

ШОМШЕКОВА САУЛЕ АХМЕТБЕКОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности «6D060300 - Механика»

Актуальность темы исследования. Открытие планет вне Солнечной системы (экзопланет) стало началом новой эпохи развития астрономии и применения методов небесной механики. До открытия первой экзопланеты в 1995 году Солнечная система считалась единственной планетной системой во Вселенной. У всех планет Солнечной системы орбиты близки к круговым $e \approx 0$, кроме орбиты Меркурия, у которого $e = 0.2$, наклонение орбиты - 7° .

Запуски различных космических аппаратов – Corot (2006), Kepler (2009), Gaia(2013), TESS (2018), Cheops (2020) за последние 25 лет позволили открыть большое количество (4174-29.01.2020) внесолнечных объектов (экзопланет), некоторые из которых сопоставимы с Землей.

Актуальной проблемой современной астрофизики, а также, теоретической и небесной механики, является отсутствие объяснения незначительных увеличений значений эксцентриситетов и наклонений в экзопланетных системах. Одной из возможных причин может быть анизотропное изменение масс центральной звезды и планет, что естественно влияет на динамическую эволюцию системы. Астрофизические исследования позволяют определить изменение со временем массы, размеров, формы центральной звезды и орбитальных элементов планет на основе наблюдений. Тема весьма актуальная, потому что планируются новые запуски космических аппаратов, которые должны обнаружить гораздо больше экзопланет, некоторые из которых, возможно, сопоставимы с Землей.

До конца XIX века задачи в небесной механике решались только для стационарных небесных тел. Дифференциальное уравнение относительного движения для задач двух тел с переменными массами впервые применил Гильден 1884 года.

Дальнейшие исследования В.Г. Фесенкова, Г.М. Идлиса, Т.Б. Омарова, J.D. Hajidemetriou, Л.Г. Лукьянова, Е.Н. Поляховой, А.А. Бекова, А. Derpit, L. Floria и др. показали особую значимость нестационарных небесно-механических модельных задач в исследовании природы нестационарных космических систем.

В 80-х годах прошлого века многие теоретики решали задачи по небесной механике гравитирующих систем и активно изучали переменность масс гравитирующих тел. Омаров Т.Б. исследовал динамику широких двойных звезд с интенсивными корпускулярными излучениями. Была решена задача двух тел, движущихся внутри гравитирующего пылевидного вещества. Параллельно с Омаровым Т.Б. аналогичные исследования были

проведены профессором Дж. Хаджидеметриу. В результате параллельных работ в историю динамической астрономии вошли такие понятия как «элементы Омарова-Хаджидеметриу».

Орбиты внесолнечных планет сильно различаются по величине эксцентриситета и по величине наклона. Формирования внесолнечных планет напрямую зависят от массы центральной звезды. Выяснилось, что распространенность планет-гигантов быстро растет с увеличением массы звезд. Также оказалось, что планеты у звезд промежуточной массы (1.5-3 массы Солнца) в большинстве своем массивны и находятся на широких орбитах с малым эксцентриситетом.

Последние 10 лет вопросы анизотропного изменения масс в динамических системах активно исследуются учеными всего мира.

В данной диссертации в небесно-механическом аспекте с использованием известных математических моделей исследуются эффекты влияния переменности масс на орбитальные элементы планеты, чтобы понять природу динамической эволюции планетных систем.

Целью диссертационной работы является исследовать систему из трех взаимогравитирующих сферических небесных тел, содержащую центральную звезду и две планеты, с учетом анизотропного изменения массы, которое приводит к появлению реактивных сил, действующих на тела рассматриваемой системы, и выявить эффекты влияния переменности масс на орбитальные элементы планеты.

Задачи исследования

1 Исследовать динамику системы, состоящей из трех взаимогравитирующих сферических небесных тел с массами, изменяющимися анизотропно, получить выражения для реактивных сил в относительной системе координат, связанной с центральной звездой.

2 В оскулирующих элементах на базе аperiodического движения по квазиконическому сечению в переменных Пуанкаре и в аналогах элементов Кеплера разработать аналитический алгоритм разложения возмущающей функции в степенной ряд по малым параметрам e_j и i_j с требуемой точностью для двухпланетной задачи трех тел с массами, изменяющимися анизотропно в различных темпах методами компьютерной алгебры.

3 Вывести эволюционные уравнения, определяющие поведение параметров орбиты, в аналогах второй системы переменных Пуанкаре, и эволюционные уравнения в аналогах элементов Кеплера в форме Лагранжа.

4 Выбрать конкретные экзопланетные системы для исследований динамической эволюции. Получить численные решения эволюционных уравнений в аналогах второй системы элементов Пуанкаре и в аналогах элементов Кеплера, используя уравнения возмущенного движения в форме Лагранжа и выбирая значения параметров системы по данным наблюдений избранных экзопланет.

5 Исследовать взаимосвязь между наличием больших эксцентриситетов, наклонов орбит экзопланет и анизотропным изменением масс тел в этих системах.

Объектом исследования является динамика эволюции нестационарных экзопланетных систем.

