

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Бекесов Егор Владимирович

Влияние тонких эффектов на результаты интерпретации
наблюдений экзопланетных транзитов

Специальность: 1.3.1. Физика космоса астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

Москва – 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Программа для интерпретации кривых блеска	24
1.1 Постановка задачи	24
1.2 Моделирование кривой блеска по заданным параметрам системы	25
1.3 Интерпретация кривых блеска	30
Глава 2. Исследование влияния эксцентриситета на результаты интерпретации транзитных кривых блеска	33
2.1 Определение эксцентриситета экзопланетной орбиты на основе интерпретации кривых блеска	33
2.1.1 Цели и постановка задачи	33
2.1.2 Интерпретация синтетических модельных кривых	34
2.1.3 Интерпретация кривых блеска Kepler-7 b	41
2.2 Оценка влияния значения эксцентриситета на результаты определения коэффициентов потемнения к краю для системы HD 209458	45
2.3 Выводы	52
Глава 3. Определение влияния атмосферы на радиус экзопланеты на основе интерпретации спутниковых кривых блеска HD 189733 b и HD 209458 b	58
3.1 Интерпретация смоделированных кривых блеска	58
3.2 Интерпретация с использованием квадратичного закона потемнения к краю и модели с облачным слоем	63
3.3 Интерпретация с использованием четырёхпараметрического закона потемнения к краю и простой экспоненциальной модели атмосферы	72
3.4 Выводы	85

Глава 4. Интерпретация наземных многоцветных фотометрических наблюдений	86
4.1 Выбор планет и проведение наблюдений	86
4.2 Полученные результаты	87
4.3 Выводы	93
Заключение	95
Благодарности	98
Список литературы	99
Приложение А. Кривые блеска экзопланетных транзитов полученные в ходе наблюдений в КГО и на Крымской астрономической станции ГАИШ . .	110

Введение

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Изучение экзопланет является относительно новой, но крайне быстро развивающейся областью астрономии. Хотя первые предположения и теории о существовании планет в иных звёздных системах высказывались ещё в XIX веке (Jacob, 1855; See, 1896), первые надёжные результаты, подтвердившие существование внесолнечных планет, относятся к самому концу двадцатого века (Сахибулин, 2020). В 1988 году канадскими астрономами Кемпбеллом, Уолкером и Янгом была открыта планета, вращающаяся вокруг звезды γ *Ceph* (Campbell et al., 1988). Хотя сами исследователи изначально отказались от версии, связанной с существованием экзопланеты, впоследствии, в 2002 году, было установлено, что наблюдавшиеся у данной звезды колебания лучевых скоростей действительно связаны с наличием планетной системы. Спустя год Латамом и др. был обнаружен объект, вращающийся вокруг звезды HD 114762 (Latham et al., 1989), однако и в данном случае он не был связан с наличием у звезды планетной системы и был отнесён к классу коричневых карликов. Тем не менее, в 1999 году был подтверждён планетный статус данного объекта.

Впоследствии, были открыты подтверждённые экзопланеты у пульсаров PSR 1829-10b (Bailes et al., 1991) и PSR 1257+12 (Wolszczan and Frail, 1992) в 1992 году, а также PSR B162026 в 1993 (Thorsett et al., 1993). 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. За данное открытие в 2019 году Мишелю Майору и Дидье Кело была присуждена Нобелевская премия по физике.

Окончательно вопрос о существовании экзопланет будет снят в 2002 году с открытием экзопланеты в системе HD 209458 при помощи метода транзитной фотометрии, показавшим падение блеска звезды на 1.6 % в момент прохождения планеты по её диску (Charbonneau et al., 2000; Henry et al., 1999). Впоследствии, планетная система HD 209458 станет одной из наиболее хорошо изученных, а транзитный метод – одним из самых результативных методов

поиска и открытия внесолнечных планет. В дальнейшем количество обнаруженных внесолнечных планет начало расти экспоненциальными темпами вместе с ростом точности оборудования и совершенствованием методик обработки наблюдательных данных. 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), основной задачей которых был поиск и обнаружение экзопланет.

Однако все вышеуказанные планеты относились к классу газовых гигантов – планетам большего размера и массы, которые проще зафиксировать благодаря их большому влиянию на лучевые скорости звезды и падение блеска в ходе транзита. Первая же планета, относящаяся к земной группе, для которой была подтверждена её плотность, была обнаружена в системе 55 Cancri в 2004 году (McArthur et al., 2004). Такие планеты, хотя и являются намного более трудными для обнаружения и исследования, представляют значительный интерес, так как их исследования в теории могут способствовать открытию внеземной жизни. Так, в 2015 году были открыты экзопланеты Kepler-62 f, Kepler-186 f и Kepler-442 b (Torres et al., 2015), находящиеся в пределах обитаемых зон своих звёзд, то есть лежащие на достаточном расстоянии, чтобы иметь температуру, подходящую для существования жидкой воды. Среди недавних открытий следует отметить обнаружение следов диметилсульфида и диметилдисульфида в атмосфере экзопланеты K2-18 b по наблюдениям, проведённым JWST (Madhusudhan et al., 2025). На Земле данные вещества встречаются только как продукт жизнедеятельности бактерий и при подтверждении их наличия в атмосфере могут служить существенным доказательством в пользу существования внеземной жизни.

В настоящее время открыто более семи тысяч экзопланет в более чем пяти тысячах звёздных систем, также более двух тысяч кандидатов ожидают подтверждения (The Extrasolar Planets Encyclopaedia URL: exoplanet.eu/catalog). Каждый год в рецензируемых журналах публикуются тысячи статей, посвящённых данной тематике (Kurtz et al., 2018). Написан ряд монографий, как

посвящённых отдельным аспектам, так и содержащих достаточно полный обзор темы, например, (Сахибулин, 2020).

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 (Bailey, 2014). 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 (Benz et al., 2014).

Существует несколько методов наблюдения и изучения экзопланет.

Метод лучевых скоростей, также называемый методом Доплера, основан на измерении вариаций лучевых скоростей звезды при движении вокруг общего с планетой центра масс (Montmerle et. al., 2010). На данный момент с использованием этого метода открыто более тысячи экзопланет (NASA Exoplanet Archive URL: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu), в частности, им была открыта экзопланета HD 208897 b – первая экзопланета, открытая российскими астрономами (Yilmaz et al., 2017). Такой метод основан на спектральном анализе звезды и требует крайне высокой точности спектрометрии, однако он позволяет в ряде случаев не только обнаружить экзопланету, но и определить её массу через соотношение масс планет и звезды. Вместе с данными о размере планеты это может дать информацию о её плотности, что крайне важно, например, при определении класса планеты. Также форма кривой лучевых скоростей может дать информацию об эксцентриситете экзопланетной орбиты (Murray and Correia, 2010).

Несколько менее распространёнными методами являются метод гравитационного линзирования (Gould and Loeb, 1992) и метод периодических пульсаций у пульсаров (Kramer, 2018). Первый основан на поиске аномалий в картине, формирующейся, когда свет далёкой звезды претерпевает преломление в гравитационном поле звезды с планетной системой. Второй основан на постоянстве

периодичности импульсов, испускаемых пульсарами, из-за чего их относительно небольшие изменения могут быть свидетельством движения пульсара вдоль оси зрения, что может быть связано с наличием у него планетной системы. Именно таким способом был открыт ряд первых экзопланет, однако, вследствие своей неприменимости к звёздам других типов, в настоящее время он занимает достаточно небольшую долю по числу обнаруженных экзопланет.

Самым результативным по числу обнаруженных экзопланет (более четырёх тысяч объектов на конец 2024 года)(NASA Exoplanet Archive URL:exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.), 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. При условии длительных наблюдений звезды и при наличии нескольких таких падений блеска, происходящих с примерно равными периодами, можно говорить о наличии у звезды планетной системы или второго компонента. Для отбрасывания последнего варианта необходимо исследовать внезатменную кривую блеска, проверить наличие вторичного транзита, а также оценить возможный радиус второго компонента.

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 (Mallen-Ornelas et al., 2002; Seager and Mallen-Ornelas, 2003). Форма кривой блеска в момент транзита, длительность времени, в течение которого наблюдается падение блеска, его глубина могут дать информацию о радиусе планеты, наклоне её орбиты к картинной плоскости, большой полуоси орбиты, периоде обращения (Winn, 2010), а в некоторых случаях об эксцентриситете и аргументе перицентра (Абубекеров и Гостев, 2025), а также о характере распределения яркости по диску звезды, связанном с так называемым потемнением к краю диска (Mandel and Agol, 2002).

Так, глубина транзита, то есть отношение падения блеска звезды к её яркости вне транзита, в первом приближении равна отношению квадратов ра-

диусов планеты и звезды. Хотя в реальности из-за эффекта потемнения к краю, а также в случае скользящих транзитов (при которых диск планеты не заходит полностью на диск материнской звезды, а проходит вдоль его края) эти значения могут достаточно сильно отличаться. Это отличие зависит от, так называемого, прицельного параметра (расстояния от проекции центра планеты на картинной плоскости до центра звезды), который, в свою очередь, зависит от наклона орбиты, эксцентриситета, большой полуоси орбиты. Продолжительность транзита зависит как от линейного расстояния, которое должна пройти планета во время транзита, так и от скорости движения экзопланеты по орбите. При этом расстояние определяется наклоном орбиты, радиусом звезды и радиусом самой планеты. Скорость движения по орбите зависит от таких параметров, как большая полуось орбиты, период обращения, эксцентриситет и аргумент перицентра.

Также форма кривой блеска внутри транзита может существенно отличаться в зависимости от того, как распределена яркость по диску звезды, а также от того, через какие области проходит планета в ходе транзита (что зависит от прицельного параметра). Для некоторых транзитов после того, как планета полностью зашла на диск материнской звезды (точка внутреннего касания), блеск меняется незначительно, и дно транзитной кривой выглядит достаточно плоским. В то же время для других транзитов из-за сильного перепада яркости от края к центру звезды яркость внутри транзита продолжает падать и в центральной точке транзита оказывается существенно ниже, чем в точках внутреннего касания (Winn, 2010).

Отдельно стоит отметить влияние на движение транзитной планеты других массивных тел, присутствующих в системе звезды. Их гравитационное поле может изменять скорость движения планеты и приводить к изменению времени транзита. Этот эффект лежит в основе ещё двух методов обнаружения экзопланет, называемых методом вариации времени (Schneider, 2004) и методом вариации длительности транзита (Agol and Fabrycky, 2018), позволяющих обнаруживать экзопланеты в системах, где уже обнаружена хотя бы одна транзитная планета.

Таким образом, транзитный метод, с одной стороны, является источником ценной информации о планетной системе, с другой стороны, все вышеуказанные

взаимосвязи делают задачу интерпретации транзитных кривых блеска и определения на их основе характеристик планеты и планетной системы достаточно нетривиальной. В настоящее время существует ряд программ, позволяющих с использованием математических и статистических методов проводить интерпретацию транзитных кривых блеска, например, Jktebop (Southworth, 2012), Exofast (Eastman et al., 2013) Exonailer (Espinoza, 2018) и другие. Результаты, представленные в данной работе, были получены автором с использованием собственной программы, принцип работы которой будет описан в главе 1.

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 (Miralda-Escudé, 2002), переменность звёздной активности (Saba et al., 2024), наличие пятен на диске звезды (Абубекеров и Гостев, 2022), небольшие значения эксцентриситета у орбит, близких к круговым (Moutou et al., 2005), наличие атмосферы у экзопланет (особенно в случае горячих Юпитеров (Bisikalo et al., 2019)). Непосредственно в данной работе будет рассматриваться влияние двух эффектов: эксцентриситета и планетарной атмосферы.

