

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Микрюкова Дениса Викторовича «Эволюция слабозмущенной планетной системы на космогонических временах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 — «астрометрия и небесная механика»

Количество планет, обнаруженных за последние два десятилетия у других звёзд, уже превысило 4000. Большая часть из найденных планетных систем существенно отличается от Солнечной системы; входящие в них планеты могут обладать как весьма большими массами (являются газовыми гигантами), так и орбитами со значительными эксцентриситетами ( $e > 0.2$ ) и наклонениями. Благодаря этому, долговременная орбитальная динамика таких планетных систем должна обладать большим разнообразием, в частности может быть неустойчивой на достаточно коротких временах. Всё указанное выше требует разработки новых эффективных методов исследования долговременной орбитальной динамики планетных систем. Настоящая диссертационная работа Дениса Викторовича Микрюкова посвящена весьма актуальной и важной в настоящее время проблеме — разработке численно-аналитических методов изучения долговременной эволюции планетных систем.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и шести приложений. Во введении к диссертационной работе дано описание истории развития методов исследования динамики планетных систем. Обоснована актуальность темы диссертационного исследования, его научная новизна, определены цели работы и решаемые в ней задачи, приведены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведена модификация алгоритма М.Ф.Субботина (Субботин, Введение в теор. астрон., 1968) по разложению основных функций кеплеровского движения планеты в степенной ряд по вещественным элементам Пуанкаре посредством замены их на комплексные элементы. Получены разложения основных функций кеплеровского движения по комплексным элементам Пуанкаре. Выполнена оценка эффективности использования комплексных элементов, показавшая существенное сокращение количества членов в различных разложениях по сравнению со случаем использования вещественных элементов Пуанкаре.

Во второй главе в рассматриваемой задаче определены гелиоцентрические координаты Уинтнера (Уинтнер, Аналитические основы неб. механ., 1967) и в них проведено разложение гамильтониана системы в ряд Пуассона. Методом Ласкара–Робютеля (Laskar, Robutel, 1995, CMDA, 62, 193) построено разложение обратного расстояния между двумя планетами. Рассмотрены практические аспекты разложения возмущающей функции — приведены алгоритм определения коэффициентов ряда и метод оценки числа его слагаемых в фиксированном отрезке разложения.

В третьей главе посредством метода осреднения Хори–Депри (Hori, 1966, PASJ, 18, 287; Deprit, 1969, CMDA, 1, 12) в комплексных элементах Пуанкаре построены системы осредненных уравнений движения первого и второго приближений. В двухпланетной задаче построено разложение осредненного гамильтониана в ряд Пуассона. Получены оценки числа слагаемых в правых частях осредненных уравнений движения и в осредненном гамильтониане.

В четвертой главе разработанный автором диссертации численно-аналитический метод применен для исследования долговременной орбитальной динамики ряда модельных систем (из двух и трех планет) и двух реальных планетных систем (HD 12661 и u Andromedae). Проведена оценка точности результатов интегрирования систем осредненных уравнений первого и второго приближений по сравнению с результатами интегрирования системы исходных уравнений движения.

Заключение содержит основные результаты диссертационного исследования. В приложениях приведены дополнительные материалы, используемые при проведении теоретических исследований, описанных в первых трех главах диссертации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в использовании комплексных элементов Пуанкаре, за счет этого разложения основных элементов, возмущающей функции и система осредненных уравнений движения имеют более компактный вид (содержат существенно меньше членов). Отмечу использование вместо широко используемых в аналогичных исследованиях координат Якоби гелиоцентрических координат Уинтнера, позволяющих, в частности, получить более удобное для практического использования представление возмущающей функции. Кроме того, разложение обратного расстояния между двумя планетами в представлении возмущающей функции проведено посредством метода Ласкара–Робютеля, а не обычно используемого в данной задаче метода Эллиса–Мюррея (Ellis, Murray, 2000, Icarus, 147, 129).

Первые три главы диссертации посвящены теоретической разработке численно-аналитического метода исследования долговременной орбитальной динамики планетной системы. Широкое использование в диссертационной работе для проведения аналитических вычислений систем компьютерной алгебры позволяет говорить о корректности и достоверности представленного в работе материала. Обоснованность и достоверность выводов диссертационного исследования подтверждают проведенные в четвертой главе диссертации численные эксперименты по сравнению результатов, полученных посредством разработанного метода, с результатами численного интегрирования системы точных уравнений движения. Установлена хорошая точность и подтверждена высокая эффективность нового метода, предложенного в настоящем диссертационном исследовании. Разработанный в диссертации метод и ряд промежуточных результатов могут использоваться на практике исследователями из профильных научных организаций России (ГАО РАН, ИПА РАН, ГАИШ МГУ) и мира.

По работе следует сделать ряд замечаний.

