АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктор философии» (PhD)
по образовательной программе «8D05403 -Механика»

КОШЕРБАЕВА АЙКЕН БАКЫТЖАНОВНА

N (N>2) ПЛАНЕТНАЯ ЗАДАЧА МНОГИХ ТЕЛ С МАССАМИ, ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПАХ

Общая характеристика работы. В данной работе рассматривается N планетная задача многих сферически симметричных тел с переменной массой, взаимодействующих по закону Ньютона в относительной системе координат. Предположим, что массы тела изменяются изотропно с различной скоростью в любом законе изменения массы, и что масса родительской звезды намного больше массы планет. В ходе эволюции планеты совершают движение по квазиэллиптической орбите, которая не пересекается друг с другом. Поскольку массы являются переменными, дифференциальные уравнения движения приняли неавтономную форму и задача усложнилась. Поскольку для любой закономерности изменения массы не существует общего решения проблемы Гюльдена-Мещерского, динамика планетной системы с изменяющейся массой изучалась методами канонической теории возмущений.

Из «архива экзопланет NASA» известно, что около 87% экзопланет с известными эксцентриситетами имеют значения в диапазоне $0 \leq e < 0.1$ эксцентриситетов. Широко используемые методы обнаружения экзопланет - это метод скорости излучения и метод транзита, и эти методы адаптированы для обнаружения экзопланет, находящихся на орбитах в плоскости около $i = 90^\circ$. Если рассматривать плоскость, образующую $i = 90^\circ$, как основную плоскость, существует множество экзопланет, которые движутся по орбите с почти нулевым наклоном. Поэтому каноническое уравнение движения было получено с помощью аналогов второй системы Пуанкаре. Эти канонические уравнения лучше всего описывают динамическую эволюцию небесных тел, движущихся по орбите с малым эксцентриситетом и с малым наклоном.

Чтобы выразить возмущающую функцию с помощью канонических элементов, основная часть возмущающей функции была разложена в ряд до второй степени включительно по малым параметрам (аналог наклона и аналог эксцентриситета) с помощью символьной системы *Wolfram Mathematica*. Аналитически получена система вековых уравнений, позволяющая определить изменение параметров орбит планет в больших временных интервалах. Вековая система уравнений состоит из $4N$ линейных неавтономных уравнений и состоит из двух подсистем, описывающих форму орбиты и пространственное положение плоскости орбиты. Для любого закона изменения массы и для любой N планетной системы получена безразмерная вековая система уравнений. Для задачи четырех тел и восьми тел с переменными массами явно написана система безразмерных вековых

уравнений. В этой работе было изучено, как переменность масс небесных тел влияет на динамическую эволюцию экзопланетных систем. Другими словами, была изучена эволюция элементов орбиты в случаях переменной массы и проанализирована отличие с случаем постоянной массы.

Актуальность темы. В классической механике проблема многих тел исследуется в случае постоянной массы, однако открытие и исследование экзопланетных систем показывает, что небесные тела нестационарны. Изучение нестационарных задач в небесной механике привело к необходимости учитывать переменность массы. По этой причине изучение проблемы многих тел с переменной массой является актуальной задачей в небесной механике.

С 1995 года по настоящее время существует более 4 тысяч экзопланетных систем и было обнаружено около 6 тысяч экзопланет. Кроме того, рассматривается более 10 тысяч небесных тел-кандидатов на признание экзопланет. В базе данных «архива экзопланет NASA» эти данные обновляются и растут каждый день. В ближайшие десять лет количество экзопланет может достигать десятков тысяч. Экзопланетные системы, которые растут изо дня в день, также демонстрируют актуальность изучения N планетную проблему многих тел с переменными массами в астрономии. Изучение динамической эволюции экзопланет позволяет определить будущие этапы развития экзопланетной системы. Изучение динамической эволюции нестационарных экзопланет позволит нам понять процесс динамического развития Солнечной системы и улучшит наше понимание динамической эволюции в галактике.