Влияние эксцентриситета на форму транзитной кривой блеска может проявляться двояко. Во-первых, при отличии формы орбиты экзопланеты от круговой её расстояние до звезды и, как следствие, скорость движения могут меняться в течение транзита. Это приводит к тому, что средняя точка транзита (момент, когда планета проходит ближе всего к центру диска звезды, и, соответственно, глубина падения блеска становится максимальной) оказывается смещена по времени относительно среднеарифметического от момента начала и момента конца транзита, и вся кривая блеска в пределах транзита перестает быть симметричной относительно середины. Впрочем, подобный эффект проявляется только при больших значениях эксцентриситета ($e > 0.1$), которые являются достаточно редкими среди горячих Юпитеров (Van Eylen and Albrecht, 2015), а при тех значениях, что будут рассмотрены в данной работе, его влияние оказывается существенно меньше индивидуальной точности наблюдений.

В то же время другое проявление эксцентриситета, выражающееся в изменении расстояния от звезды до планеты относительно измеренного значе-

ния большой полуоси, 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 массы материнской звезды, которую в большинстве случаев можно определить из фотометрических и спектральных данных (Eker et al., 2018). 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 перицентра. Данное расстояние критически важно для интерпретации кривой блеска транзита, так как от него зависит величина прицельного параметра, который в первом приближении можно рассматривать как $p = r_{mid} \cos i$, где r_{mid} – фокальный радиус экзопланеты в средней точке транзита, i – наклон орбиты по отношению к картинной плоскости. Даже для близких к своим звёздам планет фокальные радиусы в момент транзита, как правило, в несколько раз превышают радиусы самих звёзд; таким образом, даже небольшое относительное изменение расстояния может существенно изменить положение наблюдаемого диска планеты на диске материнской звезды, сместив его ближе или дальше от центра. Так как диск звезды имеет разную яркость на разном расстоянии от центра, 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 (Neilson, 2011).

Другим тонким эффектом является наличие атмосферы у внесолнечной планеты. Атмосферы газовых гигантов являются достаточно протяжёнными, особенно в случае, если мы говорим о горячих Юпитерах, температуры которых могут превышать $1000^\circ K$, что приводит к расширению и истечению газа во внешних слоях планеты (Бисикало и др., 2013; Shematovich and Marov, 2018). Такие атмосферы могут задерживать поток излучения звезды, достаточный, чтобы оказать влияние на форму кривой блеска и привести к изменению характеристик планеты, получаемых на основе её интерпретации (Quirrenbach, 2010). При интерпретации, которая рассматривает планету как чёрный непро-

зрачный кружок, увеличение глубины транзита за счёт поглощения и рассеяния лучей звезды экзопланетной атмосферой приводит к увеличению получаемого радиуса планеты.

Важным фактором здесь является то, что рассеяние света атмосферой происходит по-разному на разных длинах волн: чем больше длина волны, тем меньше эффективное сечение рассеяния. Например, в случае если рассеяние происходит строго по Рэлеевскому закону, сечение и, как следствие, объёмный коэффициент рассеяния обратно пропорциональны длине волны в четвёртой степени. Вследствие этого влияние, оказываемое наличием 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.

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 спектральных наблюдений. 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.

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 Å и 5889.95 Å) на 440–600 км, что соответствует эквивалентной ширине линий натрия в 0.13–0.18 Å 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 ра-

диуса 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 ра-

диуса 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.

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%.

Апробация 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.

Положения данной работы были представлены 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.

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). Объем 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). Объём 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). Объём 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: OKOFGB. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объём 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: YGKUUD. Импакт-фактор 0.477 (РИНЦ). Объём 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). Объём 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). Объём 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). Объём 1.2 печ.

л. Личный вклад 100%.

5. Бекесов Е. В., Лызенко К. А., Черепашчук 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%.

Объем и структура работы

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

Во **Введении** описана актуальность темы, цели и задачи работы, научная новизна и методология, научная и практическая значимость исследования, до-

стоверность 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.

Глава 1. Программа для интерпретации кривых блеска

Глава основана на работе 1 из списка публикаций по теме диссертации.

1.1 Постановка задачи

Задача определения характеристик экзопланетной системы является достаточно нетривиальной и требует учёта комплекса взаимосвязей между влияниями разных параметров экзопланеты и экзопланетной орбиты на форму кривой блеска. В настоящее время в данной области существует ряд программ, которые позволяют решить данную задачу. В таких программах, как Exomop (Pearson et al., 2013), Exonailer (Espinoza et al., 2016), Jktebop (Southworth, 2013) интерпретация проводилась при помощи решения прямой задачи, под которой в данной работе подразумевается моделирование транзитной кривой блеска на основе заданных характеристик системы, с тем чтобы впоследствии подобрать такие характеристики, для которых модельная кривая будет наиболее близка к наблюдаемой кривой с точки зрения критерия χ^2 . Так же существует ряд программ, например, программа, представленная в архиве Exoplanet Transit Database (Poddany et al., 2010), и программа, разработанная сотрудниками ГАИШ Маратом Абубекеровым и Николаем Гостевым (Абубекеров и др., 2010), в которых интерпретация кривых блеска происходит с использованием аналитических функций.

Тем не менее, попытки использовать некоторые из данных программ в нашей работе столкнулись с рядом проблем, которые были связаны как с удобством их использования, так и с вопросами относительно точности получаемых результатов. Таким образом, автором на языке C++ была написана собственная программа, ориентированная непосредственно на те задачи, которые предполагалось решить в рамках выполнения данной работы. Впоследствии в данной работе лишь для обработки нескольких транзитов на первом этапе применялась программа, представленная на сайте Exoplanet Transit Database, для предварительной оценки моментов начала и окончания транзита.

1.2 Моделирование кривой блеска по заданным параметрам системы

В рамках моделирования кривой блеска уровень падения излучения звезды рассчитывался отдельно для каждого момента времени. При интерпретации кривых блеска количество точек и соответствующее каждой точке значения времени принимались равными таковым в интерпретируемой кривой. Падение блеска в каждой точке рассчитывалось с использованием ряда параметров: радиуса звезды, радиуса планеты, большой полуоси орбиты, её наклона, эксцентриситета, аргумента перигелия, а также коэффициентов, входящих в закон потемнения к краю (от одного до четырёх в зависимости от используемого закона).

Нахождение величины падения блеска в заданный момент времени, в свою очередь, было разбито на две задачи. Первая заключалась в том, чтобы на основе орбитальных характеристик планетной системы определить положение проекции диска планеты на картинную плоскость относительно центра диска звезды. Второй задачей являлось определение величины падения блеска на основе данных о размере и характере области пересечения звёздного и планетного дисков, а также учёта закона потемнения к краю звезды.

Для определения координат центра планеты на картинной плоскости орбита внесолнечной планеты рассматривалась как невозмущённый эллипс. Задача решалась как чисто кинематическая, её динамическая составляющая не учитывалась, что является оправданным для подавляющего большинства систем.

Координаты центра планеты на картинной плоскости определялись при работе программы как функция от времени и кеплеровых элементов орбиты. В первую очередь рассчитывалась средняя аномалия планеты в заданный момент времени, при известном периоде обращения планеты по орбите вокруг материнской звезды, зависимость средней аномалии от времени $M(t)$ можно рассматривать как линейную. Средняя аномалия связана с эксцентрической через уравнение Кеплера ($M = E - e \sin E$, где M – средняя аномалия, E – эксцентрическая аномалия), что позволяет нам определить последнюю. Так как уравнение Кеплера является трансцендентным (Danby and Burkardt, 1983), то его решение проводится при работе программы при помощи серии последова-

тельных приближений:

$$\begin{aligned}
 E_0 &= M + e \sin M \\
 E_1 &= M + e \sin E_0 \\
 &\dots\dots\dots \\
 E_i &= M + e \sin E_{i-1}.
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Далее значение эксцентрической аномалии использовалось для нахождения координаты центра планеты на картинной плоскости для каждого момента времени. Так как помимо величины эксцентрической аномалии расположение проекции планеты на картинной плоскости зависит также от ориентации орбиты в пространстве (что определяется значениями аргумента перигея и наклона орбиты), расчёт происходит в несколько шагов. Сначала считаются координаты для эллипса, лежащего на картинной плоскости, с перигеем, совпадающим с точкой восходящего узла, и линией апсид, совпадающей с осью x . В таком случае:

$$\begin{aligned}
 x_{02} &= a \cos E - a e \\
 y_{02} &= a \sqrt{1 - e^2} \sin E,
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

где a – большая полуось, e – эксцентриситет.

Далее проводится поворот эллипса на угол, равный аргументу перицентра, осуществляемый при помощи двумерной матрицы поворота:

$$\begin{aligned}x_{01} &= x_{02} \cos(-\omega) + y_{02} \sin(-\omega) \\y_{01} &= -x_{02} \sin(-\omega) + y_{02} \cos(-\omega).\end{aligned}\tag{1.3}$$

Здесь ω – аргумент перицентра.

После этого проводится поворот по оси x , отвечающий за учёт наклона орбиты:

$$\begin{aligned}x_0 &= x_{01} \\y_0 &= y_{01} \cos i,\end{aligned}\tag{1.4}$$

где i – наклон орбиты (угол между плоскостью орбиты и картинной плоскостью).

Если бы яркость диска звезды во всех его частях была одинакова, то здесь достаточно было бы просто посчитать отношение площади пересечения проекций дисков звезды и планеты по отношению к общей площади диска звезды. Однако интенсивность излучения звезды может значительно изменяться в зависимости от расстояния до центра диска, вследствие влияния так называемого эффекта потемнения к краю.

Потемнение к краю диска звезды происходит из-за того, что реальные звёздные атмосферы далеки от термодинамического равновесия, в частности, потому что атмосферы излучают и теряют с излучением энергию. Спектр этого излучения отклоняется от закона Планка, и интенсивность излучения зависит от направления. Глубина, на которой атмосфера становится оптически толстой для излучения, выходящего в направлении наблюдателя, зависит от угла между лучом зрения и нормалью к поверхности. Для центра диска эта глубина макси-

мальна и соответствует областям с наибольшей температурой. При смещении взгляда к лимбу луч зрения пересекает атмосферу по наклонной, и условие оптической толщины выполняется в вышележащих, более холодных, слоях. Поскольку интенсивность теплового излучения является функцией температуры, её значение падает по мере приближения к краю диска (Черепашук, 2013).

Иными словами, интенсивность излучения в каждой точке звёздного диска можно рассматривать как функцию угла ψ между нормалью к поверхности звезды и лучом зрения, а точнее от его косинуса. Так как звёзды можно считать бесконечно удалёнными объектами, в данном случае справедливо соотношение:

$$\cos \psi = 1 - \frac{\rho^2}{R^2}, \quad (1.5)$$

где ρ – расстояние от центра проекции звезды до излучающей площадки.

Вопрос о том, как именно зависит интенсивность излучения от $\cos \psi$ остаётся дискуссионным. Существует несколько законов, которые с той или иной точностью позволяют аппроксимировать величину потемнения к краю (см., например, (Claret and Bloemen, 2011)). В нашей программе использовались линейный и квадратичный законы, а также в ряде случаев четырёхпараметрический, как наиболее близкие к эмпирически полученным данным.

Линейный закон (самый простой из всех):

$$\frac{I(\psi)}{I(0)} = 1 - u_1(1 - \cos \psi) \quad (1.6)$$

квадратичный:

$$\frac{I(\psi)}{I(0)} = 1 - u_1(1 - \cos \psi) - u_2(1 - \cos \psi)^2 \quad (1.7)$$

и наиболее точный четырёхпараметрический закон:

$$\frac{I(\psi)}{I(0)} = 1 - \sum_{n=1}^4 u_n(1 - (\cos^{\frac{n}{2}} \psi)) \quad (1.8)$$

Несмотря на относительную простоту этих формул, их интегралы по площади диска планеты не берутся аналитически. Так как все законы потемнения к краю центральносимметричны относительно центра звёздного диска, при работе программы диск звезды разбивается на кольца относительно небольшой

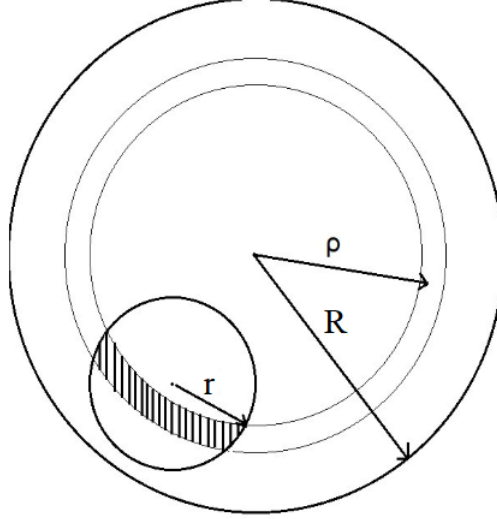


Рисунок 1.1 — Схема, использованная для численного интегрирования потока излучения, закрываемого планетой.

