

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Бекесова Егора Владимировича
на тему «Влияние тонких эффектов на результаты интерпретации
наблюдений экзопланетных транзитов»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертационная работа Бекесова А. В. посвящена исследованию наблюдательных эффектов при исследовании экзопланет методом фотометрического транзита. При транзите экзопланеты по диску родительской звезды: форма кривой блеска, длительность транзита, в течение которого наблюдается падение блеска, глубина транзита информативны о радиусе планеты, о наклоне её орбиты к картинной плоскости, о большой полуоси орбиты, об орбитальном периоде, а в некоторых случаях и об эксцентриситете, об аргументе перицентра а также о характере распределения яркости по диску звезды, потемнению к краю диска. Соискатель исследует указанные эффекты, а также другие особенности транзитного метода, которые содержат информацию об экзопланетной системе. Соискатель написал рабочую компьютерную программу для анализа фотометрических транзитных кривых при наблюдении экзопланет для исследования их свойств и характеристик планетных систем.

Диссертационная работа актуальна, так как приобретен опыт обработки кривых блеска при фотометрическом транзите экзопланет, в том числе и при астрономическом наблюдении в фильтрах, написана программа для обработки наблюдательных данных с фитированием их к теоретическим зависимостям, определения невязки, поиска минимума невязки и нахождения самосогласованных решений. В ближайшем будущем запланировано начало практической работы по созданию космического фотометрического телескопа МГУ ГАИШ (совместно с арабским научным сообществом) для наблюдений в фильтрах транзитов экзопланет. Благодаря представленной квалификационной работе российская наука накапливает практический опыт обработки фотометрии транзитов экзопланет, который, безусловно, востребован в текущих и будущих исследованиях.

Диссертация Бекесова А. В. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 118 страниц, включает в себя 43 рисунка и 34 таблицы. В списке литературы содержится 104 наименования.

Во **Введении** обоснованы актуальность исследования, описаны цели и задачи, резюмированы научная новизна, научная и практическая значимость полученных в работе

результатов.

Глава 1 содержит исходные данные, постановку (прямой и обратной) задач для моделирования кривой блеска фотометрического транзита экзопланеты с целью определения параметров наблюдаемой экзопланеты или планетной системы. Впоследствии, компьютерная программа, реализующая модель наблюдения использована соискателем для получения результатов, самосогласованных решений и выводов последующих глав.

В **Главе 2** приводится исследования влияния эксцентриситета и аргумента перицентра экзопланетной системы на фотометрические данные. Проанализированы модельные (синтетические) кривые блеска при разных значениях эксцентриситета и аргумента перицентра, произведен поиск минимальной невязки. Метод перенесен на архивные наблюдательные данные экзопланет Kepler-7 b, HD 209458 b. Исследованы фотометрические эффекты, учитывающие потемнение к краю звезды и запятненность.

В **Главе 3** показаны возможности прослеживания признаков атмосфер экзопланет в зависимости от определяемого радиуса экзопланеты от длины волны, полученной из интерпретации данных многоцветных фотометрических наблюдений – аналог трансмиссионной спектроскопии в фильтрах. Изучена точность определения радиуса экзопланеты на основе интерпретации экзопланетных кривых. Применена 4-х параметрическая модель, описывающая эффект потемнения к краю, для оценки рассеяния в рэлеевской планетной атмосфере. В рамках изотермической экспоненциальной модели, по спутниковым данным, проанализированы экзопланеты: HD 189733 b и HD 209458 b на наличие возможных атмосфер.

В **Главе 4** проанализированы наземные фотометрические наблюдательные данные, обладающие существенно меньшей точностью, чем спутниковые. Показано, что использование достаточно больших выборок транзитных данных, фиксация ключевых параметров одинаковыми для разных длин волн («черно-белый транзит»), сведения задачи определения радиуса планеты к однопараметрической, сочетание с высокоточными спутниковыми данными позволяют обнаружить признаки рэлеевской атмосферы у экзопланет. Проанализированы экзопланеты: HD 189733 b, Qatar-1 b, TOI-2046 b, HAT-P-13 b, HAT-P-16 b и HAT-P-65 b.

В **Заключении** изложены основные выводы работы и намечены некоторые направления дальнейших исследований.

Научная новизна работы определяется, в частности, следующими положениями:

- Эксцентриситет орбиты вследствие изменения прицельного параметра экзопланеты приводит к изменению определяемых коэффициентов потемнения к краю звезды, что снимает противоречия между теоретическими и эмпирическими оценками, в частности встречавшимися у других авторов.
- Определена величина уменьшения радиуса экзопланеты HD 189733 b при увеличении длины волны от 550 до 1100 нм.
- Для экзопланеты HD 209458 b выявлено различие характера зависимости радиуса планеты от длины волны при различных заданных значениях эксцентриситета.
- Проведены многоцветные наземные фотометрические наблюдения ряда

экзопланетных транзитов с использованием инструментов Кавказской горной обсерватории ГАИШ, Крымской астрономической станции и ряда других. Получен из интерпретации наблюдательных данных радиус экзопланеты HD 189733 b.

- Написанная соискателем программа апробирована и использована для исследования систем с экзопланетами по фотометрическим данным транзитов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждены применением тщательно протестированных моделей и согласием полученных результатов с наблюдательными наземными и спутниковыми данными, а также с признанными моделями других авторов.

