

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Перминова Александра Сергеевича на тему:  
«Численно-аналитическое исследование  
динамической эволюции четырехпланетных систем  
на космогонических интервалах времени»  
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

**Цель исследования** диссертационной работы Александра Сергеевича Перминова заключается в разработке нового численно-аналитического метода решения планетной задачи пяти гравитирующих тел и его применении для исследования орбитальной эволюции трёхпланетных и четырёхпланетных систем с умеренными значениями эксцентриситетов и наклонов орбит на космогонических интервалах времени.

**Актуальность темы**

Диссертационная работа А.С. Перминова посвящена двум взаимосвязанным темам: 1) исследованию динамики планет Солнечной системы на космогонических (вплоть до миллиардов лет) интервалах времени, а также 2) изучению вековой эволюции систем экзопланет у других звезд. Классическая задача по динамике Солнечной системы привлекает внимание ученых уже более трех столетий, а недавнее открытие экзопланет у других звезд дало новый импульс развитию небесной механики и совершенствованию методов компьютерного моделирования. Повышенный интерес к этим задачам обусловлен их важным значением для современной астрономии, космогонии и естествознания в целом. Прогресс в изучении динамики небесных тел напрямую связан с освоением огромного массива наблюдательной информации, что и предопределяет актуальность данной диссертационной работы.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 170 страниц, включая 43 рисунка и 44 таблицы. Список литературы включает 105 наименований.

Во **Введении** дана постановка задачи и её обоснование (актуальность, цели работы, новизна, научная и практическая ценность), выносимые на защиту результаты, краткое изложение содержания работы, а также перечень основных публикаций, конференций и семинаров, где докладывались результаты диссертации.

В **Главе 1** представлен обзор современного состояния исследований по динамической эволюции планетных систем. Дается информация об известных аналитических теориях (метод малого параметра, различные методы осреднения, КАМ-теория), обсуждаются результаты расчетов, полученных с помощью высокоточных численных эфемерид; ценным является анализ теорий движения больших планет Солнечной системы на космогонических интервалах времени. Причиной возникновения хаоса во внешней части Солнечной системы является перекрытие зон резонансов, и автор приводит примеры резонансов в орбитальном движении планет. На интервалах времени в несколько миллионов лет движение планет в Солнечной системе является почти-периодическим и полностью предсказуемо. Однако на масштабах времени в несколько миллиардов лет орбиты планет земной группы вступают в область хаотичности. Через десятки миллиардов лет движение внутренних планет уже полностью хаотично, однако движение планет-гигантов остается еще почти-периодическим.

В **Главе 2** представлен метод разложения гамильтониана четырёхпланетной задачи в ряд Пуассона по степеням малого параметра  $\mu$  и по элементам второй системы переменных Пуанкаре. Расчеты проводятся в системе координат Якоби. С помощью системы компьютерной алгебры Piranha получено разложение гамильтониана четырёхпланетной задачи в ряд Пуассона по элементам орбит до квадрата  $\mu^2$  и до куба малого параметра  $\mu^3$ . Роль малого параметра играет отношение суммы масс планет к массе звезды (для Солнечной системы это отношение может быть выбрано равным 0.001). Разложение гамильтониана до  $\mu^3$  используется для исследования орбитальной

динамики планет-гигантов Солнечной системы, а разложение до  $\mu^2$  используется для менее точных расчетов орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем. Автор использует следующий прием: вначале приводятся алгоритмы построения классических разложений небесной механики для декартовых координат и радиуса-вектора планеты, затем эти разложения используются как базовые для построения рядов, представляющих гамильтониан планетной задачи.

В зависимости от характера решаемой задачи, построено три варианта разложения гамильтониана планетной задачи в ряд Пуассона по элементам второй системы Пуанкаре и по степеням малого параметра. Рассчитана относительная точность построения гамильтониана для планет-гигантов Солнечной системы, равная  $1.7 \cdot 10^{-12}$ . Дается оценка точности разложения в ряд гамильтонианов для внесолнечных планетных систем, построенных до  $\mu^2$ .

**Третья глава** содержит описание алгоритма метода Хори-Депри, с помощью которого проводится осреднение гамильтониана задачи. В основе метода Хори-Депри лежит применение системы компьютерной алгебры Piranha и использование скобок Пуассона. Осреднение гамильтониана проводится по быстрому переменным, то есть по средним долготам.