толщины, внутри которых интенсивность излучения можно было бы считать одинаковой. Данная конфигурация показана на рисунке 1.1; заштрихованной областью обозначена часть кольца, закрываемая планетным диском.

Площадь пересечения каждого кольца с диском планеты S равна:

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= \rho - \frac{d\rho}{2} \\
 \rho_2 &= \rho + \frac{d\rho}{2} \\
 \xi_1(\rho_i) &= 2 \arccos((\rho_i^2 - r^2 + \rho_0^2)/(2\rho_i\rho_0)) \\
 \xi_2(\rho_i) &= 2 \arccos((r^2 - \rho_i^2 + \rho_0^2)/(2r\rho_0)) \\
 S_1 &= \frac{(\rho_1^2(\xi_1(\rho_1) - \sin \xi_1(\rho_1)) + r^2(\xi_2(\rho_1) - \sin \xi_2(\rho_1)))}{2} \\
 S_2 &= \frac{(\rho_2^2(\xi_1(\rho_2) - \sin \xi_1(\rho_2)) + r^2(\xi_2(\rho_2) - \sin \xi_2(\rho_2)))}{2} \\
 S &= S_2 - S_1
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

где ρ_0 — расстояние от центра звезды до центра планеты, ρ — радиус середины кольца, $d\rho$ — толщина кольца.

В таком случае полное количество энергии, излучаемое данным участком, равно $d\tilde{I} = I(\rho)S$, где $\tilde{I}(\psi)$ переводится в $\tilde{I}(\rho)$ в соответствии с формулой (5). При ρ , большем, чем радиус звезды R , $\tilde{I}(\rho)$ принимается равным 0. Проведя суммирование по всем кольцам в пределах от $\rho - r$ до $\rho + r$, можно получить суммарный поток энергии, приходящийся на закрываемый планетой участок, а, вычтя его из всего излучения звезды, – получить значение относительно интенсивности в заданный момент времени.

В рамках решения представленных в данной работе задач, а именно интерпретации кривых блеска экзопланет со значениями эксцентриситета $e \leq 0.1$, асимметричностью кривой блеска, вызванной различием скоростей экзопланеты в разные моменты транзита, можно пренебречь (подробнее об этом в главе 2 настоящей работы). Таким образом, влияние параметров эксцентриситета и аргумента перицентра учитывалось только в связи с изменением расстояния от экзопланеты до звезды в момент транзита, которое в зависимости от того, ближе к апоцентру или к перицентру проходил транзит, могло быть больше или меньше, чем большая полуось орбиты. Иными словами, величиной, которую можно получить при интерпретации транзитных кривых блеска, является среднее расстояние от звезды до планеты в момент транзита, характеризуемое величиной $\frac{a(1-e^2)}{1-e \sin \omega}$.

Большую полуось орбиты можно установить с относительно хорошей точностью, зная период обращения и массу системы. Период определяется измерениями промежутка между транзитами, масса звезды может быть получена на основе её спектральных характеристик. Соотношение масс звезды и планеты может быть измерено при помощи данных о вариации лучевой скорости звезды, если они доступны; в противном случае предположение о том, что масса звезды намного превосходит массу планеты, позволяет получить достаточно точные оценки.

1.3 Интерпретация кривых блеска

Изначально аппроксимация в описываемой программе проводилась по двум параметрам: радиусу планеты и наклону орбиты к картинной плоскости. Основной идеей было использование геометрии транзита для определения связи между этими двумя параметрами. Впоследствии для решения задач, тре-

бывавших проведения интерпретации по таким параметрам, как $e \sin \omega$, радиус звезды и коэффициенты потемнения к краю, программа запускалась внутри серии циклов. С одной стороны, в ряде случаев это требовало продолжительных компьютерных вычислений, но, с другой, позволяло избежать проблем, связанных с наличием локальных минимумов и вырождений по ряду параметров, а также дало возможность настроить вывод таким образом, чтобы получить полную картину зависимости функционала χ^2 от различных параметров.

На рисунке 1.2 отражена схематичная конфигурация планетной системы в начале транзита.

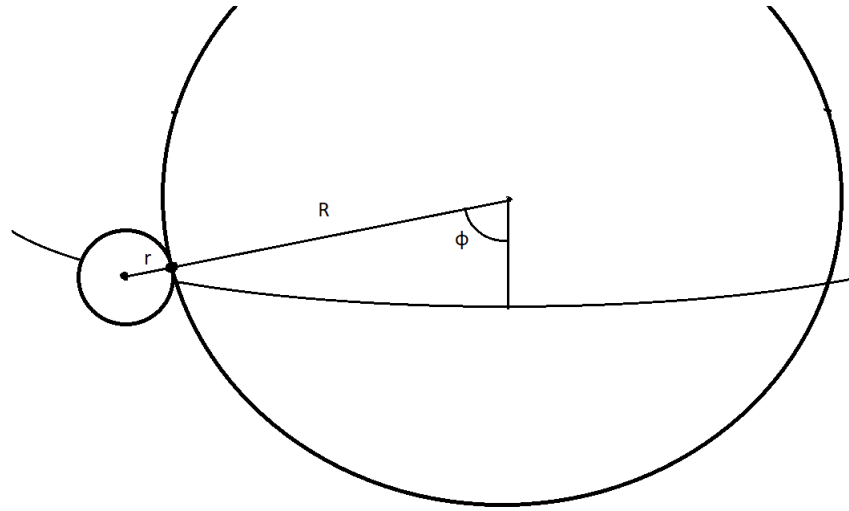


Рисунок 1.2 — Конфигурация планетной системы в момент начала транзита.

Пользуясь общими геометрическими соображениями, для данной конфигурации можно записать следующую систему уравнений (плоскость xu совпадает с картинной, ось z направлена на наблюдателя):

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (R + r)^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 = \frac{p}{1 - e \cos \nu} \\ x = -z \operatorname{tg}(i) \\ y = \frac{p}{1 - e \cos \nu} \sin \phi, \end{cases} \quad (1.10)$$

где p — фокальный параметр, угол ϕ равен разности истинных аномалий $\Delta \nu$.

Решив эту систему, получаем функцию $r(i)$:

$$r = \left(\frac{p}{1 + e \cos \nu} \right) \sqrt{\frac{\sin^2 \phi + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 i}}{(1 + 1/(\operatorname{tg}^2 i))}} - R. \quad (1.11)$$

Разность истинных аномалий рассчитывалась в программе на основе моментов времени начала и конца транзита. Их начальные значения определялись при помощи программы, представленной на сайте Exoplanet transit database и использующей методы интерпретации на основе аналитических функций, с последующим варьированием их в пределах диапазонов ошибок. Изначально заданный диапазон значений наклона орбиты делится на шесть частей. Для каждого из получившихся значений вышеописанная программа моделирования строит модель кривой и рассчитывает величину χ^2 , как сумму квадратов разностей О-С (наблюдаемые значения минус рассчитанные), делённых на погрешности измерения для каждой отдельной точки. Затем точки справа и слева от той, которой соответствует наименьший квадрат отклонений, принимаются в качестве новых границ аппроксимации. При N-кратном повторении данной процедуры диапазон возможных значений наклона орбиты сужается в 3^N раз. В нашей работе хватало проведения 6-7 подобных итераций прежде, чем разница между двумя границами становилась много меньше неточностей, связанных с погрешностями фотометрии транзита.

Стандартные методы нахождения минимума численной функции не использовались из-за наличия в некоторых случаях локальных минимумов у функции $\chi^2(i)$.

После нахождения минимального значения χ^2 находились величины погрешностей по наклону орбиты из соотношения:

$$\chi^2(i \pm \sigma) - \chi^2(i) = 1. \quad (1.12)$$

На основе определённых погрешностей наклона орбиты, исходя из приведённой выше формулы (1.11), связывающей радиус планеты и наклон орбиты, находятся погрешности радиуса:

$$\begin{aligned} r + \sigma_r &= r(i - \sigma), \\ r - \sigma_r &= r(i + \sigma). \end{aligned} \quad (1.13)$$

При добавлении других свободных параметров данные соотношения использовались в многопараметрической форме.

Глава 2. Исследование влияния эксцентриситета на результаты интерпретации транзитных кривых блеска

Глава основана на работах 2 и 3 из списка публикаций по теме диссертации.

2.1 Определение эксцентриситета экзопланетной орбиты на основе интерпретации кривых блеска

2.1.1 Цели и постановка задачи

Подавляющее большинство из обнаруженных к настоящему моменту экзопланетных систем открыты фотометрическим методом, в основе которого лежат транзитные кривые блеска. Большое количество наблюдений, проведённых в рамках различных программ на различных аппаратах как наземного, так и космического базирования, позволило собрать огромный банк информации, который в данный момент используется прежде всего для того, чтобы определять такие параметры экзопланетных систем, как радиус звезды, радиус планеты, наклонение орбиты к картинной плоскости. В то же время такие характеристики непосредственно орбитального движения внесолнечных планет, как эксцентриситет и аргумент перицентра, также представляющие значительный интерес, зачастую ускользали от внимания исследователей экзопланетных транзитов. Основным источником информации о характеристиках и ориентации в пространстве орбит внесолнечных планет в настоящее время являются спектральные наблюдения и получаемые на их основе кривые лучевых скоростей. Однако точные спектрометрические данные доступны не для всех систем.

Для тех экзопланет, спектральные наблюдения которых не проводились или проводились с низкой точностью или небольшим количеством точек, использование фотометрических наблюдений транзита позволит либо повысить надёжность определения e и ω из кривых лучевых скоростей, либо дать предварительные ограничения на значения эксцентриситета и долготы периастра, в случае, когда спектральные наблюдения отсутствуют.

Также важным фактором является то, что эксцентриситет орбиты внесолнечной планеты может влиять на результаты определения других параметров системы. Например, как будет показано во втором разделе данной главы, даже относительно небольшое изменение расстояния от планеты до звезды в момент

транзита оказывается очень чувствительным для закона потемнения к краю материнской звезды. Таким образом, расхождение в оценках эксцентриситета орбиты может служить одним из возможных объяснений различия коэффициентов потемнения к краю, полученных эмпирически и предсказанных теоретически из модели звездных атмосфер, имевших место у ряда исследователей (см. например (Абубекеров и др., 2010)).

Оценки эксцентриситетов орбиты для короткопериодических экзопланетных систем представляют интерес для проверки теории округления орбиты в двойной системе в результате действия механизма диссипации кинетической энергии орбитального движения в приливах звёзд поздних спектральных классов (Zahn, 1977). Поэтому такие исследования представляют значительный интерес.

В настоящей работе эта возможность была исследована с использованием как модельных кривых затмения, так и высокоточной наблюдаемой кривой затмения.

2.1.2 Интерпретация синтетических модельных кривых

Для того, чтобы определить, как параметры эксцентриситета и аргумента перицентра будут влиять на другие параметры экзопланетной системы и на значение функционала χ^2 , вначале была проведена интерпретация кривых блеска, смоделированных искусственно по заранее заданным параметрами эксцентриситета, аргумента перицентра, радиуса звезды, радиуса планеты, наклона орбиты, периода и большой полуоси экзопланетной орбиты, а также коэффициентов закона потемнения к краю диска.

Были выбраны следующие параметры модельной двойной системы: радиус звезды $R = 0.1$ ед. бол. полуоси, радиус планеты $r = 0.01$ ед. бол. полуоси, период обращения $P_{orb} = 8 d$, наклонение орбиты $i = 88^\circ$. Радиус звезды и радиус планеты указаны в единицах большой полуоси орбиты планетной системы, равной $a = 0.07831$ а. е.

