

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Бекесов Егор Владимирович

**Влияние тонких эффектов на результаты интерпретации
наблюдений экзопланетных транзитов**

Специальность: 1.3.1. Физика космоса астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Черепашук Анатолий Михайлович,**
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН

Официальные оппоненты: **Валявин Геннадий Геннадьевич,**
доктор физико-математических наук,
директор Специальной астрофизической обсерватории
Российской академии наук

Тавров Александр Викторович,
доктор технических наук,
заведующий лабораторией планетной астрономии
Института космических исследований Российской академии наук

Шематович Валерий Иванович,
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом исследований Солнечной системы
Института астрономии Российской академии наук

Защита состоится 18 декабря 2025 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: dissovet@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале:
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3621>.

Автореферат разослан 13 ноября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Изучение экзопланет является относительно новой, но крайне быстроразвивающейся областью астрономии. Хотя первые предположения и теории о существовании планет в иных звёздных системах высказывались ещё в XIX веке [1, 2], первые надёжные результаты, подтвердившие существование внесолнечных планет, относятся к самому концу двадцатого века [3].

В настоящее время открыто более семи тысяч экзопланет в более чем пяти тысячах звёздных систем и ещё более двух тысяч кандидатов ожидают подтверждения [4]. Каждый год в рецензируемых журналах публикуются тысячи статей, посвящённых данной тематике [5].

Большое количество открытых экзопланет, а также большой объём полученной информации об их характеристиках позволяют перейти от вопроса о самом факте существования внесолнечных планет к более сложным вопросам. Одним из них является уже упомянутый выше поиск следов внеземной жизни, что выражается как в поиске планет, находящихся в потенциальной зоне жизни своих звёзд, так и в поиске следов биомаркеров (кислород, вода, углекислый газ, метан) в атмосферах планет [6]. Другими задачами являются задачи популяционного синтеза, которые заключаются в поиске закономерностей распределения планет по их характеристикам, а также характеристикам их орбит, что может дать больше информации о механизмах формирования и эволюции планетных систем [7].

Самым результативным по числу обнаруженных экзопланет (более четырёх тысяч объектов на конец 2024 года) [8], а также одним из важнейших с точки зрения объёма полученных наблюдательных данных является транзитный метод. Его суть довольно проста. Если плоскость орбиты внесолнечной планеты лежит под таким углом, что периодически планета проходит по диску материнской звезды, то во время этого прохождения будет наблюдаться временное падение блеска звезды, которое можно зафиксировать при помощи фотометрических наблюдений. Транзитный метод позволяет получить информацию не только о наличии экзопланеты, но и о ряде характеристик как её самой, так и её орбиты, а также в ряде случаев и о характеристиках самой звезды [9].

Глубина транзита, его продолжительность и форма кривой блеска в целом определяют характеристики планетной системы, такими как радиусы планеты и звезды, большая полуось, наклонение и эксцентриситет орбиты. Взаимосвязи данных параметров делают задачу интерпретации транзитных кривых блеска и определения на их основе характеристик планеты и планетной системы достаточно нетривиальной.

Также, задача, описанная выше, осложняется тем, что на результаты интерпретации оказывают влияние не только связи между ключевыми параметрами, но и ряд эффектов, которые можно рассматривать как тонкие эффекты. К таковым могут быть отнесены возмущения орбиты и орбитального движения планеты, переменность звёздной активности, наличие пятен на диске звезды, небольшие значения эксцентриситета у орбит близких к круговым,

наличие атмосферы у экзопланет. Непосредственно в данной работе будет рассматриваться влияние двух эффектов: эксцентриситета и планетарной атмосферы.

Наличие ненулевого эксцентриситета приводит к изменению расстояния от звезды до планеты относительно измеренного значения большой полуоси, и может оказывать заметное влияние даже при небольших значениях эксцентриситета. Большая полуось орбиты внесолнечной планеты может быть посчитана достаточно точно на основании третьего закона Кеплера по имеющимся данным периода обращения, который можно определить по промежутку времени между транзитами, а также массе материнской звезды, которую в большинстве случаев можно определить из фотометрических и спектральных данных. Однако при наличии вытянутой орбиты расстояние от экзопланеты до звезды может отличаться как в большую, так и в меньшую сторону в зависимости от ориентации эллиптической орбиты относительно картинной плоскости, которая характеризуется аргументом перигентра. Данное расстояние критически важно для интерпретации кривой блеска транзита, так как от него зависит величина прицельного параметра. Это может привести либо к изменению определяемого на основании глубины транзита радиуса экзопланеты, либо, наоборот, к изменению определяемого из транзитной кривой закона потемнения к краю, что в свою очередь может влиять на изучение характеристик звёздных атмосфер [10].

