

## ОТЗЫВ

на диссертационную работу Шомшековой Сауле Ахметбековны «Исследование динамической эволюции нестационарных экзопланетных систем», представленную на соискание степени доктора философии (Ph.D.) по специальности 6D060300 Механика»

**1. Актуальность темы исследования в рамках требований «Правил присуждения ученых степеней».** Классическая задача трех тел является одной из наиболее важных моделей небесной механики и имеет множество приложений. Ее исследованием занимались многие выдающиеся математики и механики в течение последних трех столетий. Однако задача трех тел до сих пор не решена в конечном виде даже в простейшем случае, когда тела считаются материальными точками, притягивающими друг друга в соответствии с законом всемирного тяготения. Реальные небесные тела имеют конечные размеры и внутреннюю структуру, а их характерные параметры с течением времени изменяются. Учет зависимости от времени лишь одного из важнейших параметров тел, например, их массы, существенно усложняет модель и проблема анализа уравнений движения системы становится весьма сложной. Для ее успешного решения требуется не только применение аналитических и численных методов исследования дифференциальных уравнений, но и эффективное использование современных компьютерных систем. Диссертационная работа, представленная Шомшековой С.А., показывает высокий уровень ее теоретической подготовки, а также владение навыками проведения исследований на современном научном уровне. В работе представлены новые интересные результаты исследования классической задачи трех тел с переменными массами, которые представляют значительный интерес для приложений в небесной механике. Актуальность выполненных исследований не вызывает сомнений.

**2. Научные результаты и их обоснованность.** Диссертационная работа содержит оригинальные результаты одновременно из двух областей – небесной механики (двухпланетная задача трех тел с массами, изменяющимися анизотропно, что приводит к появлению реактивных сил) и астрофизики (эффекты влияния переменности масс на орбитальные элементы планеты).

Основная цель диссертационной работы – исследовать влияние изменения масс тел на орбитальные параметры в общем случае задачи трех тел, когда массы тел изменяются анизотропно с различными скоростями и появляются реактивные силы, и показать, что такие изменения могут приводить к возрастанию эксцентриситетов и наклонов орбит, наблюдаемых в экзопланетных системах.

В работе рассматриваются следующие важные и актуальные задачи:

1. Анализ имеющихся экспериментальных данных наблюдений экзопланетных систем и определение численных значений параметров системы из трех тел для использования в численных расчетах.

2. Получение аналитических выражений для реактивных сил, возникающих при анизотропном изменении масс тел, и приведение дифференциальных уравнений движения в задаче трех тел с переменными массами к форме, удобной для применения теории возмущений.

3. Вычисление возмущающей функции в виде разложения по степеням малых параметров с использованием аналогов второй системы элементов Пуанкаре, а также непосредственно в орбитальных элементах Кеплера, и выделение в ней вековой части с точностью до третьего порядка по возмущениям включительно.

4. Получение дифференциальных уравнений, определяющих поведение вековых возмущений орбитальных элементов, и их решение при различных законах изменения масс тел как в изотропном, так и неанизотропном случаях.

5. Исследование влияния анизотропии изменения масс тел на временную эволюцию вековых возмущений орбитальных элементов.

В результате проведенных исследований все поставленные цели были достигнуты. Следуя методике, описанной в монографиях К. Шарлье и К. Мюррея, С. Дермотта, Шомшекова С.А. получила общие выражения для возмущающих функций в виде разложений в степенные ряды по малым параметрам. Для получения эволюционных уравнений, определяющих поведение параметров орбиты, разработан алгоритм символьных вычислений возмущающей функции в виде степенного ряда с точностью до любого порядка относительно малых параметров для двухпланетной задачи трех тел с использованием методов компьютерной алгебры и современной системы символьных вычислений Mathematica. Конкретные вычисления выполнены двумя способами: с использованием аналогов второй системы переменных Пуанкаре, а также непосредственно в аналогах орбитальных элементов Кеплера.

Для исследования взаимосвязи между наличием больших эксцентриситетов и наклонов орбит экзопланет с анизотропным изменением масс тел в этих системах проведен анализ статистических данных наблюдений экзопланетных систем, что позволило выбрать несколько систем с двумя планетами с малым эксцентриситетом и наклоном, соответствующих рассматриваемой модели, которые не имеют массивных планет в зоне эффективной земной орбиты.

На основе результатов предыдущих исследований выполнены численные расчеты эволюции аналогов орбитальных элементов планет экзопланетной системы Глизе GJ180: GJ 180b, GJ 180c для случая постоянных масс тел, при изотропном изменении масс и анизотропном изменении масс, когда центральная звезда и планеты теряют массу в различных темпах и реактивные силы не равны нулю.

Полученные численные решения эволюционных уравнений показали, что реактивные силы, возникающие при анизотропном изменении масс тел, действительно могут приводить к возрастанию эксцентриситетов и наклонов орбит.