Результаты диссертационной работы апробированы на научных конференциях и семинарах, в том числе на международных. По теме диссертации опубликованы **6** работ в рецензируемых журналах, рекомендованных для публикации результатов диссертационных работ.

Автореферат отражает содержание диссертации. Выводы по диссертации соответствуют выводам, опубликованным в автореферате.

Имеются следующие замечания к диссертации:

- (1) В контексте работ по анализу биомаркеров (стр. 6), рекомендовано упомянуть публикации ИНАСАН, недавно защищена диссертация Цурикова Г. Н.
- (2) В контексте исследования экзопланет применительно к космогонии (к популяционному синтезу) известны более поздние работы: C.Mordasini, Planetary Population Synthesis, Handbook of Exoplanets, ISBN 978-3-319-55332-0. Springer Cham, 2018, id.143 а также серия работ под названием «The New Generation Planetary Population Synthesis (NGPPS).» Тома I.-VIII (2021-2025 гг), где приведены актуальные результаты, соискатель цитирует достаточно старую работу *Benz et al 2014* стр. 6.
- (3) В обзорной части, где описываются основные методы исследования экзопланет пропущен метод *прямого* изображения экзопланет, *от англ. (exoplanet) direct imaging*, стр. 6-8, который следует упомянуть, тем более, что космический телескоп им. Н. Роман НАСА с диаметром зеркала 2,4 метра практически готов к запуску (планы возможного старта 2025-26 г.)
- (4) В диссертационной работе англоязычный термин *host-* или *parent- star* написан, как материнская звезда, лучше использовать термин родительская звезда. Например, известны так называемые циркумбинарные (*от англ. circumbinary*) планеты, обращающиеся по орбите вокруг двух звездных компонент – родительских звезд.
- (5) При описании TTV метода не указана возможность приблизительного определения массы планеты.
- (6) Очевидно, следует более явно и по возможности детально указать недостатки, как и причины неиспользования других программ обработки данных кривых блеска при транзите экзопланет, например, недоступность, ограниченный функционал и т.п. Была

бы полезна и наглядна сравнительная таблица характеристик указанных программ обработки транзитных кривых блеска.

- (7) На стр. 10 использован термин фокальный радиус экзопланеты, видимо подразумевался фокальный радиус орбиты экзопланеты.
- (8) При упоминании газокинетических моделей и МГД моделей вместе с Шематовичем, Бисикало, Маровым следовало бы упомянуть работы Новосибирского ИЛФ СО РАН, Шейхисламова И. Ф.
- (9) На стр. 11 термин "планетарная атмосфера" неправильный, правильно "планетарная туманность", но "планетная система", "планетная атмосфера"
- (10) Зависимость радиуса (экзопланеты) от длины волны... Рекомендовано с большей осторожностью или хотя бы вначале объяснить, что речь идёт об изменении (видимого или вычисленного) радиуса планеты в зависимости от длины волны см., например, на стр. 13.
- (11) Некоторые величины (например, коэффициенты потемнения u_1 , u_2 , стр. 56) высоты, длины осей орбиты и др. рассмотрены точно до 8 знака точности, что, очевидно, излишне и требует разумного округления, в особенности, в связи с интерпретацией наблюдательных данных.
- (12) На стр. 4: «Первая планета у звезды главной последовательности была открыта в системе 51 Пегас в 1995 году (Mayor and Queloz, 1995). Хотя изначально полученные данные вызывали скепсис из-за крайне малого периода обращения планеты, равного четырём дням, а также высокого эксцентриситета планетарной орбиты, впоследствии планетарный статус объекта также был подтверждён...» В действительности орбита с самого начала считалась круговой, см.

https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/51%20Peg%20b#planet_51-Peg-b_collapsible

- (13) Здесь же (стр. 4) «Окончательно вопрос о существовании экзопланет будет снят в 2002 году с открытием экзопланеты в системе HD 209458 при помощи метода транзитной фотометрии». HD 209458 b была открыта в 1999 году. Первые статьи были опубликованы в 2000 году, но препринт вышел в 1999 году: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9911436>
- (14) Стр. 5. «Особенно резкий всплеск числа открытий произошёл после начала использования космических наблюдений с таких телескопов, как Hubble (Chen and James, 2015) и James Webb (Rigby et al., 2022), а также запуска в 2006 году телескопа COROT (COROT team, 2016), космического телескопа KEPLER (Howell, 2020) в 2009 году и телескопа TESS в 2018 году (Barclay et al., 2018; Ricker et al., 2015)» Методически, следует разделять поисковые и исследовательские миссии: ни «Хаббл», ни JWST не являются обзорными телескопами, они открыли буквально по 1-2 планете, они эффективны в изучении уже известных планет, но плохи в качестве поисковых.

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 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 требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Бекесов Егор Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела Физики планет и малых тел Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук, заведующий лабораторией Планетной астрономии Института космических исследований Российской академии наук

Тавров Александр Викторович

13 ноября 2025 года

Контактные данные:

Тел.: +7(495)333-41-33, e-mail: tavrov@iki.rssi.ru

Специальности, по которой официальным оппонентом защищена диссертация (докторская):
01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, 01.04.05 — Оптика

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32,

Институт космических исследований Российской академии наук,
лаборатория планетной астрономии

Тел.: +7(495)333-41-33, e-mail: tavrov@iki.rssi.ru

Подпись сотрудника ИКИ РАН А. В. Таврова заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН

А. М. Садовский