Другим тонким эффектом является наличие атмосферы у внесолнечной планеты. Так как атмосферы газовых гигантов являются достаточно протяжёнными, они могут задерживать поток излучения звезды, достаточный, чтобы оказать влияние на форму кривой блеска [11]. При интерпретации, которая рассматривает планету как чёрный непрозрачный кружок, увеличение глубины транзита за счёт поглощения и рассеяния лучей звезды экзопланетной атмосферой приводит к увеличению получаемого радиуса планеты.

Так как рассеяние света происходит по-разному на разных длинах волн, влияние атмосферы на значение радиуса экзопланеты существенно отличается в зависимости от того, на какой длине волны проводятся наблюдения. Интерпретация кривых блеска, полученных при наблюдениях в фильтрах, находящихся ближе к синей части спектра, будет давать большее значение радиуса внесолнечной планеты, нежели для кривых блеска, полученных в красных и инфракрасных фильтрах [12].

Данный эффект, с одной стороны, может исказить полученные значения радиусов экзопланет, которые впоследствии могут использоваться, например, при решении задач популяционного синтеза, с другой стороны, он может помочь в получении информации о структуре и характере экзопланетной атмосферы на основе одних только фотометрических данных и послужить отправной точкой в поиске кандидатов для более точных спектрографических наблюдений.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является изучение влияния планетарной атмосферы и эксцентриситета экзопланетной орбиты на данные, получаемые из интерпретации транзитных кривых блеска

экзопланет, оценка их вклада и исследование возможности на его основе определить характеристики атмосфер звезды и планеты. Объектом исследования, таким образом, являются экзопланетные системы, в которых наблюдаются транзиты планет по диску материнских звёзд.

Поставленная цель и обозначенные ранее проблемы приводят нас к следующим задачам данного исследования:

- Написать программу, позволяющую в автоматическом режиме проводить интерпретацию фотометрических данных, полученных при наблюдении экзопланетных транзитов.
- Смоделировать данные фотометрических наблюдений и провести их интерпретацию с различными заданными значениями эксцентриситета. Определить зависимость полученных результатов от эксцентриситета орбиты.
- Провести интерпретацию реальных спутниковых наблюдательных данных экзопланетных транзитов с использованием различных значений эксцентриситета и проанализировать полученные результаты.
- Провести интерпретацию результатов спутниковых многоцветных фотометрических наблюдений экзопланет с целью определить зависимость радиуса экзопланеты от длины волны.
- Сопоставить полученную зависимость радиуса планеты от длины волны с зависимостью, предсказываемой моделью рэлеевской атмосферы.
- Составить программу наземных наблюдений экзопланет с использованием различных фильтров.
- Провести интерпретацию полученных результатов наземных наблюдений с целью выявить разницу в радиусах планет для наблюдений в различных фильтрах.
- Проанализировать полученные результаты.

Научная новизна

- Создана новая программа, позволяющая проводить интерпретацию кривых блеска экзопланетных транзитов. В программе используются как методы, применявшиеся другими исследователями, так и разработанные непосредственно для данного кода алгоритмы и соотношения, позволяющие повысить надёжность получаемых результатов.
- Показано, что отклонение эксцентриситета от 0 и, как следствие, изменение прицельного параметра экзопланеты приводит к изменению определяемых коэффициентов потемнения к краю для звезды. Тем самым показано, что ряд противоречий, встречавшихся в работах других исследователей, может быть объяснён наличием у экзопланет орбиты с ненулевым эксцентриситетом.