Значение эксцентриситета орбиты модельных двойных систем принято равным $e = 0.1$, $e = 0.3$ и $e = 0.5$. Долгота периастра орбиты ω принята равной 0° , 90° и 270° . Некоторые модельные кривые блеска приведены на рисунках 2.1-2.3. К изначальной построенной кривой была добавлена имитация

распределённого по Гауссу шума со стандартным отклонением индивидуальных значений блеска равным 10^{-4} .

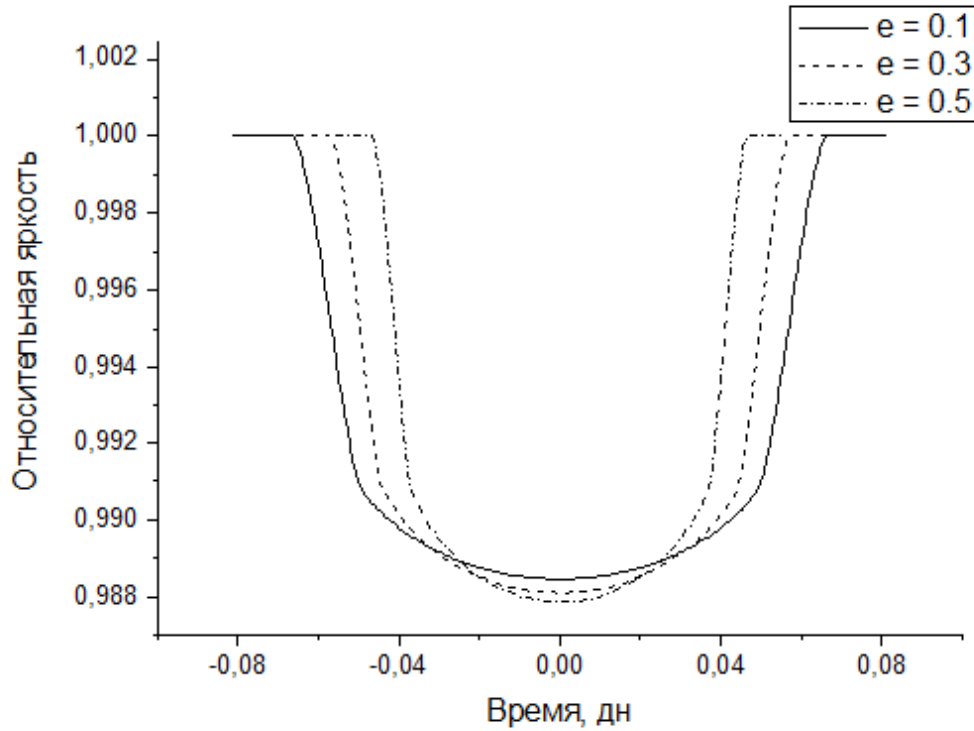


Рисунок 2.1 — Синтетические модельные кривые, полученные при значениях эксцентриситета $e = 0.1$, $e = 0.3$, $e = 0.5$ для долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

В качестве функции распределения яркости по диску звезды использовался линейный закон потемнения к краю с линейным коэффициентом $u_1 = 0.45$.

Интерпретация проводилась при различных фиксированных e и ω , минимизация выполнялась одновременно по следующим параметрам: линейному коэффициенту потемнения звезды к краю u_1 , радиусу планеты r и наклонению орбиты двойной i . Такие параметры, как радиус звезды, период обращения и большая полуось орбиты считались известными. Таким образом, в итоге это давало информацию о том, как получаемые значения для таких параметров, как радиус планеты, наклон орбиты и коэффициент потемнения к краю, зависят от разницы между реальным эксцентриситетом и эксцентриситетом, заданным при интерпретации.

Результаты данных интерпретаций представлены в таблицах 2.1 - 2.6. На рисунках 2.4 - 2.9 представлена зависимость невязки χ -квадрат от эксцентриситета. Видно, что задача при известных R чувствительна к эксцентриситету и

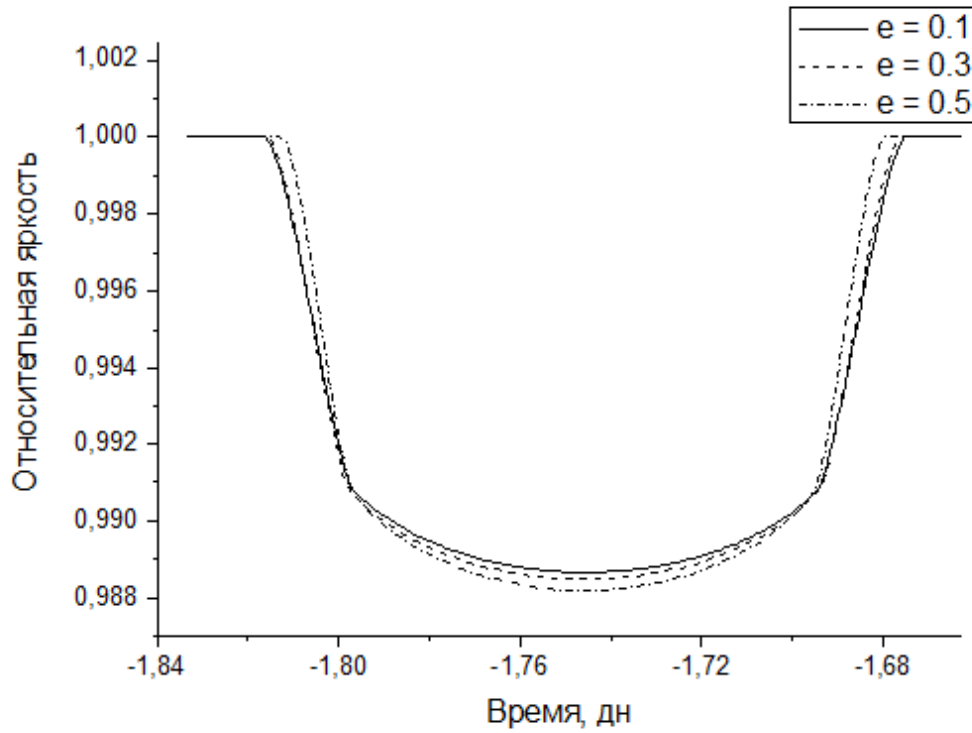


Рисунок 2.2 — Синтетические модельные кривые, полученные при разных значениях эксцентриситета $e = 0.1$, $e = 0.3$, $e = 0.5$ для долготы периастра $\omega = 180^\circ$.

при априорной информации о долготе периастра ω на основе транзитной кривой блеска можно уверенно определять значение эксцентриситета орбиты как для сильно, так и для слабо эксцентричных орбит (см. рисунки 2.4- 2.9).

Таблица 2.1 — Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значении эксцентриситета $e = 0.1$ и долготы периастра $\omega = 90^\circ$

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты (ед. бол. полуоси)	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0	0	0.014136	89.6224	4346.73
0.01	0	0.013016	89.6224	2089.12
0.02	0	0.011906	89.6224	755.052
0.03	0.05	0.010806	89.6224	152.271
0.04	0.53	0.009722	89.6173	3.15496
0.05	0.52	0.009767	89.0583	2.54162
0.06	0.51	0.009813	88.7411	2.01723
0.07	0.49	0.009869	88.4993	1.58994
0.08	0.48	0.009909	88.3056	1.26199
0.09	0.47	0.009949	88.1409	1.06206
0.1	0.45	0.009994	87.9969	0.987588
0.11	0.44	0.010039856	87.87	1.07118
0.12	0.42	0.010084499	87.7569	1.30427
0.13	0.4	0.01012385	87.6557	1.70566
0.14	0.38	0.0101568	87.5648	2.28178
0.15	0.37	0.010187017	87.4825	3.03932
0.16	0.35	0.010218857	87.4071	3.98245
0.17	0.32	0.010262134	87.3368	5.12027

Таблица 2.2 — Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значении эксцентриситета $e = 0.3$ и долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты (ед. бол. полуоси)	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0.2	0	0.011816	89.6224	891.176
0.21	0.1	0.010671	89.6224	176.201
0.22	0.58	0.009584	89.5898	5.95593
0.23	0.56	0.009647	89.1406	4.96467
0.24	0.55	0.009700	88.8697	4.03079
0.25	0.53	0.009751	88.6622	3.19319
0.26	0.52	0.0098	88.4907	937246
0.27	0.5	0.009858	88.3433	2355451
0.28	0.48	0.009908	88.2147	1.377
0.29	0.47	0.009949	88.1015	1.0745
0.3	0.45	0.009999	87.9986	0.973023
0.31	0.43	0.010044	87.906	1.08436
0.32	0.41	0.010083	87.822	1.42005
0.33	0.39	0.010124	87.7449	1.98847
0.34	0.37	0.010156	87.6746	2.80898
0.35	0.35	0.010189	87.6094	3.88107
0.36	0.32	0.01021	87.5494	5.20751
0.37	0.29	0.010260	87.4928	6.79081
0.38	0.26	0.010286	87.4414	8.65593
0.39	0.23	0.010312	87.3933	10.7968
0.4	0.19	0.01031	87.3505	13.1928

Таблица 2.3 — Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значении эксцентриситета $e = 0.5$ и долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты (ед. бол. полуоси)	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0.40	0.47	0.00979	90.0004	36.8962
0.41	0.63	0.009441	89.4116	10.23319
0.42	0.61	0.009512	89.0902	8.97929
0.43	0.60	0.009574	88.8661	7.51608
0.44	0.58	0.009639	88.6862	6.09876
0.45	0.56	0.009709	88.5338	4.77876
0.46	0.54	0.00977	88.4021	3.57789
0.47	0.52	0.009833	88.2851	2.54776
0.48	0.50	0.009888	88.1809	1.72923
0.49	0.48	0.00994	88.0865	1.19117
0.50	0.45	0.009995	88.0000	0.95934
0.51	0.42	0.010051	87.9203	1.12212
0.52	0.39	0.010097	87.8476	1.69819
0.53	0.36	0.010134	87.7807	2.70534
0.54	0.33	0.010167	87.7188	4.18288
0.55	0.29	0.010203	87.6608	6.13950
0.56	0.25	0.010239	87.6067	8.60545
0.57	0.21	0.010248	87.5576	12.77195
0.58	0.15	0.01026	87.5114	14.94330
0.59	0.10	0.010269	87.4681	18.78500
0.60	0.03	0.010254	87.4288	22. 023
0.61	0.00	0.010263	87.3905	27.8399
0.62	0.00	0.010278	87.3541	34.5112

Таблица 2.4 — Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значении эксцентриситета $e = 0.1$ и долготы периастра $\omega = 270^\circ$

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты (ед. бол. полуоси)	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0	0.27	0.010361	86.8085	7.60867
0.01	0.3	0.010329	86.8773	6.35237
0.02	0.32	0.010297	86.953	5.22887
0.03	0.34	0.010266	87.0366	4.23469
0.04	0.35	0.010241	87.128	674299
0.05	0.37	0.010199	87.2322	2.65104
0.06	0.39	0.010166	87.3472	2.06223
0.07	0.4	0.01013	87.477	1.60621
0.08	0.42	0.010086	87.6254	1.27943
0.09	0.43	0.010053	87.7935	1.08815
0.1	0.45	0.010002	87.9931	1.01329
0.11	0.46	0.00996	88.229	1.05901
0.12	0.48	0.009912	88.5269	1.22085
0.13	0.49	0.009867	88.9319	1.48079
0.14	0.5	0.00982	89.8049	1.84133
0.15	0.02	0.010902	90.0004	126.546

