

**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**

На основании п. 3.8 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, «Оппонент на основе изучения диссертации и опубликованных работ по теме диссертации представляет в диссертационный совет письменный отзыв на диссертацию, в котором оцениваются **актуальность избранной темы, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**, а также дается заключение о соответствии диссертации критериям, установленным настоящим Положением».

Исследование орбитальной эволюции Солнечной и других открытых планетных систем, число которых постоянно возрастает, представляет значительный интерес и является одной из фундаментальных задач небесной механики.

В течение последних десятилетий благодаря развитию наблюдательной и вычислительной техники круг задач, рассматриваемых в рамках небесной механики, значительно расширился. Произошло заметное увеличение точности представления движения основных тел Солнечной системы на интервалах времени до тысяч лет и качественного описания основных свойств движения на космогонических интервалах времени (порядка  $10^4$  –

$10^{10}$  лет). Новые наблюдательные средства и методы позволили в последние годы открыть тысячи внесолнечных планетных систем, сотни из которых являются многопланетными. Построению численно-аналитической теории движения третьего порядка по массам планет для четырехпланетной задачи и посвящена диссертационная работа А.С. Перминова. Используя разработанную теорию, изучена динамическая эволюция системы Солнце–Юпитер–Сатурн–Уран–Нептун и эволюция внесолнечных планетных систем GJ 3138, HD 39194, HD 141399, HD 160691.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации 171 страница. В диссертации 44 таблицы и 43 рисунка. Список использованной литературы содержит 113 названий. По теме диссертации автором опубликовано 12 работ, из них 7 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI. Все работы написаны в соавторстве, вклад диссертанта указан. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 24 конференциях. Имеется 5 публикаций в трудах конференций и опубликованы тезисы 12 докладов.

Во Введении формулируются цели и задачи исследования и дается их обоснование (актуальность, новизна, научное и практическое значение), приводятся полученные результаты, даются выносимые на защиту положения и результаты, описывается структура диссертации.

В первой главе дается исторический обзор и обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены методы изучения орбитальной эволюции Солнечной системы. Анализируются методы построения и принятые модели возмущающих сил, интервалы применимости и точности прогнозирования координат планет. Рассмотрены современные численные теории построения высокоточных эфемерид на интервалах времени до нескольких тысяч лет, и теории движения, описывающие эволюцию больших планет Солнечной системы на космогонических интервалах. Представлен обзор текущего

состояния в области исследования внесолнечных планетных систем. Выделены актуальные направления исследования.

Во второй главе приводится описание алгоритма разложения функции Гамильтона планетной системы в ряд Пуассона по степеням малого параметра  $\mu$  (отношение суммы масс планет к массе звезды) и по элементам второй системы Пуанкаре и построено три варианта разложения. Относительная точность построения гамильтониана для планет-гигантов Солнечной системы составляет  $1.7 \cdot 10^{-12}$ . Разложение гамильтониана, построенное до  $\mu^3$ , используется для исследования орбитальной динамики планет-гигантов Солнечной системы. Разложение гамильтониана, построенное до  $\mu^2$ , используется для исследования орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем.

В третьей главе представлен алгоритм метода Хори–Депри построения осредненных уравнений движения четырехпланетной задачи в элементах второй системы Пуанкаре, который реализуется с помощью системы компьютерной алгебры Piranha. Уравнения движения в средних элементах построены с точностью до куба по малому параметру, а функции замены переменных – до квадрата.

В четвертой главе приводятся результаты изучения орбитальной эволюции планет-гигантов Солнечной системы, полученных численным интегрированием разработанных автором уравнений движения в средних элементах. Показано, что на интервале 10 млрд. лет движение планет имеет почти-периодический характер, эксцентриситеты и наклоны орбит планет остаются малыми. Оценено время Ляпунова для орбит планет-гигантов, которое составляет 10–30 млн. лет. Сравнение построенной теории движения с результатами численного интегрирования ньютоновских уравнений движения показало, что построенная теория движения позволяет с высокой точностью проводить моделирование орбитальной эволюции. Указываются задачи, для решения которых она может быть использована.

В пятой главе приводятся результаты качественного и количественного исследования орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем GJ 3138, HD 39194, HD 141399, HD 160691 с помощью осредненной теории движения на интервале 1 млн. лет. Особенностью орбит этих планет является отсутствие некоторых элементов и заметные значения ошибок других элементов. На основе моделирования динамической эволюции этих систем определены допустимые значения орбитальных параметров при предположении, что наблюдаемые планетные системы эволюционируют достаточно долгое время и являются устойчивыми. Определены наиболее вероятные значения неизвестных из наблюдений долгот восходящих узлов и аргументов перигелиев. Выполнен поиск резонансных областей и определены их границы по значениям масс планет и больших полуосей орбит. Планетные системы GJ 3138, HD 39194 являются нерезонансными для всех значений варьируемых параметров.

В заключении обобщаются основные полученные результаты.

Представленный А.С. Перминовым к защите комплекс научно-методических разработок и исследований вносит существенный вклад в развитие актуального направления астрономии, а именно, исследования орбитальной эволюции Солнечной системы и внесолнечных планетных систем на космогонических интервалах времени.

Особенный интерес представляют следующие разработки автора, имеющие значительную степень оригинальности и новизны:

1. Реализован алгоритм разложения гамильтониана планетной задачи, записанного в системе координат Якоби, в ряд Пуассона по элементам второй системы Пуанкаре и степеням малого параметра вплоть до куба. Важно то, что коэффициенты в рядах сохраняются в виде дробно-



рациональных чисел произвольной точности, что позволяет исключить ошибки округления.