- Определена величина уменьшения радиуса экзопланеты HD 189733 b при увеличении длины волны от 550 до 1100 нм. Показано, что при использовании одинаковых для разных длин волн значений наклона орбиты и радиуса звезды уменьшение радиуса планеты в данном диапазоне превышает 1000 км или 1.2 % от радиуса планеты, что вдвое больше, чем было получено другими исследователями.
- Для экзопланеты HD 209458 b выявлено различие характера зависимости радиуса планеты от длины волны при различных заданных значениях эксцентриситета, что может говорить о важности точного определения орбитальных характеристик экзопланеты при определении параметров её атмосферы. Также для данной планеты выявлено превышение радиуса над уровнем тренда на длинах волн, соответствующих фраунгоферовым линиям натрия ($5895.92 \text{ \AA}$ и $5889.95 \text{ \AA}$) на 440–600 км, что соответствует эквивалентной ширине линий натрия в $0.13\text{--}0.18 \text{ \AA}$ и подтверждает результаты других авторов о присутствии натрия в атмосфере планеты.
- Проведены многоцветные наземные фотометрические наблюдения ряда экзопланетных транзитов с использованием инструментов Кавказской горной обсерватории ГАИШ, Крымской астрономической станции и ряда других. Полученные из интерпретации данных кривых радиусы экзопланеты HD 189733 b хорошо согласуются с трендом, определённым на основе интерпретации спутниковых данных той же системы. Удалось выявить различие в радиусах, полученных с фильтрами I и V, которое составляет 2500 и 500 км для экзопланет Qatar-1 b и TOI-2046 b соответственно. Это может говорить о рэлеевском рассеянии в атмосфере данных планет.

Научная и практическая значимость

Написанная программа может быть использована для исследования систем с экзопланетами по фотометрическим данным транзитов. Результаты оценки влияния эксцентриситета на определение параметров потемнения к краю звезды позволяют снять ряд противоречий между теоретическими и эмпирическими оценками, встречавшимися у других авторов. Это позволит в дальнейшем повысить надёжность результатов интерпретации кривых блеска транзитов экзопланет, а также позволит получать более точные данные о распределении яркости по диску звезды, что даст важный эмпирический материал для исследования структуры звёздных атмосфер. Алгоритмы и методы, использовавшиеся при определении зависимости радиуса экзопланеты от длины волны, могут быть использованы в дальнейшем для получения первичных данных об атмосферах экзопланет с использованием массива фотометрических наблюдательных данных.

Впоследствии методы и алгоритмы, применяемые для изучения атмосфер планет-гигантов, могут быть использованы при изучении атмосфер экзопланет земного типа, что является крайне важной задачей в свете поисков биомаркеров и свидетельств внеземной жизни.

Методология и методы исследования

Для реализации поставленных задач была написана программа на языке C++, позволяющая определять радиус, наклон орбиты и другие параметры планетарной системы на основе полученной из наблюдений кривой блеска. В качестве наблюдательного материала использовались как данные, находящиеся в открытом доступе, прежде всего высокоточные спутниковые данные для экзопланет: Kepler-7 b, HD 189733 b и HD 209458 b, так и данные, полученные во время наблюдений экзопланетных транзитов в Кавказской горной обсерватории, а также Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ. Также для определения возможностей программы и алгоритмов были проведены пробные интерпретации искусственно смоделированных синтетических кривых блеска.

Также для результатов интерпретации спутниковых кривых блеска экзопланет HD 189733 b и HD 209458 b была проведена интерпретация значений радиуса экзопланеты, полученных для разных длин волн, с целью определения предварительных характеристик атмосфер данных планет. Данная интерпретация проводилась в рамках двух моделей: полностью изотермической рэлеевской атмосферы, в которой распределение вещества на всём протяжении радиуса подчинено экспоненциальному закону, и модели атмосферы с облаками, в которой планета внутри слоя облаков представлена непрозрачным чёрным кружком, окружённым экспоненциальной рэлеевской атмосферой.

Достоверность и обоснованность результатов

Диссертация опирается на методы и теории, описанные в прошедших рецензирование научных статьях и книгах, посвященных изучению внесолнечных планет, анализу и обработке фотометрических данных. Созданное автором программное обеспечение, написанное на языке C++, основано на стандартных алгоритмах, применяемых при моделировании и обработке экзопланетных кривых блеска. Код программы выложен в открытый доступ.

Методы, используемые для обработки наблюдательных данных, являются стандартными методами, признанными научным сообществом. Выводы, там, где это возможно, сравнивались с опубликованными в рецензируемых журналах результатами исследований других авторов. Результаты данной работы прошли рецензию и опубликованы в ведущих научных журналах.