Таблица 2.5 — Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значении эксцентриситета $e = 0.3$ и долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты (ед. бол. полуоси)	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0.18	0.22	0.010432	85.9847	9.95654
0.19	0.25	0.010413	86.0545	8.52385
0.2	0.27	0.01038	86.1341	7.20911
0.21	0.29	0.010354	86.2245	6.01863
0.22	0.31	0.010326	86.3258	4.95312
0.23	0.33	0.010294	86.4408	4.01497
0.24	0.35	0.010256	86.5725	3.20178
0.25	0.37	0.010218	86.723	2.52319
0.26	0.38	0.010183	86.895	1.97195
0.27	0.4	0.010141	87.0965	1.53967
0.28	0.42	0.01009	87.3354	1.23518
0.29	0.43	0.010051	87.6225	1.0554
0.3	0.45	0.010002	87.9842	1.00543
0.31	0.46	0.009958	88.4719	1.07433
0.32	0.48	0.0099	89.3468	1.26791
0.33	0.06	0.010849	90.0004	81.9252
0.34	0	0.012086	90.0004	554.275
0.35	0	0.013347	90.0004	1700.45

Таблица 2.6 — Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значении эксцентриситета $e = 0.5$ и долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты (ед. бол. полуоси)	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0.4	0.25	0.010437	84.742	8.01467
0.41	0.28	0.010405	84.86	6.72334
0.42	0.3	0.010371	84.9986	5.54395
0.43	0.32	0.010333	85.1628	4.49039
0.44	0.34	0.010296	85.3565	3.56914
0.45	0.36	0.010252	85.5885	2.77881
0.46	0.38	0.010207	85.8677	2.13496
0.47	0.4	0.010157	86.2098	1.635
0.48	0.42	0.010105	86.6394	1.27752
0.49	0.44	0.010047	87.2066	1.06554
0.5	0.45	0.009997	88.0285	0.993937
0.51	0.39	0.01012	90.0004	3.15305
0.52	0	0.011589	90.0004	223.805
0.53	0	0.013097	90.0004	1100.11
0.54	0	0.014644	90.0004	2958.11

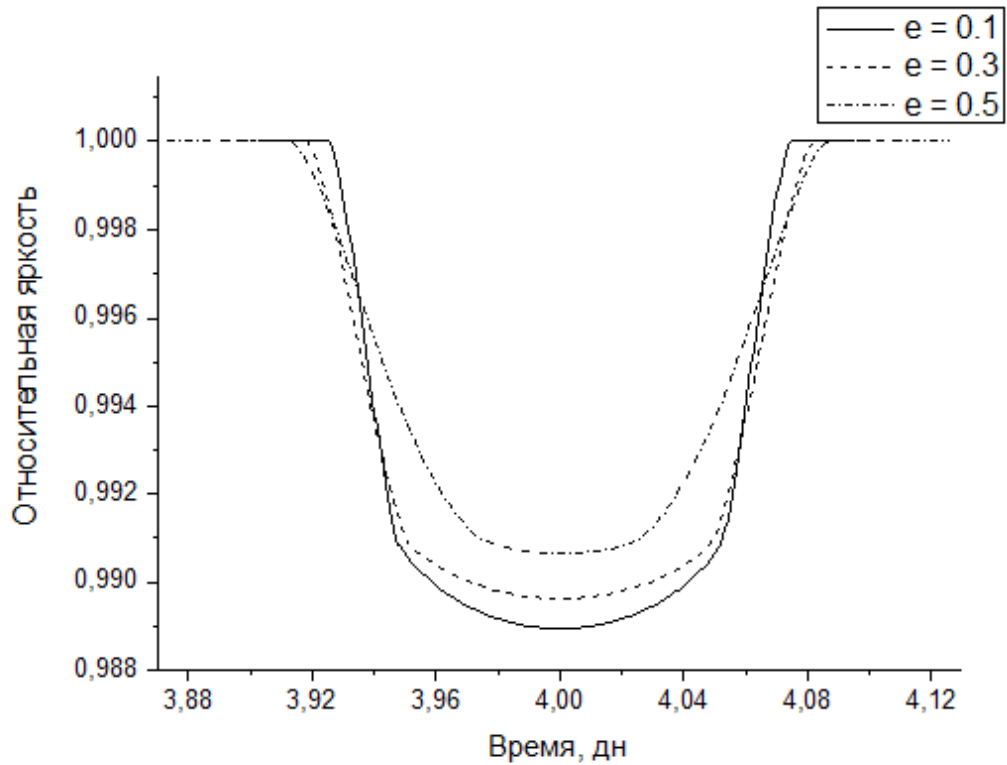


Рисунок 2.3 — Синтетические модельные кривые, полученные при разных значениях эксцентриситета $e = 0.1$, $e = 0.3$, $e = 0.5$ для долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

Также важным результатом стало то, что определяемое из интерпретации значение коэффициента потемнения к краю оказывается сильно зависимым от заданного значения эксцентриситета. За исключением некоторых экстремальных случаев, для транзитов вблизи апоастро орбиты ($\omega = 90^\circ$) использование заниженных значений эксцентриситета приводило к получению завышенных значений коэффициента потемнения к краю, и наоборот, использование завышенных значений эксцентриситета приводило к получению заниженных значений коэффициента потемнения к краю. При интерпретации транзита, проходящего вблизи периастро $\omega = 270^\circ$, наблюдалась обратная картина.

Определяемое значение наклона орбиты вело себя аналогичным образом.

Данный эффект может быть связан с изменением прицельного расстояния, которое при небольших изменениях наклона орбиты изменяется вместе с расстоянием между планетой и звездой в момент транзита. Другие исследова-

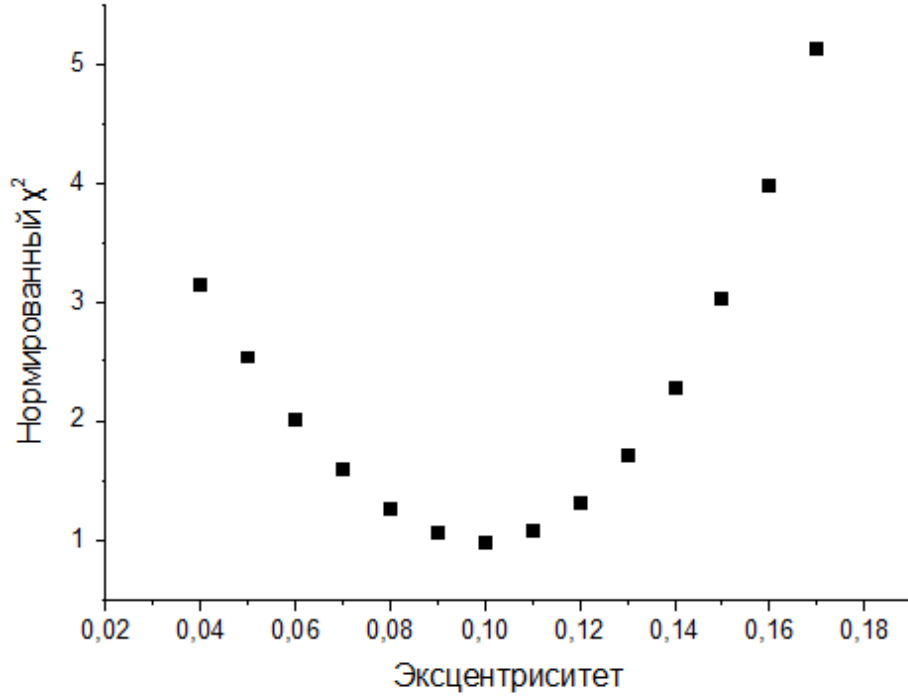


Рисунок 2.4 — Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$. Для модельной кривой с заданным эксцентриситетом $e = 0.1$.

ния, например, (Абубекеров и Гостев, 2025) также подтверждают зависимость характеристик системы от параметра $e \sin \omega$.

2.1.3 Интерпретация кривых блеска Kepler-7 b

Далее была проведена интерпретация кривой блеска транзита экзопланеты Kepler-7 b (Latham et al., 2010). Кривая блеска получена на космической обсерватории Kepler с 1 мая по 14 июня 2009 года. Kepler-7 b является объектом $\sim 13^m$ звездной величины.

Наблюдения проводились в оптическом диапазоне на длине волны 4000 — 8500 Å с итоговой экспозицией в 30 секунд. Транзитная кривая блеска включает в себя около 2100 индивидуальных значений блеска системы, большинство из которых приходится на внезатменную часть кривой блеска.

Точность индивидуальных значений транзитной кривой блеска системы Kepler-7 b в интенсивностях составила $\sigma = 1.0248 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Относительная ошибка (по отношению к глубине затмения) составляет $\sim 1\%$.

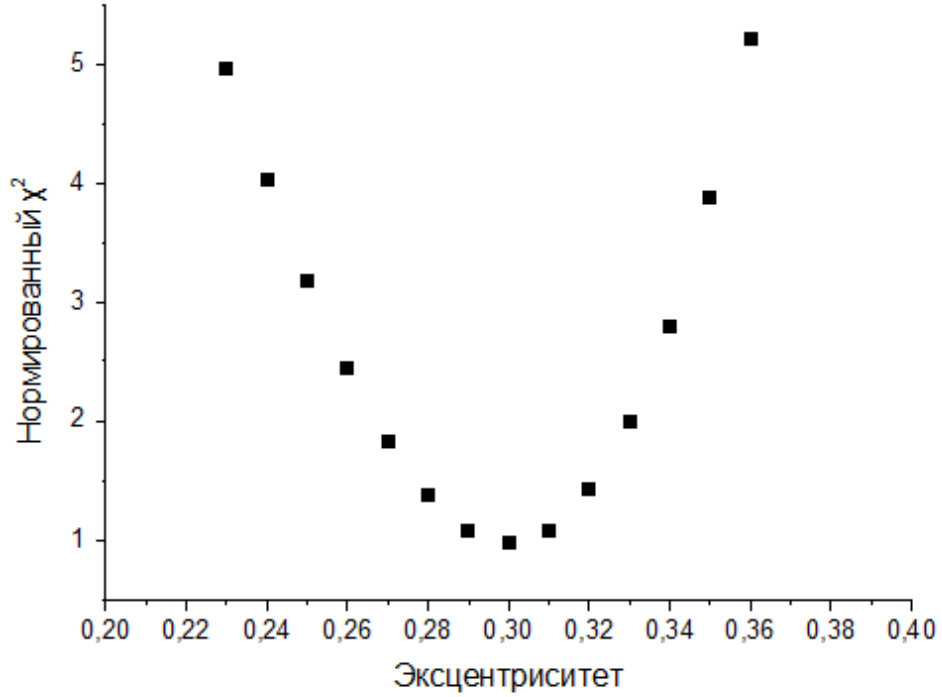


Рисунок 2.5 — Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$. Для модельной кривой с заданным эксцентриситетом $e = 0.3$.

При интерпретации данной кривой были приняты фиксированными следующие параметры: радиус звезды $R = 1.96R_\odot$ (Esteves et al., 2015), период обращения $P_{orb} = 4.885525$ суток, большая полуось $a = 0.06246$. . (Holczer et al., 2016; Latham et al., 2010), аргумент перицентра был принят равным $\omega = 90^\circ$ (транзит происходит в апоцентре).

Результаты интерпретации наблюдаемой транзитной кривой двойной Kepler-7 b представлены в таблице 2.7.

Как видно из таблицы, характер зависимости коэффициента потемнения к краю и наклона орбиты от заданного значения эксцентриситета сохраняется таким же, каким наблюдался при интерпретации модельных кривых блеска.