Методы научного исследования. Исходными для использования теории возмущений являются уравнения движения в относительной системе координат с началом в центре «родительской» звезды.

Уравнения движения исследуются методами теории возмущений, разработанными для нестационарных систем. Используются методы теории возмущений на базе апериодического движения по квазиконическому сечению.

Для анализа динамики эволюции нестационарных экзопланетных систем используются современные методы компьютерной алгебры и численные методы, а для их реализации использованы система Mathematica.

Научная новизна работы:

1. Разработан алгоритм аналитического разложения возмущающей функции в степенной ряд, в принципе, с точностью до любого порядка относительно малых параметров для двухпланетной задачи трех тел с использованием методов компьютерной алгебры и современной системы символьных вычислений Mathematica.

2. Получено численное решение эволюционных уравнений динамической эволюции экзопланетной системы GJ 180: GJ 180b, GJ180c.

3. Выявлены эффекты влияния переменности масс на орбитальные движения реальных экзопланетных систем. Они имеют принципиальное значение в эволюции звездных систем с переменными массами. Временные изменения масс существенно влияют на орбитальные движения, что, естественно, оказывает влияние и на динамическую эволюцию вращательных движений небесных тел.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть применены для исследования динамической эволюции нестационарных систем в задачах трех и более тел в небесной механике для интерпретации динамической особенности гравитирующих систем. Результаты можно использовать для изучения процессов формирования и эволюции систем, содержащих несколько планет. Результаты исследования позволят выделить особенности эволюции планетных систем около «старых» звезд – красных гигантов, обладающих высоким уровнем потери массы в анизотропной конфигурации и с различными темпами.

Публикации по материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ.

База данных ThomsonReuters или Scopus:

1. Prokopenya A., Minglibayev M., Shomshekova S. Computing Perturbations in the Two-Planetary Three-Body Problem with Masses Varying Non-Isotropically at Different Rates // *Mathematics in Computer Science*. – 2020. – Vol.14 – No. 2. – P.241–251. <https://doi.org/10.1007/s11786-019-00437-0>. [Impact Factor = 0.75.]. Q3. CiteScore-33-процентиль.

2. А) Прокопеня А.Н., М.Дж. МинглибаевМ.Дж., Шомшекова С.А. Применение компьютерной алгебры в исследованиях двухпланетной задачи трех тел с переменными массами // Программирование – 2019. - №2. – С.58-65. DOI:10.1134/SO132347419020092

3. Б) ProkopenyaA., MinglibayevM., Shomshekova S. Applications of Computer Algebra in the Study of the Two-Planet Problem of Three Bodies with Variable Masses // Programming and Computer Software. – 2019. – Vol. 45. – No. 2. – P.73–80. [DOI:10.1134/S0361768819020087] [ImpactFactor = 0.75.]. Q4. CiteScore-23-процентиль.

Статьи в изданиях, рекомендованных ККСОН образования и науки МОН РК:

1. Минглибаев М. Дж., Маемерова Г.М., Шомшекова С.А. Дифференциальные уравнения относительного движения нестационарных экзопланетных систем // Вестник КазНПУ, серия физико-математическая. – 2017. – Т.57. №1. – С.141 -147.

2. MinglibayevM., Shomshekova S. Analytical expressions of the perturbing functions in two planetary three - body problem with masses varyng non-isotropically when available for reactive forces // ИзвестияНАНПК, серияфизико-математическая. – 2018. –Vol. 319. №3. – С.134-163.

3. Минглибаев М., Шомшекова С. Статистический анализ экзопланетных систем по спектральным классам звезд // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия физическая. (Recent Contribution to Physics). – 2019. – Т. 68. № 1. – С.20-28.

Апробация работы и публикации в материалах международных конференций:

1. Minglibayev M., Prokopenya A., Shomshekova S. Computing Perturbations in Two-Planetary Three-Body Problem with masses varying Non-isotropically at different rates // International ConferenceonApplicationsofComputerAlgebra (ACA-2018). – Universided de Santiago de Compostela. – 2018. – P.47.

2. Минглибаев М., Прокопеня А., Шомшекова С. Исследования вековых возмущений в двухпланетной задаче трех тел с переменными массами // Международная конференция «Астрономия 2018», приуроченная к XIII съезду Международной общественной организации «Астрономическое общество». – Москва. – 2018. – С. 232-235. [10.31361/eaas.2018-1.043](https://doi.org/10.31361/eaas.2018-1.043).

3. Minglibayev M., Prokopenya A., Mayemerova G., Shomshekova S. On expansion of the perturbing functions in two-planetary three-body problem with masses varying non-isotropically at different rates // Computer Algebra Systems in Teaching and Research. – Siedlce. – 2018. Vol. VII. – P. 37-44.

4. Минглибаев М., Шомшекова С. К динамике планет в экзопланетных системах с родительской звездой переменной массы // Международная

конференция «Современная звездная астрономия-2017». – Екатеринбург. – 2017. Получен сертификат.