2. Реализован алгоритм метода Хори–Депри для получения рядов, представляющих производящую функцию преобразования между оскулирующими и средними элементами (с точностью до квадрата малого параметра задачи) и гамильтониан задачи (с точностью до куба малого параметра задачи).
3. Для выполнения аналитических выкладок использована современная высокопроизводительная система компьютерной алгебры Piranha, представляющая собой эшелонированный пуассоновский процессор .
4. С помощью разработанной численно-аналитической теории движения, построенной до куба малого параметра задачи, исследована динамика четырехпланетной модели Солнечной системы (Солнце – Юпитер – Сатурн – Уран – Нептун) на интервале 10 млрд. лет. Показано, что движение планет имеет почти–периодический характер. Интегрирование уравнений движения с близкими начальными условиями показало, что время Ляпунова для орбит планет-гигантов составляет около 10–30 млн.лет.
5. С помощью разработанной численно-аналитической теории движения, построенной с точностью до квадрата малого параметра задачи, исследована динамика внесолнечных планетных систем GJ 3138, HD 39194, HD 141399, HD 160691. Для этих планетных систем определены максимально достижимые на интервале моделирования значения средних эксцентриситетов и наклонов орбит и выявлены начальные условия, приводящие к экстремальному росту этих параметров, следствием чего может быть потеря устойчивости и разрушение системы. Показан способ определения наиболее вероятных значений долгот восходящих узлов и аргументов перицентров, неизвестных из наблюдений, и оценки диапазона возможных значений наклонов и эксцентриситетов орбит.

Текст диссертации изложен логично и хорошо дополнен таблицами и рисунками.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. Стр. 5. “Появление околоземной астрономии” – не вполне понятно. По-видимому, подразумевается “развитие космических средств и методов наблюдений”.
2. Стр. 22, 4-ый абзац. “К 1980 г. усилиями Ленинградского института прикладной астрономии АН СССР...” Правильно – теоретической астрономии.
3. Стр. 34. 1-ый абзац. Написано, что “данные о массе звезды HD 39194 отсутствуют“. Это не соответствует имеющейся в интернете информации. На сайте [https://ru.wikipedia.org/wiki/HD\\_39194](https://ru.wikipedia.org/wiki/HD_39194) со ссылкой на работу *M. Gillon et al. The Spitzer search for the transits of HARPS low-mass planets – II. Null results for 19 planets, arXiv: 1701.01303 (2017)* приводится значение массы  $(0.72 \pm 0.05) M_{\text{Sun}}$ .
4. На стр. 95 приводятся значения параметров орбит планет систем GJ 3138, HD 39194, HD 141399, HD 160691 со ссылкой на интернет-ресурс [www.exoplanet.en/catalog](http://www.exoplanet.en/catalog). Однако не указаны даты обращения автора к этому ресурсу. По-видимому, обновлением данных можно объяснить то, что в табл. 5.2 значения всех параметров отличаются от данных каталога, а в табл. 5.1 – отличаются интервалы значений масс планет GJ 3138 с и GJ 3138 d.
5. Стр. 95. Замечание относится к представлению данных в таблицах 5.1, 5.3. В каталоге ([www.exoplanet.en/catalog](http://www.exoplanet.en/catalog)) для части параметров приводятся их среднеквадратические ошибки, а для части – интервалы

значений. Эти последние автор переносит в свои таблицы 5.1, 5.3 как среднеквадратические ошибки, т.е.  $0.451_{-0.03}^{+0.03}$  представляется как  $0.451 \pm 0.03$ . Это некорректно.

6. Стр. 97. Написано: “Массы планет выбираются равными своим минимальным значениям, без учета погрешности”. Это непонятно, т.к. минимальное значение можно получить из номинального только с учетом погрешности.
7. Стр. 104. Непонятна фраза: “Шаг варьирования начальных значений  $\omega_b$ ,  $\omega_d$  and  $\Omega_b$  меньше и равен  $0^\circ$ ”.
8. Стр. 132. Написано: “Массы планет варьируются в диапазоне от минимально возможного до максимально допустимых значений (не более 13 масс Юпитера – теоретический предел массы планеты).” “Минимально возможное” не объяснено.

#### Замечания по оформлению:

1. Стр.18-19. Отсутствуют ссылки на литературу для некоторых авторов.
2. Стр. 89. Рис. 4.15. По оси ординат указана величина  $\sigma$ , а в тексте написано, что величина  $\sigma_k$ .
3. Стр.109, рис.5.13. По оси ординат отсутствует указание величины.
4. Стр. 134, табл. 5.16. Неверно показаны некоторые нижние индексы  $m_3$ .

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 физ.-мат. наук,  
Ведущий научный сотрудник  
Лаборатории малых тел Солнечной системы  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института прикладной астрономии Российской академии наук  
ЧЕРНЕТЕНКО Юлия Андреевна

18 ноября 2022 г.

Контактные данные:

тел.: 7(921)8839048, e-mail: [суа@iaaras.ru](mailto:суа@iaaras.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

191187, РФ, г. Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д.10,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт прикладной астрономии Российской академии наук,  
Лаборатория малых тел Солнечной системы  
Тел.: +7 (812) 275 11 18; e-mail: [iaaras@iaaras.ru](mailto:iaaras@iaaras.ru)

Подпись сотрудника ИПА РАН Ю.А. Чернетенко  
удостоверяю:  
ученый секретарь ИПА РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



М.В. Васильев  
18 ноября 2022 г.