Положения, выносимые на защиту

1. Интерпретация кривых блеска фотометрических наблюдательных данных экзопланетных транзитов с использованием стандартных алгоритмов, использующих метод наименьших квадратов, позволяет определить расстояние от планеты до звезды в момент транзита. Это расстояние определяется эксцентриситетом и аргументом перицентра. Для определения значения каждого из этих параметров по отдельности необходимы дополнительные спектральные наблюдательные данные.

2. Наличие даже небольших значений эксцентриситета ($e < 0.05$) влияет на определяемые из интерпретации фотометрических наблюдений коэффициенты потемнения к краю звезды. Расхождения между теоретическими коэффициентами, получаемыми на основе моделирования звёздных атмосфер, и эмпирическими, получаемыми из интерпретации кривых блеска, для системы HD 209458 могут быть объяснены отличиями её орбиты от круговой.
3. Фиксирование параметров наклона орбиты, радиуса звезды и других позволяет существенно улучшить точность определения зависимости радиуса планеты от длины волны. Изменение радиуса звезды и наклона орбиты, заданных одинаково для всех длин волн, влияет на абсолютные значения радиуса планеты, но оказывает слабое влияние на характер его зависимости от длины волны. В то же время изменение заданного эксцентриситета орбиты может значительно влиять на определяемую зависимость радиуса от длины волны. В таком случае, при сведении задачи интерпретации к однопараметрической, зависимость среднеквадратичной ошибки определения радиуса экзопланеты от ширины шумовой дорожки близка к линейной (при фиксированном числе точек кривой блеска), а зависимость от количества точек (при фиксированной точности кривой блеска) имеет характер обратно пропорциональный корню квадратному.
4. Зависимость радиуса планеты от длины волны, полученная для экзопланеты HD 189733 b, соответствует модели изотермической рэлеевской атмосферы, средний молекулярный вес которой составляет $M = 1.18\text{--}1.28$, что соответствует атмосфере, состоящей преимущественно из атомарного водорода.
5. Фраунгоферовы линии натрия ($5895.92\text{ \AA}$ и $5889.95\text{ \AA}$) в атмосфере экзопланеты HD 209458 b проявляются не только в спектральных, но и в фотометрических наблюдательных данных этой системы. Значения радиуса, полученные для фильтров, на диапазон которых приходятся данные линии, на $440\text{--}600\text{ км}$ превосходят значения, соответствующие общему тренду зависимости радиуса планеты от длины волны. Это соответствует эквивалентной ширине линий натрия в $0.13\text{--}0.18\text{ \AA}$.
6. Различие в радиусах планет в фильтрах I и B для экзопланет Qatar-1 b и TOI-2046 b, составляет 2500 и 500 км соответственно, на основе интерпретации наблюдений, проведённых в КГО и Крымской астрономической станции ГАИШ. Результаты, полученные для радиусов экзопланеты HD 189733 b, соответствуют тренду, установленному на основе интерпретации спутниковых фотометрических данных.

Аппробация результатов

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными

базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Результаты диссертации были доложены на следующих конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024 «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и чёрных дыр» САО РАН (п. Нижний Архыз Карачаево-Черкесской республики), Россия, 25-31 августа 2024.
2. Международная школа «Исследования экзопланет – 2024» Институт астрономии Российской академии наук, г Москва, Россия, 18-19 ноября 2024.
3. Всероссийская научная конференция «Современная астрономия: наука и образование» Государственный астрономический институт им. Штернберга, г. Москва, Россия, 23-27 июня 2025.