**3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (научного положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации.** Все полученные Шомшековой С.А. результаты являются новыми, научно обоснованными и представляют несомненный интерес для приложений небесной механики. Расчетные уравнения получены с использованием основных положений небесной механики, основаны на строгих математических определениях и корректности применяемых численных методов. При проведении численных расчетов использованы данные наблюдений из официальных каталогов NASA Exoplanet Archive и европейского каталога The Extrasolar Planets Encyclopaedia. Достоверность полученных результатов наглядно демонстрируется представленными графическими отображениями результатов численных расчетов, реализованных в системе Mathematica. В случае постоянных масс, а также масс, изменяющихся изотропно, полученные результаты совпадают с результатами исследований, проведенных другими авторами.

Результаты работы наглядно показывают, что одним из механизмов, которым можно объяснить возрастание эксцентриситетов и наклонов орбит в экзопланетных системах, может являться анизотропное изменение масс центральной звезды и планет.

**Степень новизны каждого научного результата (положения), вывода соискателя, сформулированных в диссертации.**

Соискателем разработаны новые алгоритмы символьных вычислений возмущающей функции в виде разложений в степенные ряды по малым параметрам с точностью до любого заданного порядка для двухпланетной задачи трех тел с использованием методов компьютерной алгебры и современной системы символьных вычислений Mathematica.

Получены общие разложения возмущающих функций в степенной ряд по малым эксцентриситетам и наклонам в оскулирующих элементах на базе аперiodического движения по квазиконическому сечению в переменных Пуанкаре и в аналогах элементов Кеплера. Конкретные вычисления в аналогах элементов Кеплера впервые выполнены с точностью до третьего порядка по малым параметрам включительно.

Получены новые численные решения эволюционных уравнений в аналогах второй системы переменных Пуанкаре для планет экзопланетной системы Глизе GJ180: GJ 180b, GJ 180c и эволюционных уравнений в форме Лагранжа на интервале времени 5000 земных лет (100000 орбитальных лет внутренней планеты).

Впервые показано, что применение построенной математической модели экзопланетных систем при наличии реактивных сил, когда массы меняются анизотропно, позволяет выявить эффекты влияния переменности масс на орбитальные движения реальных экзопланетных систем.

**4. Практическая и теоретическая значимость научных результатов.**

Полученные в диссертации результаты могут быть рекомендованы для дальнейшего развития и использования в научно-исследовательских организациях, занимающихся изучением динамики систем тел с переменными

массами, а также при чтении спецкурсов на механико-математических специальностях университетов. Разработанные компьютерные программы символьных преобразований и алгоритмы численных расчетов, реализованные в системе компьютерной алгебры *Mathematica*, могут быть использованы при решении других задач небесной механики.

Все полученные результаты докладывались на научных конференциях и семинарах различного уровня и опубликованы в 10 работах, из которых две статьи опубликованы в журналах с импакт-фактором и цитированы в базах данных Thomson Reuters и Scopus, 3 работы – в изданиях, рекомендованных ККСОН образования и науки МОН РК, 5 работ – в материалах международных конференций.

**5. Замечания по диссертационной работе.** К замечаниям по диссертационной работе можно было бы отнести некоторую перегруженность большими формулами. Однако большая часть из них вынесена в приложения, что облегчает чтение работы. С другой стороны, в приложении можно было бы описать некоторые вычислительные алгоритмы, хотя в работе по механике это не обязательно.

**6. Соответствие содержания диссертации в рамках требований Правил присуждения ученых степеней.** Диссертационная работа Шомшековой Сауле Ахметбековны «Исследование динамической эволюции нестационарных экзопланетных систем» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой исследовано влияние анизотропного изменения масс тел, приводящего к появлению реактивных сил, на эволюцию вековых возмущений в задаче трех тел. Результаты, полученные автором работы, являются достаточно новыми, обоснованными и достоверными.

За время обучения в докторантуре Казахского национального университета им. аль-Фараби Шомшекова С.А. прошла научную стажировку в Варшавском университете естественных наук (SGGW, Варшава, Польша), где она приобрела опыт применения системы компьютерной алгебры *Mathematica* к исследованию динамических систем. Во время стажировки Шомшекова С.А. проявила себя как квалифицированный специалист, обладающий хорошими знаниями в области теоретической механики и информатики, и способный самостоятельно решать сложные научные проблемы.

Считаю, что представленная диссертация отвечает требованиям Правил присуждения ученых степеней, а ее автор, Шомшекова С.А., заслуживает присуждения ей ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060300 – Механика.

**Зарубежный научный консультант, доктор физико-математических наук, профессор Варшавского университета естественных наук**

**Прокопеня А.Н.**

08.06.2020 г.

Kierownik Dziekanatu  
Wydziału Zastosowań Informatyki i Matematyki

/ mgr Beata Sztab /