1. Во введении на стр.12 указано: «Основной целью настоящей работы является разработка численно-аналитического метода и его применение к исследованию орбитальной эволюции близких к *круговым* и компланарным планетных систем типа Солнечной на космогонических временах». В то же время в качестве реальных систем (см. Главу 4), для которых используется этот метод, выбраны планетные системы со значительными эксцентриситетами ( $e = 0.2-0.35$ ) орбит и массами, соответствующими газовым гигантам. Чем обусловлен этот выбор?
2. В разделе 1.6 приведено разложение функции  $z_1 = e \sin M$ , в Приложении А содержится компьютерное представление данного разложения с описанием структуры файла. Непонятен смысл включения указанного приложения в диссертацию. Было бы полезным разместить все полученные в Главе 1 разложения в свободном доступе в сети Интернет, по аналогии с полученным в диссертации разложением возмущающей функции (см. Глава 2, стр. 51–52).
3. При проведении аналитических вычислений использовались две системы компьютерной алгебры Piranha (Главы 1 и 2) и Maxima (Главы 2 и 3). Чем было обусловлено использование разных систем? Нет и краткого описания этих систем в самом тексте диссертации.

4. Фраза на стр. 59: «Машинное хранение коэффициентов  $C_{lwn}$  мы организовали в виде дерева, имеющего понятную и удобную для дальнейшего использования структуру» нуждается в дополнительном пояснении, поскольку отсутствует описание самой структуры и нет указания места, где хранятся указанные коэффициенты.
5. Подраздел 3.5.4 следовало отнести к Главе 4, поскольку в этом подразделе указаны основные параметры и приведены предположения, применяющиеся при численном интегрировании вековой динамики избранных планетных систем, результаты которого описаны именно в четвертой главе.
6. В Главе 4 рассмотрена вековая орбитальная динамика ряда модельных и двух реальных планетных систем. В разделе 4.1.1 вывод об устойчивости долговременной динамики модельной системы вероятно сделан посредством визуального анализа эволюции её элементов на конечном (хотя и относительно длинном) интервале времени. Вывод об устойчивости системы следует делать посредством использованием строгих индикаторов устойчивости, например, путем вычисления и анализа значений параметра MEGNO или показателей Ляпунова.
7. В разделе 4.1.2 рассмотрена динамика планетных систем HD 12661 (см. также раздел 4.2.2) и в Andromedae. На рисунках 4.5–4.7 приведена эволюция некоторых элементов орбит планет в этих системах. Схожие рисунки для этих систем имеются в работах Rodríguez & Gallardo (2005, AJ, 628, 1006) и Libert & Sansottera (2013, CMDA, 117, 149). В диссертации следовало детально остановиться на описании результатов, полученных в этих работах. Тем более, что в указанных выше работах решались задачи и использовались методы схожие с теми, что рассматривались в настоящей диссертации.
8. В разделе 4.2 проведено сопоставление вековой динамики планетных систем, определяемой осредненными уравнениями движения первого и второго приближений. Сделан вывод, что период вековых колебаний величин эксцентриситетов планетных орбит изменяется при переходе от одного приближения к другому. Установленное в диссертации относительное изменение величины периода колебаний эксцентриситета для двухпланетной модельной системы составляет около 1%, а для системы HD 12661 — около 3%, т. е. в каждом случае весьма мало. В диссертации не указано, каким образом оценивался данный период. Отмечу, что в случае системы HD 12661 автор диссертации сопоставляет свои оценки величины периода со значением периода, полученным в работе Rodríguez & Gallardo (2005, AJ, 628, 1006) посредством применения спектрального анализа.

Отмеченные выше недостатки не влияют на высокую оценку диссертационной работы Д.В.Микрюкова. Сделанные в работе выводы и заключения являются новыми и оригинальными. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата и сравнением с результатами других авторов. Опубликованные работы и автореферат верно отражают содержание диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах из текущего перечня ВАК РФ, причем три из четырех работ выполнены без соавторов. Диссертация весьма аккуратно оформлена и написана в хорошем стиле. Автор диссертации провел значительное научное исследование в рамках рассматриваемой темы, уровень и значимость

полученных в работе научных результатов несомненно являются высокими. Отдельно отмечу высокий уровень математической подготовки автора диссертации.

Считаю, что диссертация «Эволюция слабозвмущенной планетной системы на космогонических временах» является законченной научно-исследовательской работой, полностью удовлетворяет высоким требованиям ВАК РФ, а её автор, Микрюков Денис Викторович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 — «астрометрия и небесная механика».

27 апреля 2021 г.

Официальный оппонент,  
старший научный сотрудник  
Лаборатории динамики Галактики ГАО РАН  
(196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65/1),  
доктор физ.-мат. наук  
(e-mail: melnikov@gaoran.ru)

А.В.Мельников

Подпись с.н.с. ГАО РАН А.В.Мельникова заверяю

Ученый секретарь ГАО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



Т.П.Борисевич