5. Шомшекова С. Статистическое исследование нестационарных экзопланетных систем по спектральным классам центральной звезды // Материалы международной конференции студентов и молодых ученых «Фарабиэлемі». – Алматы. – 2017. – С.97.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из титульного листа, содержания, обозначений и сокращений, 5 разделов, которые разделены на подразделы, заключения, списка использованных источников 81. В работе 26 рисунков. Общий объем работы, содержит 119 страниц, в том числе из одного приложения на 14 страницах.

Основное содержание диссертации. Во введении отражено обоснование актуальности темы диссертации, цели, объекта, предмета, задач исследования, обоснования научной новизны работы, ее теоретической и практической значимости, научных принципов, подлежащих защите, количества доступных публикаций.

В главе 1 проведен анализ данных европейского каталога в базе данных NASA Exoplanet Archive и выбраны экзопланетные системы для исследования их динамической эволюции. Основные критерии выбора:

а) Характерные для нестационарных экзопланетных систем вытянутые и изменчивые орбиты, где происходит существенный по массе выброс вещества звезды, то есть темп потери массы порядка $10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$

б) В соответствии с задачей 3-х тел выбираем системы, у которых уже обнаружены 2 планеты и вычислены все необходимые орбитальные параметры.

в) Планеты системы движутся по орбитам с малым эксцентриситетом и наклоном, и не имеют массивных планет в зоне эффективной земной орбиты

Анализ данных показал, что среди звёзд главной последовательности потеря массы наибольшая у М-звёзд. Звёзды Вольфа-Райе не рассматривались, хотя потеря массы у них больше, поскольку около этих звёзд нет условий для образования планет. На текущий момент все необходимые наблюдаемые орбитальные параметры имеет система GJ 180 - GJ 180 b- GJ 180 c.

В главе 2, исходя из уравнений Мещерского, получены уравнения движения при наличии реактивных сил в абсолютной (барицентрической) прямоугольной декартовой системе координат. Получены уравнения движения рассматриваемой задачи в относительной системе координат с началом в центре родительской звезды, более удобные для использования теории возмущения на базе аperiодического движения по квазиконическому сечению. Получены уравнения возмущенного движения планет в форме уравнений Лагранжа. Получены выражения для реактивных сил при анизотропном изменении массы в относительной системе координат.

В главе 3 приведены результаты численных расчетов по эволюционным уравнениям в аналогах второй системы переменных

Пуанкаре. Анализ результатов показал, что при изменении скорости вылета частиц в плоскости орбиты на интервале времени 5000 земных лет орбитальные параметры практически не изменяются по сравнению со случаем изотропного изменения массы, хотя зависимость массы от времени приводит к заметным изменениям орбитальных параметров по сравнению со случаем постоянных масс. При изменении скорости вылета частиц перпендикулярно плоскости орбиты реактивная сила оказывает влияние на некоторые орбитальные параметры планет, например, на аналоги эксцентриситета и наклона, которые приводят к более вытянутым орбитам.

Элементы Пуанкаре хорошо описывают данную задачу при малых эксцентриситетах и наклонах, но расчеты показывают, что эксцентриситеты и наклоны могут увеличиваться. В аналогах второй системы элементов Пуанкаре уравнения движения нужно несколько раз преобразовывать, из-за этого происходит потеря точности.

В главе 4 получены общие уравнения разложения в ряд возмущающих функций в двухпланетной задаче трех тел с массами, изменяющимися анизотропно в различных темпах, на базе аperiodического движения по квазиконическому сечению.

Выполнено усреднение уравнения движения по средним долготам тел в отсутствие резонансов среднего движения, получены дифференциальные уравнения, описывающие эволюцию орбитальных параметров в течение длительных периодов времени. При этом учитываются эффекты убывания массы родительской звезды и роста массы планет из-за аккреции вещества из остатков протопланетного диска. Получены аналитические разложения возмущающей функции в виде степенных рядов по эксцентриситетам и наклонам, в принципе, с любой необходимой точностью. Полученные соотношения дают возможность разложения возмущающих функции с любой точностью относительно эксцентриситетов и наклонов и далее могут быть использованы для исследования динамической эволюции экзопланетных систем с анизотропным изменением массы родительской звезды и планет.

В главе 5, с использованием теории возмущений в качестве невозмущенного (начальное приближение) рассмотрено точное решение задачи двух тел с переменными массами, описывающее аperiodическое движение по квазиконическому сечению. Получены возмущающие функции в виде степенных рядов по эксцентриситетам и наклонам до третьего порядка включительно и выведены дифференциальные уравнения, определяющие поведение орбитальных параметров в виде планетарных уравнений Лагранжа. Усреднением уравнений движения по средним долготам тел при отсутствии резонансов среднего движения получены дифференциальные уравнения, описывающие эволюцию орбитальных параметров на длительном интервале времени в 5000 земных лет. По эволюционным уравнениям в форме Лагранжа, с использованием системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, выполнены численные расчеты

эволюции аналогов орбитальных элементов планет экзопланетной системы Глизе GJ180: GJ 180 b, GJ 180 c.

Показано, что наличие реактивной силы наиболее сильно влияет на наклонение орбит и на долготу восходящего узла планет системы.