим направлениям. Наблюдения мы использовали из разных источников: публикации в журналах, публикации в интернете, сообщения наблюдателей. Цель работы заключалась в создании моделей движения для их использования в науке и практике.

Рассматривалась задача о вращении астероида под действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение.

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.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

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 такой 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. Результаты приведены в виде таблиц и рисунков. Сравнение полученных значений данных параметров почти согласуется со значениями, полученными другими авторами.

Для изучения фигуры и строения спутника Сатурна Япета, состоящего из каменного ядра и мощной ледяной оболочки, развит новый подход. Методами теории фигур равновесия показано, что в данную эпоху сжатие Япета не соответствует угловой скорости вращения и его оболочка находится в режиме вековой сферизации. В основу модели положено уравнение равновесия в конечных разностях из теории Клеро, параметры этой модели берутся из наблюдений. Найдены средний радиус и сплюснутость поверхности каменного ядра. Установлено, что Япет обладает мощной ледяной оболочкой, толщина которой составляет 50% от среднего радиуса фигуры. Установлен механизм, показывающий что в процессе деформации и оседании масс льда ключевую роль играет каменное ядро. Сильнее всего ядро препятствует оседанию масс льда на экваторе спутника, вне же экватора сопротивление ядра быстро уменьшается. В итоге, это и приводит к неравномерности в оседании льда и к образованию на Япете удивительной мощной кольцевой экваториальной горной гряды. По известной из наблюдений средней высоте этого хребта найдено, что в эпоху его образования период вращения Япета был в 166 раз короче нынешнего. Это согласуется с нашим предположением о

том, что движущим механизмом эволюции спутника было сильное замедление его вращения при попадании в резонанс 1:1. Кроме того, наша модель 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 вывод согласуется с наблюдениями: действительно, на ведущем полушарии Япета горный хребет всюду высокий и непрерывный, а на более холодном противоположном полушарии он вырождается в разрозненные ледяные пики.

Разработаны два базовых метода решения обратной геометрической задачи о восстановлении формы трехосного эллипсоида по его двумерной проекции на картинную плоскость и, имея в виду астрономический аспект, по данным фотометрии. Первый метод базируется на матрице поворота со стандартными углами Эйлера, второй - на новой матрице поворота с тремя углами, максимально адаптированными для восстановления формы эллипсоида. Исследованы геометрические свойства проекции эллипсоида и доказана важная 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 актуальной астрономической задачи о пространственной форме и вращении карликовой планеты Хаумеа. Это позволило уточнить известные величины трех осей эллипсоидальной модели и её плотности для каждого значения фотометрического параметра. Найдено изменение наклона оси вращения планеты к картинной плоскости вследствие движения Хаумеа по орбите вокруг Солнца. Установлено, что с ростом параметра модель Хаумеа сильнее отклоняется от последовательности равновесных эллипсоидов Якоби. Приводятся аргументы в пользу того, что кольцо вокруг Хаумеа имеет эллиптическую форму и наклон к экватору этой планеты.

Как известно, центр масс (ЦМ) у Луны не совпадает с геометрическим центром (центром фигуры - ЦФ), причем линия, связывающая эти две точки, направлена не прямо на центр Земли, а отклоняется от него к юго-востоку. Для изучения отклонения ЦМ к востоку, у нас построена общая теория оптической либрации спутника, синхронно (в резонансе) обращающегося вокруг планеты, когда наблюдатель расположен в точке второго (пустого) фокуса эллиптической орбиты. Впервые доказано, что главная ось инерции тела спутника совершает небольшие - асимметричные по разные стороны от точки второго фокуса - нелинейные либрации с амплитудой, пропорциональной квадрату эксцентриситета орбиты. Показано, что одной из причин наблюдаемого смещения ЦМ Луны к востоку является именно эффект ориентации главной оси инерции Луны примерно на второй фокус. Основываясь на этом, разработан первый механизм сдвига ЦМ к востоку в ходе приливной эволюции орбиты Луны. Из него следует, что сам факт отклонения ЦМ Луны к востоку (а не к западу) приводит к важному результату и заставляет из двух альтернатив выбрать именно тот вариант эволюции, в котором орбита Луны в раннюю историческую эпоху имела меньший эксцентриситет, чем его современное значение. Этот вывод согласуется с тем, что в настоящее время эксцентриситет лунной орбиты действительно возрастает и, следовательно, в прошлом он был меньше современного. Для полного решения проблемы смещения ЦМ был разработан второй механизм, кото-

рый связывает смещение центра масс Луны к востоку с эволюцией формы Луны в приливном поле Земли при удалении нашего спутника. В рамках этого второго механизма, получено и решено дифференциальное уравнение, описывающее процесс смещения ЦМ Луны к востоку в ходе физически неизбежного округления ее формы при постепенном удалении от Земли. Этот механизм не только объясняет эффект сдвига центра масс Луны к востоку, но и предсказывает, что сжатие Луны в раннюю эпоху могло быть значительным и достигать значения 0.31. В свою очередь, этот результат позволяет установить, насколько близко к Земле могла образоваться Луна.