При осреднении получены ряды, представляющие гамильтониан задачи в средних элементах. Это позволяет записать правые части уравнений движения в средних элементах с точностью до куба по малому параметру, а функции замены переменных — до квадрата  $\mu^2$ .

**Глава 4** содержит результаты расчетов орбитальной эволюции четырехпланетной системы Солнце - Юпитер - Сатурн - Уран - Нептун планет-гигантов Солнечной системы на интервале времени 10 млрд. лет. Здесь диссертант применяет метод численного интегрирования построенных им уравнений движения в средних элементах. Проведено сравнение результатов интегрирования уравнений движения в первом, втором и третьем порядках по малому параметру. Показано, что движение планет-гигантов имеет почти-периодический характер, а значения эксцентриситетов и наклонов орбит

остаются малыми на всём интервале моделирования.

Диссертант проводит сравнение полученных результатов с теориями движения других авторов и результатами численного интегрирования ньютоновских уравнений движения. Как и ожидалось, периоды элементов орбит в третьем приближении наиболее близки к результатам численных теорий. Расхождения между периодами изменения наклонов орбит, полученными различными численными методами и по данным численно-аналитической теории движения третьего порядка, не превосходят 0.1% для всех планет. Орбитальные характеристики Юпитера и Сатурна найдены с повышенной точностью (расхождения составляют всего 0.01%). Для Урана и Нептуна расхождения для эксцентриситетов орбит не превышают 0.3% и 0.6% соответственно. Для эксцентриситетов орбит расхождения достигают 1% при сравнении с результатами работы Ласкара. Результаты расчетов представлены на рисунках, где показаны не только периодические изменения эксцентриситета и наклона для четырех орбит планет-гигантов, но и даны графики для либраций узлов и линии апсид. Для сравнения, проведено моделирование эволюции планет-гигантов Солнечной системы для набора близких начальных условий и для начальных условий, соответствующих численным эфемеридам. Показано, что время Ляпунова для орбит планет-гигантов составляет около 10-30 млн лет. Найдены начальные условия, при которых значение показателя МЕСХО, характеризующего степень расхождения изначально близких траекторий и наличие хаоса в системе, достигает значения около 100 на интервале времени 100 млн лет.

**В Главе 5** изучается орбитальная эволюция многопланетных систем у других звезд. Речь идет о двух трёхпланетных системах GJ 3138, HD 39194 и о паре четырёхпланетных систем HD 141399, HD 160691. Решение задачи для различных начальных условий осложняется тем, что элементы орбит и массы экзопланет известны с меньшей точностью, чем для планет Солнечной системы, а некоторые элементы орбит экзопланет вообще неизвестны. В диссертации показан способ, позволяющий варьированием неизвестных и из-

вестных из наблюдений с ошибками элементов орбит определить области начальных данных, соответствующих устойчивому характеру орбитальной эволюции на всём интервале моделирования.

Применяемая численно-аналитическая теория движения позволяет исследовать орбитальную эволюцию внесолнечных планетных систем с умеренными значениями наклонов и эксцентриситетов орбит, флипы орбит не рассматривались.

Изучая динамическую эволюцию экзопланетных систем, автор проводит сравнение результатов численно-аналитической теории с данными численного моделирования. Методом подбора находятся начальные условия, которые оставляют систему планет динамически устойчивой или же приводят к её разрушению. Метод позволяет определить наиболее вероятные значения неизвестных из наблюдений долгот восходящих узлов и аргументов перицентров, а также сузить диапазон возможных значений наклонов и эксцентриситетов орбит.

В **Заключении** делаются основные выводы по результатам диссертационного исследования и обозначены направления дальнейшей работы.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Все задачи, поставленные в данной диссертации, четко сформулированы, а научные положения и выводы строго обоснованы. Результаты диссертации являются новыми, актуальными и вносят существенный вклад в исследование динамических моделей Солнечной системы и в изучение орбитальной эволюции трёхпланетных и четырёхпланетных систем экзопланет на космогонических интервалах времени. В диссертации дано исчерпывающее обоснование разработанных методов исследования и полученных новых научных результатов и выводов. Диссертантом было изучено и критически проанализировано огромное количество публикаций, что подтверждается списком цитируемой литературы, состоящим из 170 работ. Обоснованность

научных результатов является следствием применения адекватного математического аппарата и использования разумных предположений о реальных свойствах планетных систем.