Личный вклад автора

Автором была самостоятельно написана программа, позволяющая проводить интерпретацию данных наблюдений транзитов внесолнечных планет с целью определения характеристик наблюдаемых систем. Автором самостоятельно проведена интерпретация нескольких десятков кривых блеска, полученных в ходе спутниковых и наземных наблюдений транзитов таких экзопланет, как Kepler-7 b, HD 189733 b, HD 209458 b, HAT-P-16 b, Qatar-1 b, TOI-2046 b и ряда других. Автором была выдвинута гипотеза о влиянии эксцентриситета орбиты экзопланет на определяемые коэффициенты потемнения к краю диска звезды и показано, что это влияние может объяснять расхождение теоретических и эмпирических коэффициентов в случае экзопланеты HD 209458 b. Также автором предложен метод фиксации ряда параметров при интерпретации многоцветных фотометрических данных транзитов, позволивший уточнить характер зависимости радиуса экзопланеты от длины волны. В работе 1 описывается принцип действия написанной автором программы; также автором с её помощью были проведены интерпретации наблюдательных фотометрических данных экзопланет TrES-3 b, HAT-P-19 b, KOI-196 b и WASP-60 b, определены их характеристики. Личный вклад 75%. В работе 2 автором была выдвинута гипотеза о влиянии значений эксцентриситета на получаемые значения коэффициентов потемнения к краю, а также проведена интерпретация спутниковых фотометрических наблюдений экзопланеты HD 209458 b. Личный вклад 80%. В работе 3 автором были смоделированы и проинтерпретированы синтетические кривые блеска, полученные как в его программе, так и в программе, написанной М. К. Абубекеровым и Н. Ю. Гостевым. Также автором была проведена интерпретация фотометрических наблюдений транзитов экзопланеты Kepler-7 b и получена зависимость характеристик системы от заданных значений эксцентриситета. Личный вклад 65%. Работы 4 и 6 публиковались без соавторов. Личный вклад 100%. В работе 5 автором проведена интерпретация кривых блеска экзопланет HD 189733 b, HAT-P-13 b, HAT-P-16 b и HAT-P-65 b, определены их радиусы и наклонения орбит. Личный вклад 65%.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 118 страниц текста с 43 рисунками и 34 таблицами. Список литературы содержит 104 наименования на 14 страницах.

Основное содержание работы

Во **Введении** описана актуальность темы, цели и задачи работы, научная новизна и методология, научная и практическая значимость исследования, достоверность и обоснованность результатов, личный вклад автора, публикации и апробация результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена описанию программы, написанной автором с использованием языка C++ для интерпретации кривых блеска. Данная программа впоследствии использовалась при получении результатов, представленных в последующих главах диссертации. В разделе **1.1** описана постановка задачи и цели, которых планировалось достичь написанием данной программы, а также объяснены причины использования собственного кода вместо имеющихся в настоящий момент в открытом доступе программ. В разделе **1.2** описана та часть программы, которая отвечает за решение так называемой прямой задачи, то есть построение кривой блеска по заданным параметрам экзопланетной системы. В разделе **1.3** представлен алгоритм решения уже обратной задачи, то есть определения набора параметров на основе имеющихся наблюдательных данных при помощи метода наименьших квадратов.

В **Главе 2** описываются результаты исследования влияния оценки эксцентриситета экзопланетной системы на результаты интерпретации фотометрических данных. В разделе **2.1** рассматривается вопрос возможности определения эксцентриситета и аргумента перицентра системы на основе данных фотометрических наблюдений, а также исследуется их связь с другими параметрами. Вначале (раздел **2.1.1**) определяются цели и задачи подобной работы, проводится обзор существующих работ и объясняется теоретическая основа выдвинутых предположений. Далее (раздел **2.1.2**) проводится исследование результатов интерпретации синтетических кривых блеска при разных значениях эксцентриситета и аргумента перицентра с целью определить их влияние на определяемые характеристики и величины невязок. Впоследствии (раздел **2.1.3**) проводится аналогичная работа с реальными наблюдательными данными экзопланеты Kepler-7 b. В разделе **2.2** представлены результаты интерпретации кривых блеска экзопланеты HD 209458 b, полученных при наблюдениях на телескопе HST на 10 различных длинах волн в диапазоне от 320 до 970 нм. Также исследовано влияние априорно принятых в модели значений эксцентриситета на определяемый по наблюдательным данным закон потемнения к краю звезды. Выдвинута и проверена гипотеза о том, что имевшиеся в ряде случаев расхождения между теоретическими и эмпирически полученными коэффициентами потемнения к краю могут быть объяснены наличием у системы HD 209458 b небольшого эксцентриситета. Раздел **2.3** подытоживает результаты данной главы.