Автономное прогнозирование эфемерид навигационных КА GPS и ГЛОНАСС на расширенных интервалах времени. Основные исследования и результаты состоит 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 часов для КА GPS и 30 минут 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 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); - бло-

ки 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 параметров 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 рассогласования 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.

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. Ранее создана и поддерживается база данных наблюдений спутников больших планет NSDB. В прошлом году создана новая база данных наблюдений спутников астероидов. Работа заключается в формировании стандартных порций данных, составлении описаний наблюдений, необходимых для их использования, и размещения данных на страницах интернета. В отчетном году 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. 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 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 для определения орбит. 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. В последние годы в литературе опубликованы дифференциальные уравнения движения спутника планеты под действием приливов в вязко-упругих 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. По-

этому в отчетном году 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.

Решалась задача о вращении астероида по эллиптической орбите по действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение. Проводилось аналитическое исследование. Новым методом решались уравнения Эйлера. Было получено новое аналитическое решение для вращения астероида с учетом только притяжения Солнца и негравитационных эффектов. В этом решении негравитационные эффекты приводят к эволюции вращения так, что астероид в результате вращается вокруг оси с максимальным моментом инерции.

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 НИЯУ 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 м/с-640 м/с. Фрагменты, выброшенные с указанными скоростями, могут пополнить метеорные 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 однократно повлиять на активность потоков с последующим уменьшением этого показателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения некоторых задач небесной механики и астрофизики построены две новые модели эллиптических галактик (ЭГ). Эти модели соответствуют современным представлениям о структуре таких галактик, так как они основаны на законе распределения поверхностной яркости Хаббла для эллиптических галактик. В отличие от работ других авторов, в данной работе потенциал ЭГ не разложен в ряд по степеням малых параметров, а взят целиком. Это позволило с помощью метода численного интегрирования дифференциальных уравнений получить более точные результаты. Найден аналог интеграла Якоби, определена область возможности движения ПГТ и построены поверхности нулевой скорости. Найденны стационарные решения (точки либрации) и установлено, что коллинеарные точки либрации, находящиеся на продолжении большой оси ЭГ, не устойчивы в смысле Ляпунова, а треугольные точки либрации на продолжении средней оси – устойчивы. Применение полученных результатов ко многим реальным эллиптическим галактикам затруднено из-за отсутствия значений некоторых динамических параметров (см. выше), которые либо не определены, либо не приведены в работах других авторов, или отсутствуют в базе данных (HyperLeda, Ned, Vizier и т.д.) астрономических объектов. По этой причине, на основе созданных двух новых моделей с помощью предложенного нового способа определены ключевые динамические параметры ЭГ, перечисленные выше. Значения таких динамических параметров необходимы для применения полученных результатов к реально существующим галактикам. Полученные результаты применены к реально существующим десяти ЭГ и приведены в виде таблиц. Нерешенным остается исследование равновесия и устойчивости данных динамических систем, созданных на основе этих моделей. Подобные исследования таких динамических систем другими авторами не рассматривались. Вопрос о равновесии и устойчивости данных динамических систем целесообразно рассмотреть отдельно.

Построена эволюционная модель спутника Сатурна Япета. Показано, что в основе механизма эволюции этого спутника лежит захват его вращения в резонанс с последующим уменьшением его угловой скорости вращения. Важные коррективы в процесс оседания масс вносит каменное ядро Япета. Изменение формы ледяной оболочки и привело в итоге к образованию на поверхности спутника уникальной кольцевой экваториальной горной гряды. Наш вывод согласуется с наблюдениями: действительно, на ведущем полушарии Япета горный хребет всюду очень высокий и непрерывный, а на более холодном (ведомом) противоположном полушарии он вырождается в отдельные ледяные пики. Статья о карликовой планете Хаумеа продолжает цикл наших работ по этой теме. Здесь развит новый подход к решению важной общетеоретической задачи о восстановлении пространственной формы эллипсоида по его двумерной проекции на картинную плоскость и данным фотометрии. Метод базируется на введении новой матрицы поворота тела в пространстве с тремя углами, максимально адаптированными для решения указанной задачи. Подход доказал свою эффективность на примере карликовой планеты Хаумеа. Подчеркнем, что в этом случае решение обратной задачи сильно осложнялось вариацией альбедо по телу планеты из-за большого красного пятна на её поверхности. Разработанный метод может применяться при изучении других объектов Солнечной системы (планетоидов,

астероидов и спутников планет).