Цель работы. Получение вековых уравнений возмущенной проблемы сферических многих тел в аналогах элементов второй системы Пуанкаре, массы, которые изменяются изотропно с различной скоростью, и на основе полученных уравнений изучение динамической эволюции нестационарных экзопланетных систем.

Задачи исследования:

1. рассмотреть возмущенное движение задачи многих тел в абсолютной системе координат, массы которого изменяются изотропно с различной скоростью;
2. изучить канонические уравнения движения в аналогах переменных второй системы Пуанкаре в относительной системе координат;
3. построить алгоритм разложения возмущающей функции в ряд с любой точностью с использованием *Wolfram Mathematica* и разложить возмущающую функцию до второй степени;
4. выразить коэффициенты Лапласа через эллиптические интегралы первого и второго рода;
5. получить систему вековых уравнений в результате усреднения системы канонических уравнений и разбить ее на две подсистемы;
6. получить систему безразмерных вековых уравнений, позволяющих исследовать динамическую эволюцию любой N планетной системы;
7. явно выразить систему безразмерных вековых уравнений для задач четырех и восьми тел;

8. решить задачу Коши численными методами для 1 звездной 3-планетной экзопланетной системы *K2-3*, 1 звездной 7-планетной экзопланетной системы *Trappist-1* и 2-планетной циркумбулярной экзопланетной системы *TOI-1338*;
9. изучить эволюцию орбитальных элементов экзопланет *K2-3*, *Trappist-1* и *TOI-1338* за длительный период времени и проанализировать полученные результаты, чтобы определить, как изменчивость массы влияет на динамику планетной системы.

Объекты исследования. Нестационарные экзопланетные системы с 1 центральной звездой не менее с тремя планетами или двойные системы не менее с двумя планетами, движущиеся по квазиэллиптической орбите с малым эксцентриситетом и наклоном.

Методы исследования. Использовались методы канонической теории возмущения и математические методы решения неавтономных линейных дифференциальных уравнений и методы разложения в ряд, современные численные методы *Wolfram Mathematica* и метод Пикара.

Научная новизна. Впервые получены вековые уравнения возмущений проблемы многих тел с изотропно изменяющимися массами. Полученные вековые уравнения используются для изучения динамической эволюции экзопланет с малым эксцентриситетом и наклоном. Эти канонические уравнения уместны для любого закона изменения массы и для экзопланетной системы с любой N планетой.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. система канонических вековых уравнений, полученных с помощью аналогов второй системы Пуанкаре задачи многих тел, массы которых изменяются изотропно в относительной системе координат;
2. система безразмерных вековых уравнений, полученная в явном виде для задачи четырех тел и задачи восьми тел;
3. динамическая эволюция изменений орбитальных элементов экзопланетных систем *K2-3*, *Trappist-1* и *TOI-1338*.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Результаты, полученные в диссертационной работе, в случае постоянной массы совпадают с известными исследованиями других авторов, изучавших проблему многих тел в случаях постоянной массы. Достоверность и обоснованность полученных результатов также подтверждены наличием статей, опубликованных в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в базы *Web of Science (Clarivate Analytics)* и *Scopus*.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Вековые уравнения, полученные с помощью аналогов второй системы переменных Пуанкаре, теоретически могут служить основой для исследования проблемы $N+1$ сферических тел с переменной массой. Полученные вековые уравнения возмущений имеют практическое значение как средство изучения динамической эволюции экзопланет, движущихся по орбите с малым эксцентриситетом и с малым наклоном.