В **Главе 3** приводятся результаты исследований возможности поиска следов атмосфер экзопланет на основе выявления зависимости определяемого радиуса экзопланеты от длины волны, полученной из интерпретации данных многоцветных фотометрических наблюдений. В разделе **3.1** на примере интерпретации синтетических кривых блеска находится точность определения радиуса экзопланеты в рамках решения однопараметрической задачи. В разделе **3.2** приводятся результаты интерпретации кривых блеска транзитов экзопланеты HD 189733 b, полученные при наблюдении с телескопа HST в диапазоне длин волн от 550 до 1050 нм, с использованием одинаковых для разных длин волн значений радиуса звезды и наклона орбиты. Полученная в результате зависимость радиуса планеты от длины волны интерпретируется в соответствии с моделью изотермической экспоненциальной атмосферы с облачным слоем. В разделе **3.3** проводится интерпретация спутниковых кривых блеска HD 189733 b, а также кривых блеска HD 209458 b, использовавшихся во второй главе, с применением уточнённого четырёхпараметрического закона потемнения к краю. На основе выявленных зависимостей радиусов экзопланет от длины волны дана оценка параметров экзопланетной атмосферы в рамках полностью изотермической экспоненциальной модели. Раздел **3.4** подытоживает результаты данной главы.

В **Главе 4** результаты предыдущей главы используются при проведении интерпретации наблюдательных данных, полученных с наземных телескопов. В разделе **4.1** описывается наблюдательная программа, проведённая на телескопах КГО и КАС ГАИШ, приводятся кривые блеска, полученные в ходе многоцветных фотометрических наблюдений экзопланет HD 189733 b, HAT-P-16 b, Qatar-1 b и TOI-2046 b. В разделе **4.2** приведены результаты интерпретации данных кривых блеска в рамках решения однопараметрической задачи. Показаны выявленные зависимости радиуса от длины волны. Для HD 189733 b результаты, полученные из наземных наблюдений, сопоставлены с результатами интерпретации высокоточных спутниковых наблюдений, описанными в Главе 3. Раздел **4.3** подытоживает результаты данной главы.

В **Заключении** представляются главные результаты диссертации, делаются основные выводы, описываются перспективы дальнейших исследований.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

1. Бекесов Е. В., Белинский А. А., Попов С. Б. Программа для определения размеров планет и наклона орбит по данным наблюдений транзитов // *Астрономический журнал*. – 2021. – Т. 98. – №. 12. – С. 1043-1056. EDN: JQIULZ. Импакт-фактор 0.477(РИНЦ). Объём 1.68 печ. л.

- Переводная версия: Bekesov E. V., Belinskii A. A., Popov S. B. Software to Determine the Sizes and Orbital Inclinations of Planets from the Transit Observation Data // Astronomy Reports. – 2021. – Vol. 65. – №. 12. – pp. 1278-1291. EDN: YLWAZS. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объем 1.68 печ. л. Личный вклад 75%.
2. Бекесов Е. В., Черепашук А. М. Влияние эксцентриситета орбиты планеты на значения коэффициентов потемнения к краю затмеваемой звезды // Астрономический журнал. - 2023. - Т. 100. - № 2. - С. 173-185. EDN: CIZPKY. Импакт-фактор 0.477 (РИНЦ). Объем 1.56 печ. л.
- Переводная версия: Bekesov E. V., Cherepashchuk A. M. Effect of the Eccentricity of the Planet's Orbit on the Limb Darkening Coefficients of the Eclipsed Star // Astronomy Reports. – 2023. – Vol. 67. – №. 2. – pp. 151-162. EDN: OKOFGV. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объем 1.44 печ. л. Личный вклад 80%.
3. Бекесов Е. В., Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю., Черепашук А. М. Возможность оценки эксцентриситета орбиты двойной системы с экзопланетой по транзитной кривой блеска // Астрономический журнал. - 2023. - Т. 100. - № 11. - С. 964-986. EDN: YGKUVD. Импакт-фактор 0.477 (РИНЦ). Объем 2.76 печ. л.
- Переводная версия: Bekesov, E. V., Abubekеров, M. K., Gostev, N. Y., Cherepashchuk, A. M. On the Possibility to Estimate the Orbital Eccentricity of a Binary System with an Exoplanet from a Transit Light Curve // Astronomy Reports. – 2023. – Vol. 67. – №. 11. – pp. 1096-1122. EDN: KIKIGT. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объем 3.24 печ. л. Личный вклад 65%.
4. Бекесов Е. В. Определение структуры атмосферы экзопланеты HD 189733 b на основе многоцветных фотометрических наблюдений транзита // Астрономический журнал. - 2024. - Т. 101. - № 8. - С. 715-724 EDN: ITKXJU. Импакт-фактор 0.477 (РИНЦ). Объем 1.2 печ. л.
- Переводная версия: Bekesov E. V. Determining the Structure of the Atmosphere Exoplanet HD 189733b Based on Multicolor Photometric Transit Observations // Astronomy Reports. – 2024. – Vol. 68. – №. 8. – pp. 790-801. EDN: SGLBTI. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объем 1.2 печ. л. Личный вклад 100%.
5. Бекесов Е. В., Лызенко К. А., Черепашук А. М., Белинский А. А., Масленникова Н. А., Татарников А. М. Поиск следов атмосфер у экзопланет по многоцветным фотометрическим наблюдениям транзитов // Астрофизический бюллетень. - 2025. - Т. 80. - № 1. - С. 72–85. EDN: LELIQX. Импакт-фактор 0.484 (РИНЦ). Объем 1.68 печ. л.