### **Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Все выносимые на защиту результаты являются новыми, опубликованы в научной печати и прошли апробацию, подтвердившую их значимость и новизну. Новизна диссертационного исследования не вызывает сомнений. Достоверность полученных автором диссертации результатов не вызывает сомнений. Отметим наиболее важные результаты: метод разложения гамильтониана четырёхпланетной задачи, записанного в системе координат Якоби, в ряд Пуассона по элементам второй системы Пуанкаре; алгоритмы построения рядов, представляющих производящую функцию осредняющего преобразования и гамильтониан задачи в средних элементах методом Хори-Депри, получения на их основе правых частей уравнений движения и функций замены переменных; параметры орбитальной эволюции четырёхпланетной системы Солнце - Юпитер - Сатурн - Уран - Нептун на интервале времени 10 млрд. лет на основе результатов численного интегрирования построенных уравнений движения в средних элементах; параметры орбитальной эволюции планетных систем GJ 3138, HD 39194, HD 141399 и HD 160691 для набора различных начальных условий и определение условий устойчивости на космогонических интервалах времени. Все эти результаты диссертационной работы обладают научной и практической ценностью.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На стр. 26 во втором абзаце, где говорится о резонансах орбитальных движений планет Солнечной системы, есть две ошибки:

- 1.1 во втором предложении автор говорит о трехчастичном резонансе 3:5:7 у планет Юпитер-Сатурн-Уран (что неверно, так как для первых двух планет фундаментальный резонанс, как известно, равен 2:5);
- 1.2 продолжая серию ошибок, в том же предложении утверждается, что указанный выше трехчастичный резонанс 3:5:7 имеет место и для другой тройки планет Сатурн-Уран-Нептун, что также не соответствует реальности.

Кстати, в том же абзаце на стр. 26 для планет Уран-Нептун вместо 5:7 дано правильное значение резонанса 1:2.

2. На стр. 28 диссертации при обсуждении выводов из расчетов говорится: «... оба типа начальных условий не расположены всюду плотно в фазовом пространстве», а на стр. 8 автореферата утверждается обратное – « ... расположены всюду плотно».
3. В Главе 4 при вычислении периодов либраций узлов орбит автор говорит исключительно о том случае, когда узлы орбит определяются их пересечением с плоскостью эклиптики. Но было бы весьма интересно рассчитать движение узлов также в неизменной плоскости Лапласа, так как именно в этом случае строго выполняется закон сохранения углового момента, а либрационный режим эволюции для узлов сменяется на режим вековой прецессии. Такой расчет позволил бы не только более полно проиллюстрировать метод, предложенный в диссертации, но и получить полезные новые сведения о вековой эволюции планет Солнечной системы.
4. На стр. 76 встречаем загадочную фразу «Вековое движение узлов орбит проявляется на интервале времени 10 млрд лет со скоростью около  $-0.8''$  за 1 млрд лет для всех планет. По физическому смыслу, у орбиты каждой планеты должен быть свой период вековой прецессии узла, причем говорить об этом можно только при использовании плоскости Лапласа, а не эклиптики.

Есть ряд и более мелких замечаний.

5.1 В Главе 4 автор не обращает внимания и не объясняет найденный им эффект асимметрии в графике для либрации узла Урана (крутое нарастание угла либрации и более пологое его убывание).

5.2 Интервал интегрирования в 2 миллиона лет на рисунке 4.2 не позволяет определить периодический характер эволюции эксцентриситета и либрации узла для Нептуна (наверное, интервал расчета следовало бы увеличить и немного изменить масштаб).

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Перминов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Государственный астрономиче-



ский институт имени П.К. Штернберга, отдел небесной механики, ведущий  
научный сотрудник

Кондратьев Борис Петрович

Контактные данные:

тел.: 7(495)939 26-50, e-mail: [work@boris-kondratyev.ru](mailto:work@boris-kondratyev.ru).

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

119234, Москва, Университетский проспект, д. 13,

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Государ-  
ственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

Телефон: +74959392046, e-mail: [director@sai.msu.ru](mailto:director@sai.msu.ru)

Подпись сотрудника МГУ Б.П. Кондратьева удостоверяю:

начальник отдела канцелярии

Л.Н. Новикова