Апробация работы:

1. M. Minglibayev, A. Kosherbayeva. Evolution equations of the multi - planetary problem with variable masses // Abstract book of the "XXXIst General Assembly of the International Astronomical Union IAUGA 2022" Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO) 55 APEC - ro, Haeundae - gu Busan, South Korea, August 02 - 11, 2022, p. 348.
2. M. Zh. Minglibayev, A. N. Prokopenya, A. B. Kosherbayeva. Investigation of the dynamic evolution of planetary systems with isotropically varying masses // Abstract book of the Complex Planetary Systems II Kavli-IAU Symposium 382, Namur, Belgium, July 3-7, 2023, p. 42-43.
3. Kosherbayeva A. Equations of secular perturbations of exoplanetary systems with variable masses // Abstract book of the "CELMEC VIII The Eighth International Meeting on Celestial Mechanics", University of Rome Tor Vergata, Italy, September 05-09, 2022, p. 10-11.
4. Mukhtar Minglibayev, Alexander Prokopenya, Aiken Kosherbayeva. The problem of many bodies with isotropically varying masses // Abstracts of the 28th International Conference on Applications of Computer Algebra ACA'2023. Warsaw University of Life Sciences (SGGW), Institute of Information Technology, Warsaw, Poland, July 17- 21, 2023, p. 70.
5. A. Chichurin, A. Prokopenya, M. Minglibayev and A. Kosherbayeva. Symbolic-Numeric Computation in Modeling the Dynamics of the Many-Body System TRAPPIST. // Abstracts of the 23rd International Conference on Computational Science, The Czech Technical University in Prague (CTU), Prague, Czech Republic, July3-5, 2023, p. 99.
6. A.N.Prokopenya, M.Zh.Minglibayev, A.B.Kosherbayeva. Symbolic computation in studying the evolutionary equations in the problem of many bodies of variable masses. // Seminar on Computer Algebra, CMC faculty of MSU & CCAS Moscow, Russia, September 29, 2021, <http://www.ccas.ru/sabramov/seminar/doku.php?id=archive2123>.
7. M. Minglibayev, A. Kosherbayeva. Linear non-autonomous differential equations, determining secular perturbations of exoplanetary systems with variable masses // Abstract book of the International Conference «Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education» (CITech-2022) dedicated to the 90th anniversary of Academician N. K. Nadirov, to the 80th anniversary of Academician M. O. Otelbaev, October 12-15, 2022, p. 92.
8. А. Б. Кошербаева. Дифференциальные уравнения планетных систем с переменными массами // материалы Международной конференций "Традиционная международная апрельская математическая конференция в честь Дня работников науки Республики Казахстан, посвященная 1150-летию Абу Насыр аль-Фараби и 75-летию Института математики и математического моделирования", Казахстан, г. Алматы, 01-03 апреля, 2020, с. 95-97.
9. Кошербаева А. Б. Уравнения движения планетных систем с переменными массами // Материалы международной научной конференции студентов и

молодых ученых «Фараби элeмi», Казахстан, г. Алматы, 6-9 апреля 2020, с. 78.

10. Кошербаева А. Б. Эволюционные уравнения экзопланетных систем с переменной массы // Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби элeмi», Казахстан, г. Алматы, 04-06 апреля, 2022, с. 59.

11. A.N. Prokopenya, M.Zh. Minglibayev, A.B. Kosherbayeva. Symbolic-numeric computation in modeling the dynamics of the many-body systems of variable masses // Seminar on Computer Algebra, CMC faculty of MSU & CCAS, May 15, 2024. <http://www.ccas.ru/sabramov/seminar/doku.php?id=start>

Публикации. По диссертационной работе опубликовано 18 научных работ. Из них в базе *Web of Science (Clarivate Analytics)* (Q1, Q3 и Q4) и *Scopus* (процентили: 86, 18 и 2) опубликовано 3 статьи. Опубликовано 4 статьи в журналах, входящих в список журналов, рекомендованных *КОКСОН МОН РК*, и 10 работ на международных конференциях. В целом были представлены доклады на международных конференциях в Южной Корее, Италии, России, Польше, Бельгии, Чехии и Казахстане. Один из них был представлен на конференции, организованной Международной Астрономическим Союзом в 2022 году на XXXI Генеральной Ассамблее в Южной Корее на основе выигранного гранта.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором. Постановка задачи и обсуждение результатов выполнены совместно с научными консультантами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка литературы, приложения.