Наименьшее значение χ^2 было получено для значений эксцентриситета $e = 0.04$ — 0.044 при $\omega = 270^\circ$. Это указывает на то, что орбита данной экзопланеты может быть эллиптической. В то же время существующие оценки эксцентриситета данной системы, полученные как из кривых лучевых скоростей, так и

Таблица 2.7 — Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска Kepler-7 b при значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

Эксцентриситет	Линейный коэффициент	Радиус планеты, км	Наклонение орбиты, $^\circ$	χ^2
0.000	0.61	119603	84.4143	1.21353
0.002	0.61	119665	84.4009	1.19791
0.004	0.60	119758	84.3876	1.18258
0.006	0.60	119869	84.3742	1.16780
0.008	0.60	120003	84.3609	1.15580
0.010	0.59	120010	84.3492	1.14195
0.012	0.59	120188	84.3358	1.12911
0.014	0.58	120238	84.3242	1.11782
0.016	0.58	120308	84.3125	1.10634
0.018	0.58	120400	84.3008	1.09714
0.020	0.57	120504	84.2891	1.08574
0.022	0.57	120636	84.2774	1.07647
0.024	0.56	120788	84.2658	1.06984
0.026	0.56	120803	84.2557	1.06025
0.028	0.55	120836	84.2457	1.05554
0.030	0.55	121049	84.2340	1.04851
0.032	0.55	121121	84.2240	1.04333
0.034	0.54	121213	84.2140	1.04001
0.036	0.54	121161	84.2057	1.03582
0.038	0.53	121289	84.1957	1.03333
0.040	0.53	121436	84.1856	1.03157
0.042	0.53	121432	84.1773	1.03146
0.044	0.52	121500	84.1685	1.03101
0.046	0.52	121585	84.1596	1.03284
0.048	0.51	121688	84.1508	1.03563
0.050	0.51	121709	84.1429	1.03885
0.052	0.50	121754	84.1351	1.04449
0.054	0.50	121910	84.1262	1.04923
0.056	0.50	121982	84.1184	1.05702
0.058	0.49	121969	84.1115	1.06431
0.060	0.49	122074	84.1036	1.07351

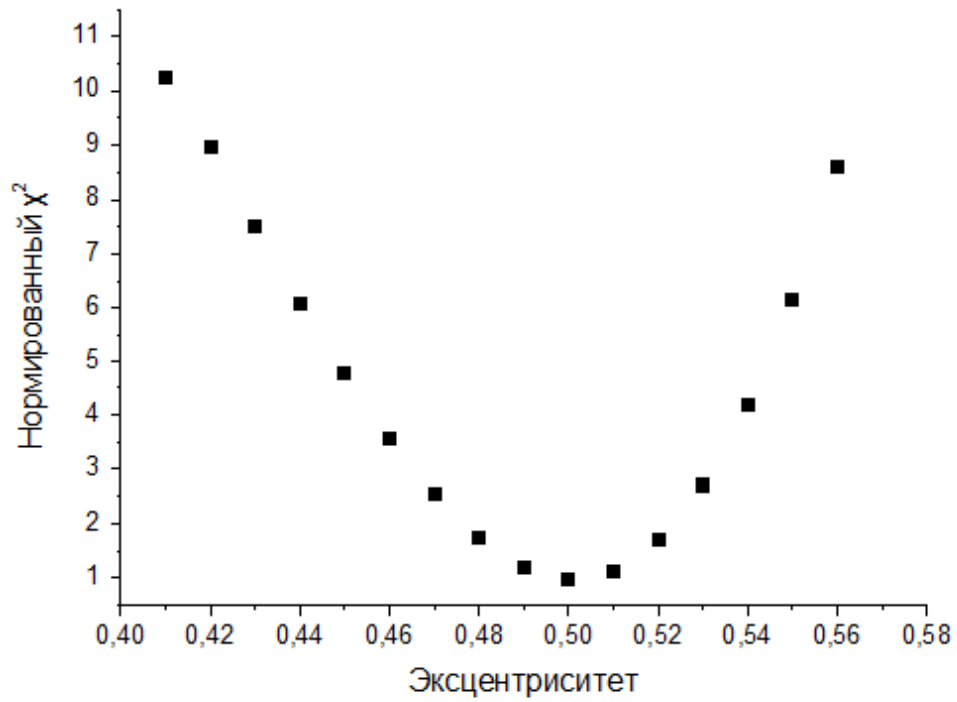


Рисунок 2.6 — Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$. Для модельной кривой с заданным эксцентриситетом $e = 0.5$.

фотометрических данных, разнятся от $e = 0$ до $e = 0.1$ (Bonomo et al., 2017; Demory et al., 2011; Latham et al., 2010).

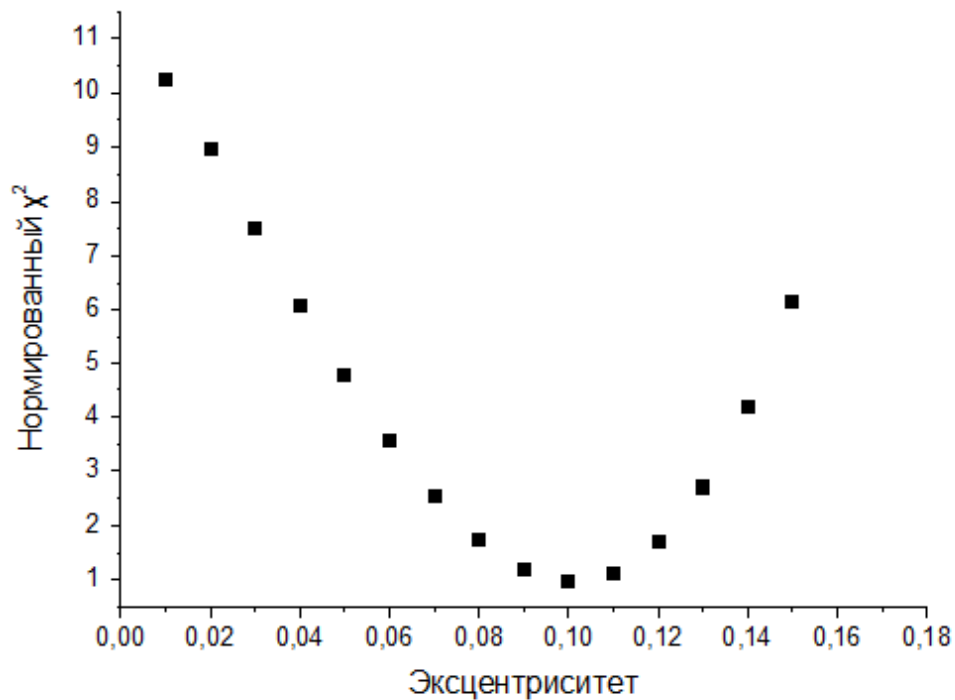


Рисунок 2.7 — Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 270^\circ$. Для модельной кривой с заданным эксцентриситетом $e = 0.1$.

2.2 Оценка влияния значения эксцентриситета на результаты определения коэффициентов потемнения к краю для системы HD 209458

Как было описано выше, одной из задач, решавшихся в рамках оценки влияния эксцентриситета на характеристики системы, была попытка объяснить разницу между коэффициентами потемнения к краю, получаемыми из теоретических расчётов, и коэффициентами, определяемыми на основе интерпретации транзитных кривых блеска.

Так как эффект потемнения к краю вызван поглощением в атмосфере звезды, он может быть предсказан на основе существующих моделей звёздных атмосфер. Известные данные по металличности, температуре и поверхностной гравитации позволяют восстановить распределение плотности и температуры во внешних слоях звезды, что позволяет оценить долю поглощаемого света для разных значений угла между направлением луча зрения и нормалью к поверх-

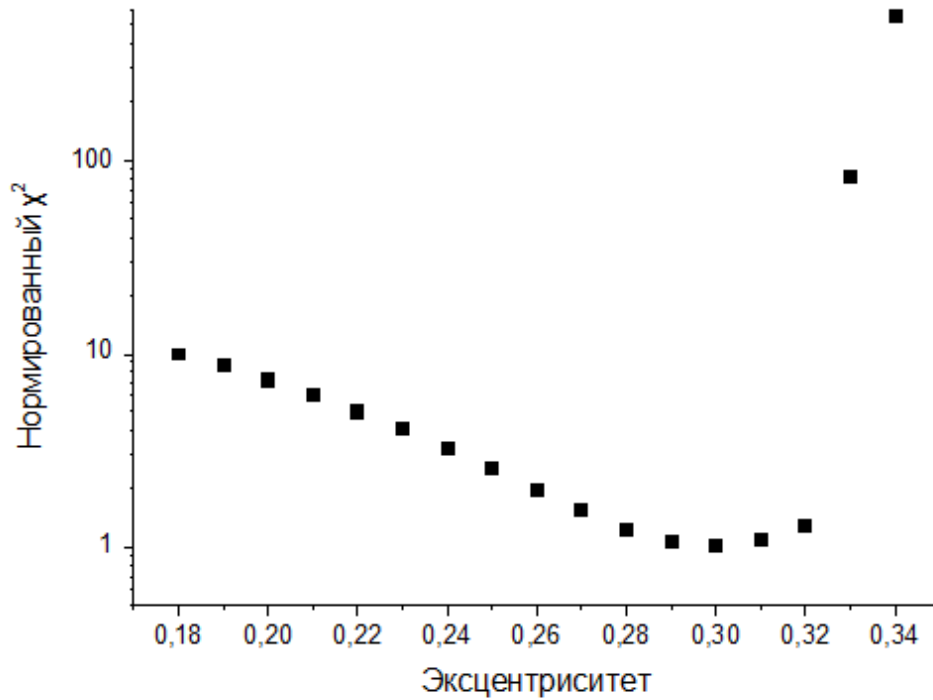


Рисунок 2.8 — Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 270^\circ$. Для модельной кривой с заданным эксцентриситетом $e = 0.3$.

ности, и оценить таким образом характер распределения яркости по диску звезды (Claret, 2009; Eastman et al., 2013).

Проблема заключается в том, что в ряде случаев полученные таким образом коэффициенты могут не совпадать с теми, для которых при интерпретации кривых блеска достигается минимум функционала χ^2 . Одним из примеров систем, для которых было выявлено подобное расхождение, является система HD 209458 (Абубекеров и др., 2010; Southworth, 2008). Учитывая, что интерпретации модельных кривых выявили существенную зависимость определяемых параметров потемнения к краю от заданного эксцентриситета, мы выдвинули гипотезу, что разница между теоретическими и эмпирическими коэффициентами потемнения к краю в случае системы HD 209458 может быть объяснена тем, что в предыдущих работах обработка данных транзита проводилась с использованием модели круговой орбиты.

Подобные модели были приняты на основе данных спектральных наблюдений, однако из-за того, что центр масс системы Звезда-экзопланета, как пра-

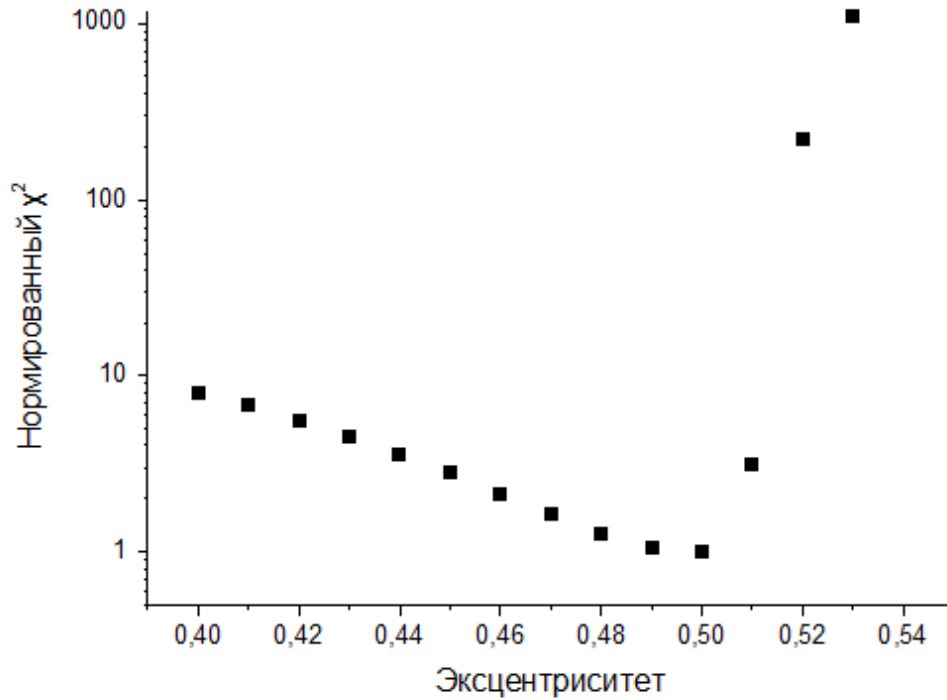


Рисунок 2.9 — Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 270^\circ$. Для модельной кривой с заданным эксцентриситетом $e = 0.5$.