Переводная версия: Bekesov, E. V., Lyzenko, K. A., Cherepashchuk, A. M., Belinsky, A. A., Maslennikova, N. A., Tatarnikov, A. M. Searching for Traces of Exoplanet Atmospheres Using Multicolor Photometric Observations of Transits // Astrophysical Bulletin. – 2025. – Vol. 80. – №. 1. – pp. 69-82. EDN: MBDWYB. Импакт-фактор 0.31 (JCI). Объем 1.68 печ. л. Личный вклад 65%.

6. Бекесов Е. В. Характеристики экзопланет в транзитных системах HD 189733 и HD 209458: учет четырёхпараметрического закона потемнения звезды в рамках трехмерной модели ее атмосферы // Астрономический журнал. - 2025. - Т. 102. - № 9. - С. 810-820. EDN: WRCNGW. Импакт-фактор 0.477 (РИНЦ). Объем 1.32 печ. л.
- Переводная версия: Bekesov E. V. Characteristics of Exoplanets in Transiting Systems HD 189733 and HD 209458: Considering the Four-Parameter Law of Star Darkening within the Framework of a Three-Dimensional Model of Its Atmosphere // Astronomy Reports. – 2025. – Vol. 69. – №. 7. – pp. 609-621. EDN: TBGYMB. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объем 1.2 печ. л. Личный вклад 100%.

Список литературы

- [1] Jacob W. S. On certain anomalies presented by the binary star 70 Ophiuchi. – 1855. DOI: 10.1093/mnras/15.9.228
- [2] See T. J. J. Researches on the orbit of 70 Ophiuchi, and on a periodic perturbation in the motion of the system arising from the action of an unseen body // *Astronomical Journal*, vol. 16, iss. 363, p. 17-23 (1896). – 1896. – Т. 16. – С. 17-23. DOI: 10.1086/102368
- [3] Сахибулин Н.А. Экзопланеты. Издательство Казанского университета. 2020.
- [4] The Extrasolar Planets Encyclopaedia. <https://exoplanet.eu/catalog>
- [5] Kurtz M. J., Accomazzi A., Henneken E. A. Merging the Astrophysics and Planetary Science Information Systems // arXiv preprint arXiv:1803.03598. – 2018.
- [6] Bailey J. The Dawes Review 3: The atmospheres of extrasolar planets and brown dwarfs // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. – 2014. – Т. 31. – С. e043. arXiv:1409.6821 [astro-ph.EP]
- [7] Benz W. et al. Planet population synthesis // arXiv preprint arXiv:1402.7086. – 2014.
- [8] NASA Exoplanet Archive. exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.
- [9] Seager S., Mallen-Ornelas G. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve // *The Astrophysical Journal*. – 2003. – Т. 585. – №. 2. – С. 1038.
- [10] Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю. Аспекты оптимизации транзитной кривой блеска двойной системы с одним минимумом по составляющим эксцентриситета // *Астрономический журнал*. – 2025. – Т. 102. – №. 8. – С. 671-682.
- [11] "Astrometric Detection and Characterization of Exoplanets" in *Exoplanets*, edited by S. Seager. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2010, 526 pp. ISBN 978-0-8165-2945-2., p.157-174.
- [12] Sing D. K. Observational techniques with transiting exoplanetary atmospheres // *Astrophysics of Exoplanetary Atmospheres: 2nd Advanced School on Exoplanetary Science*. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – С. 3-48. arXiv:1804.07357 [astro-ph.EP]