Для решения проблемы о смещении центра масс Луны на восток были разработаны два механизма. Показано, что одной из причин смещения ЦМ Луны к востоку является совокупное действие эффекта ориентации главной оси инерции Луны на второй фокус и приливной эволюции орбиты Луны. Наблюдаемое отклонение ЦМ Луны к востоку (а не к западу) заставляет из двух альтернатив выбрать именно тот вариант эволюции, в котором орбита Луны в раннюю историческую эпоху имела меньший эксцентриситет, чем его современное значение. Это согласуется с тем, что в настоящее время эксцентриситет лунной орбиты действительно возрастает и, следовательно, в прошлом он был меньше современного. Для полного решения проблемы смещения ЦМ был разработан второй механизм, связывающий смещение центра масс Луны к востоку с эволюцией фигуры Луны в приливном поле Земли при постепенном удалении нашего спутника. Второй механизм не только объясняет эффект сдвига центра масс Луны к востоку, но и предсказывает, что сжатие фигуры Луны в раннюю эпоху могло быть значительным и достигать значения примерно 0.31. В свою очередь, это позволяет установить, насколько близко к Земле могла образоваться Луна. Результаты уточняют теорию приливной эволюции Луны и проливают новый свет на загадку её происхождения.

Разработанный алгоритм прогнозирования движения КА систем GPS и ГЛОНАСС в навигационном приемнике на «расширенном» интервале времени до нескольких дней на основе принятых и сохраненных приемником бортовых эфемерид КА 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 КА.

Для проведения работы по теме мы использовали наблюдения спутников планет, опубликованные в циркулярах Центра малых планет (MPC), наблюдения спутника астероида Каллиопа Линуса, выполненные сотрудником ГАИШ Сафоновым Б.С. на телескопе КГО ГАИШ, а также наблюдения, опубликованные в разных научных журналах мира. Наблюдения спутника астероида были проверены с помощью эфемерид, разработанных ранее для этого спутника. В следующем году планируется определение орбиты и динамических параметров системы Каллиопа-Линус на основе всех наблюдений. В плане подготовки к будущим определениям параметров орбит спутников астероидов была значительно пополнена база данных наблюдений этих объектов. Данные собирались из разных источников: публикации, сообщения наблюдателей. Данные приводились к виду, удобному для использования. Адрес базы данных в интернете

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/obspos/babine.htm>

В 2018 году были открыты 10 новых далеких спутников Юпитера. В ходе работы по теме были определены орбиты этих новых спутников, соответствующие эфемериды включены в сервер эфемерид MULTI-SAT. Адрес сервера MULTI-SAT в интернете <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/indexr.htm>

Значительным результатом работы по теме стала новая теория эволюции орбиты спутника под воздействием приливов в вязко-упругих телах планеты и спутника. Выведены новые уравнения и получены примеры их решений

относительно большой полуоси и эксцентриситета орбиты спутника. Обнаружено принципиальное отличие двух из четырех новых уравнений с теми уравнениями, которые опубликованы в предшествующих работах других авторов. В ГАИШ МГУ разрабатывается проект наблюдений небесных тел с помощью нового телескопа, который планируется установить на международной космической станции. Требовалось обосновать необходимость и эффективность наблюдений спутников планет с помощью этого нового средства. Это было сделано в рамках работы по теме. Соответствующая статья опубликована в научном журнале.

В задаче о вращении астероида по эллиптической орбите по действием солнечной радиации, вызывающей негравитационное влияние на вращение, получено новое аналитическое решение в котором негравитационные эффекты приводят к эволюции вращения так, что астероид в результате вращается вокруг оси с максимальным моментом инерции.

Анализ результатов моделирования дезинтеграции кометы 1P/Halley на участке от перигелия до точки вспышки показал, что основная форма орбит фрагментов выброшенной массы ядра будет эллиптической. Фрагменты с диапазоном скорости выброса в пределах 280 м/с–640 м/с могут пополнить метеорные майских Акварид и Орионид. Фрагменты, имеющие скорость выброса 700-800 м/с либо пополнят спорадический фон, либо возникнут новые метеороидные образования.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2018 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)	0,0	0,0