вило, находится крайне близко к центру звезды, амплитуда её лучевых скоростей оказывается достаточно небольшой. Таким образом, даже при большой точности спектральных наблюдений, позволяющей определить величины лучевых скоростей с точностью до порядка нескольких метров в секунду, относительная погрешность кривой лучевых скоростей звезды с экзопланетой может оказаться весьма велика (Mushailov and Terlickaya, 2012). Это, в свою очередь, может привести к тому, что в пределах этой погрешности даже в случае орбиты, близкой к круговой, допустимы значения эксцентриситета орбиты вплоть до нескольких сотых.

Так, в существующих работах, посвящённых исследованию лучевых скоростей системы HD 209458 (Bonomo et al., 2017; Rosenthal et al., 2021), величина эксцентриситета была определена равной $0.01 - 0.02$ при σ , составляющем 0.01 (в случае Генри (Henry et al., 1999) даже 0.04), что даёт нам возможность предположить, что на основании правила 3σ допустимо использовать диапазон $e = 0 - 0.05$.

Для расчётов была выбрана серия транзитов, проведённая при помощи HST в 2007 году (Knutson et al., 2007). Данные наблюдений представляют собой 20 кривых блеска для четырёх транзитов, наблюдавшихся в десяти фильтрах с диапазоном от 3201 Å до 9708 Å. Кривые блеска для каждой длины волны были объединены с целью увеличения точности и устранения имевшихся пробелов. Также объединение наблюдательных данных разных транзитов позволяло частично нивелировать влияние возможной переменности коэффициентов потемнения к краю вследствие наличия пятен и физической активности на поверхности звезды (Абубекеров и Гостев, 2020). Радиус планеты и наклонение орбиты задавались как свободные параметры, и, таким образом, задача интерпретации решалась так же и для них.

Для уменьшения числа искомых параметров использовался линейный закон потемнения к краю звезды. При работе программы линейный коэффициент потемнения менялся с шагом 0.02, и, по итогу, наиболее оптимальным признавался тот, для которого сумма квадратов отклонений наблюдаемой кривой блеска от теоретической (невязка) оказывалась минимальной. Радиус звезды брался в диапазоне от 1.16 до 1.22 $R_{\odot}$, что соответствует существующим оценкам для радиуса данной звезды (Rosenthal et al., 2021; Southworth, 2010).

Аргумент перицентра принимался равным 270° (транзит в перицентре), таким образом, большее значение эксцентриситета означало меньшее расстояние от планеты до звезды в момент транзита и, как следствие, меньшее значение прицельного параметра. Для проверки этой гипотезы нами была проведена интерпретация кривой блеска, полученной на длине волны 9708 Å с разными значениями аргумента перицентра от 180 до 360 градусов. Результаты распределения значений χ^2 и линейных коэффициентов потемнения к краю для разных значений аргумента перицентра и эксцентриситета для радиуса звезды $1.2R_{\odot}$ представлены на рисунке 2.10 и рисунке 2.11. Так же в таблице 2.8 представлены наиболее оптимальные значения для каждого значения аргумента перицентра. Видно, что имеется достаточно заметное вырождение функционала χ^2 по параметрам эксцентриситета и аргумента перицентра, а также можно заметить, что значения коэффициента потемнения к краю растут при любом значении аргумента перицентра от 180 до 360 градусов. Также видно, что наиболее оптимальные результаты для большей части значений аргумента перицентра из

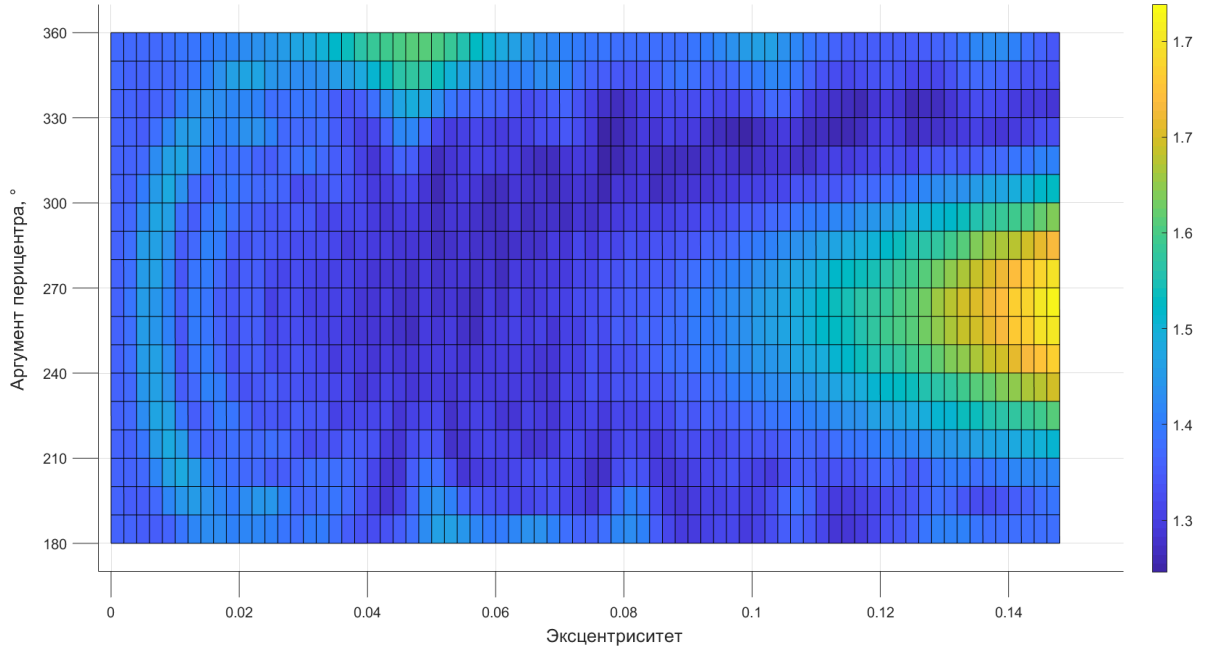


Рисунок 2.10 — Распределение значений нормированного на число степеней свободы функционала χ^2 в зависимости от эксцентриситета и аргумента перигелия для интерпретации кривой блеска HD 209458 b, полученной на длине волны 9708 Å. Более тёмные области соответствуют меньшим значениям функционала χ^2 , более яркие – большим.

заданного диапазона получены для значений эксцентриситета, соответствующих расстоянию от звезды до планеты в момент транзита 0.94 – 0.95 единиц большой полуоси.

В таблицах 2.9, 2.10, 2.11 и 2.12 представлены ключевые результаты для радиусов звезды $1.18 R_{\odot}$, $1.19 R_{\odot}$, $1.2 R_{\odot}$, $1.21 R_{\odot}$. Эксцентриситет в данном случае задавался как фиксированный параметр. Для него использовались три значения 0, 0.02 и 0.05.

На рисунках 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 показано сравнение полученных для различных радиусов звезды коэффициентов потемнения к краю с коэффициентами, предсказанными Кнутсоном (Knutson et al., 2007) на основании теоретических расчётов. Видно, что, как и в случае с модельными кривыми и наблюдательными данными Kepler-7 b, увеличение эксцентриситета приводит к увеличению значения коэффициента потемнения к краю. Таким образом, систематическое расхождение между эмпирическими и теоретическими значениями эксцентриситета, наблюдающееся при интерпретации в рамках модели круго-

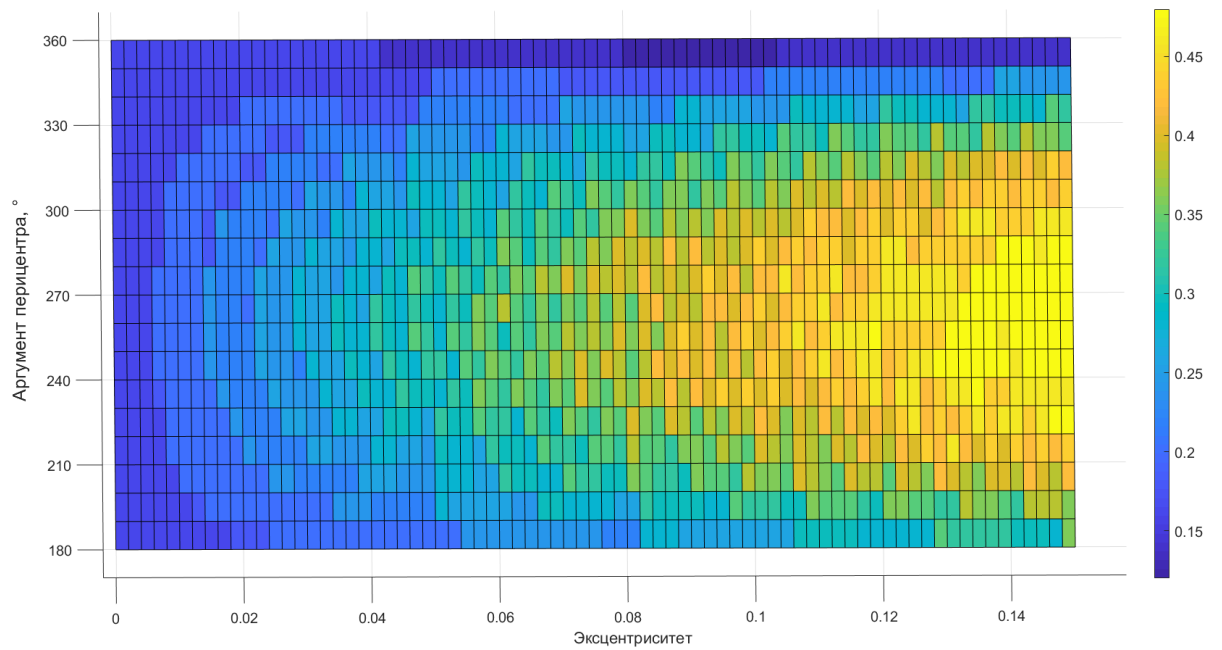


Рисунок 2.11 — Распределение значений линейного коэффициента потемнения к краю в зависимости от эксцентриситета и аргумента перицентра для интерпретации кривой блеска HD 209458 b, полученной на длине волны 9708 Å. Более тёмные области соответствуют меньшим значениям линейного коэффициента потемнения к краю, более яркие – большим.

Таблица 2.8 — Результаты интерпретации кривой блеска HD 209458 b, полученной на длине волны 9708 Å при разных заданных значениях аргумента перицентра.

Аргумент перицентра, °	Эксцентриситет	Фокальный радиус, ед. бол. полуоси	Линейный коэффициент	χ^2
180	0.232	0.94618	0.34	1.30011
190	0.162	0.94711	0.3	1.26711
200	0.124	0.94456	0.32	1.22443
210	0.098	0.94413	0.32	1.20927
220	0.076	0.94792	0.32	1.21609
230	0.076	0.93953	0.36	1.22538
240	0.064	0.9436	0.32	1.23185
250	0.06	0.94322	0.38	1.23035
260	0.06	0.94081	0.34	1.23625
270	0.056	0.944	0.38	1.23808
280	0.056	0.94476	0.38	1.23718
290	0.056	0.94703	0.34	1.25011
300	0.066	0.94181	0.34	1.25252
310	0.068	0.94609	0.32	1.25016
320	0.076	0.94792	0.36	1.24911
330	0.076	0.95783	0.32	1.24047
340	0.086	0.96424	0.32	1.26018
350	0.114	0.96784	0.32	1.25135
360	0.176	0.96902	0.32	1.26364

Таблица 2.9 — Общая таблица для радиуса звезды $R = 1.18 R_{\odot}$

Длина волны	$e = 0$	$e = 0.02$	$e = 0.05$
$\lambda = 3201$	$x = 0.82$ $\chi^2 = 1.10738$	$x = 0.86$ $\chi^2 = 1.11177$	$x = 0.92$ $\chi^2 = 1.14157$
$\lambda = 3750$	$x = 0.72$ $\chi^2 = 1.19482$	$x = 0.76$ $\chi^2 = 1.18602$	$x = 0.82$ $\chi^2 = 1.28658$
$\lambda = 4300$	$x = 0.66$ $\chi^2 = 1.48337$	$x = 0.7$ $\chi^2 = 1.49505$	$x = 0.76$ $\chi^2 = 1.79425$
$\lambda = 4849$	$x = 0.64$ $\chi^2 = 1.24624$	$x = 0.68$ $\chi^2 = 1.47195$	$x = 0.74$ $\chi^2 = 2.20671$
$\lambda = 5398$	$x = 0.58$ $\chi^2 = 1.12802$	$x = 0.62$ $\chi^2 = 1.34888$	$x = 0.68$ $\chi^2 = 2.05469$
$\lambda = 5802$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.22475$	$x = 0.48$ $\chi^2 = 1.176$	$x = 0.54$ $\chi^2 = 1.63252$
$\lambda = 6779$	$x = 0.4$ $\chi^2 = 1.3213$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.1922$	$x = 0.5$ $\chi^2 = 1.68933$
$\lambda = 7755$	$x = 0.38$ $\chi^2 = 1.29418$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.34106$	$x = 0.48$ $\chi^2 = 1.85679$
$\lambda = 8732$	$x = 0.36$ $\chi^2 = 1.27232$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.4258$	$x = 0.48$ $\chi^2 = 1.88535$
$\lambda = 9708$	$x = 0.34$ $\chi^2 = 1.3684$	$x = 0.4$ $\chi^2 = 1.45882$	$x = 0.46$ $\chi^2 = 1.70829$
Среднее значение χ^2 по всем длинам волн	$\overline{\chi^2} = 1.23076$	$\overline{\chi^2} = 1.32076$	$\overline{\chi^2} = 1.72561$

Таблица 2.10 — Общая таблица для радиуса звезды $R = 1.19 R_{\odot}$

Длина волны	$e = 0$	$e = 0.02$	$e = 0.05$
$\lambda = 3201$	$x = 0.8$ $\chi^2 = 1.11227$	$x = 0.84$ $\chi^2 = 1.10726$	$x = 0.9$ $\chi^2 = 1.13094$
$\lambda = 3750$	$x = 0.7$ $\chi^2 = 1.22202$	$x = 0.74$ $\chi^2 = 1.18269$	$x = 0.8$ $\chi^2 = 1.24947$
$\lambda = 4300$	$x = 0.64$ $\chi^2 = 1.54065$	$x = 0.68$ $\chi^2 = 1.4715$	$x = 0.74$ $\chi^2 = 1.68532$
$\lambda = 4849$	$x = 0.62$ $\chi^2 = 1.23134$	$x = 0.66$ $\chi^2 = 1.33492$	$x = 0.72$ $\chi^2 = 1.95986$
$\lambda = 5398$	$x = 0.56$ $\chi^2 = 1.10998$	$x = 0.6$ $\chi^2 = 1.2227$	$x = 0.66$ $\chi^2 = 1.81725$
$\lambda = 5802$	$x = 0.48$ $\chi^2 = 1.33923$	$x = 0.54$ $\chi^2 = 1.15793$	$x = 0.5$ $\chi^2 = 1.4513$
$\lambda = 6779$	$x = 0.38$ $\chi^2 = 1.50353$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.20065$	$x = 0.5$ $\chi^2 = 1.468353$
$\lambda = 7755$	$x = 0.36$ $\chi^2 = 1.36086$	$x = 0.4$ $\chi^2 = 1.29063$	$x = 0.46$ $\chi^2 = 1.66563$
$\lambda = 8732$	$x = 0.34$ $\chi^2 = 1.249521$	$x = 0.4$ $\chi^2 = 1.34158$	$x = 0.46$ $\chi^2 = 1.73091$
$\lambda = 9708$	$x = 0.32$ $\chi^2 = 1.35174$	$x = 0.38$ $\chi^2 = 1.41107$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.62537$
Среднее значение χ^2 по всем длинам волн	$\bar{\chi}^2 = 1.30211$	$\bar{\chi}^2 = 1.27209$	$\bar{\chi}^2 = 1.57844$

вой орбиты оказывается существенно нивелировано при использовании модели эллиптической орбиты с эксцентриситетом $e = 0.05$.

Также для обеих кривых блеска нами было проведено полное исследование того, как меняется сумма квадратов невязок при изменении эксцентриситета и линейного коэффициента потемнения к краю. Данная зависимость представлена на рисунках 2.16 и 2.17.

2.3 Выводы

В данном исследовании мы показали, что на основе интерпретации фотометрических кривых блеска можно определить расстояние от планеты до звезды в момент транзита, которое в свою очередь определяется сочетанием таких параметров, как эксцентриситет и аргумент перицентра экзопланетной орбиты. Дальнейшее уточнение этих параметров, а также определение конкретной ориентации орбиты планеты относительно картинной плоскости, тем не менее,

Таблица 2.11 — Общая таблица для радиуса звезды $R = 1.2 R_{\odot}$

Длина волны	$e = 0$	$e = 0.02$	$e = 0.05$
$\lambda = 3201$	$x = 0.78$ $\chi^2 = 1.12153$	$x = 0.82$ $\chi^2 = 1.10648$	$x = 0.88$ $\chi^2 = 1.12262$
$\lambda = 3750$	$x = 0.68$ $\chi^2 = 1.26182$	$x = 0.72$ $\chi^2 = 1.19236$	$x = 0.78$ $\chi^2 = 1.21967$
$\lambda = 4300$	$x = 0.62$ $\chi^2 = 1.63559$	$x = 0.66$ $\chi^2 = 1.4822$	$x = 0.72$ $\chi^2 = 1.60198$
$\lambda = 4849$	$x = 0.6$ $\chi^2 = 1.27296$	$x = 0.64$ $\chi^2 = 1.24969$	$x = 0.7$ $\chi^2 = 1.74025$
$\lambda = 5398$	$x = 0.54$ $\chi^2 = 1.14727$	$x = 0.58$ $\chi^2 = 1.14172$	$x = 0.64$ $\chi^2 = 1.6136$
$\lambda = 5802$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.49722$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.18888$	$x = 0.5$ $\chi^2 = 1.3151$
$\lambda = 6779$	$x = 0.34$ $\chi^2 = 1.75049$	$x = 0.4$ $\chi^2 = 1.27662$	$x = 0.48$ $\chi^2 = 1.20336$
$\lambda = 7755$	$x = 0.32$ $\chi^2 = 1.45982$	$x = 0.38$ $\chi^2 = 1.28285$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.38981$
$\lambda = 8732$	$x = 0.32$ $\chi^2 = 1.25785$	$x = 0.38$ $\chi^2 = 1.2857$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.32587$
$\lambda = 9708$	$x = 0.28$ $\chi^2 = 1.32458$	$x = 0.36$ $\chi^2 = 1.24721$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.33565$
Среднее значение χ^2 по всем длинам волн	$\overline{\chi^2} = 1.37291$	$\overline{\chi^2} = 1.2584$	$\overline{\chi^2} = 1.38679$

представляет собой задачу, для решения которой необходимо прибегать к спектральным наблюдениям и интерпретации кривых лучевых скоростей.

Так же нами была выдвинута гипотеза о том, что изменение данного расстояния, принятого в используемой модели, оказывает существенное влияние на получаемые из эмпирических данных коэффициенты потемнения к краю. Так уменьшение фокального радиуса на 5% достаточно, чтобы увеличить значения линейных коэффициентов потемнения к краю на 0.2—0.25 в зависимости от длины волны для случая экзопланеты HD 209458 b. Это показывает, что данное предположение может являться одним из возможных объяснений расхождений между теоретическими и эмпирическим коэффициентами потемнения к краю, полученными для данной системы, наряду с запятнёностью (Абубекеров и Гостев, 2022) и изменениями характера потемнения к краю вследствие активности в атмосфере звезды (Абубекеров и Гостев, 2020).

Таблица 2.12 — Общая таблица для радиуса звезды $R = 1.21 R_{\odot}$

Длина волны	$e = 0$	$e = 0.02$	$e = 0.05$
$\lambda = 3201$	$x = 0.76$ $\chi^2 = 1.13468$	$x = 0.8$ $\chi^2 = 1.11035$	$x = 0.86$ $\chi^2 = 1.11567$
$\lambda = 3750$	$x = 0.66$ $\chi^2 = 1.31439$	$x = 0.72$ $\chi^2 = 1.21513$	$x = 0.78$ $\chi^2 = 1.19701$
$\lambda = 4300$	$x = 0.6$ $\chi^2 = 1.7752$	$x = 0.64$ $\chi^2 = 1.52602$	$x = 0.72$ $\chi^2 = 1.53209$
$\lambda = 4849$	$x = 0.56$ $\chi^2 = 1.3787$	$x = 0.62$ $\chi^2 = 1.21917$	$x = 0.68$ $\chi^2 = 1.55532$
$\lambda = 5398$	$x = 0.52$ $\chi^2 = 1.23122$	$x = 0.56$ $\chi^2 = 1.105$	$x = 0.62$ $\chi^2 = 1.43797$
$\lambda = 5802$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.72297$	$x = 0.5$ $\chi^2 = 1.28018$	$x = 0.56$ $\chi^2 = 1.2224$
$\lambda = 6779$	$x = 0.32$ $\chi^2 = 2.07053$	$x = 0.38$ $\chi^2 = 1.42411$	$x = 0.46$ $\chi^2 = 1.21026$
$\lambda = 7755$	$x = 0.3$ $\chi^2 = 1.60923$	$x = 0.36$ $\chi^2 = 1.32778$	$x = 0.44$ $\chi^2 = 1.39207$
$\lambda = 8732$	$x = 0.3$ $\chi^2 = 1.29202$	$x = 0.36$ $\chi^2 = 1.25711$	$x = 0.42$ $\chi^2 = 1.47936$
$\lambda = 9708$	$x = 0.28$ $\chi^2 = 1.35713$	$x = 0.34$ $\chi^2 = 1.35712$	$x = 0.4$ $\chi^2 = 1.48827$
Среднее значение χ^2 по всем длинам волн	$\overline{\chi^2} = 1.48861$	$\overline{\chi^2} = 1.28219$	$\overline{\chi^2} = 1.36304$

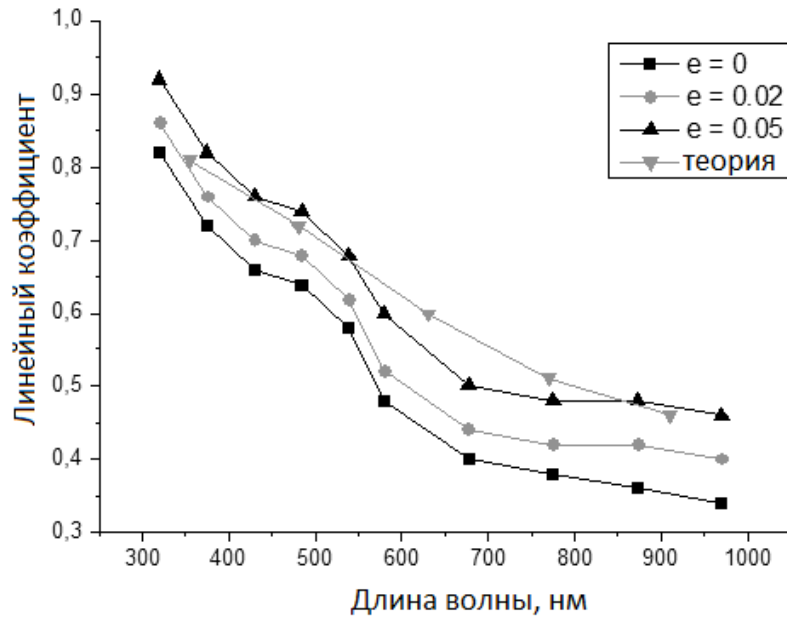


Рисунок 2.12 — Значения линейного коэффициента потемнения к краю, соответствующие наименьшей сумме квадратов невязки для различных длин волн и значений эксцентриситета, и их сравнение с теоретическими предсказаниями Кларэ (Claret, 2004) для радиуса звезды равного $1.18 R_{\odot}$.

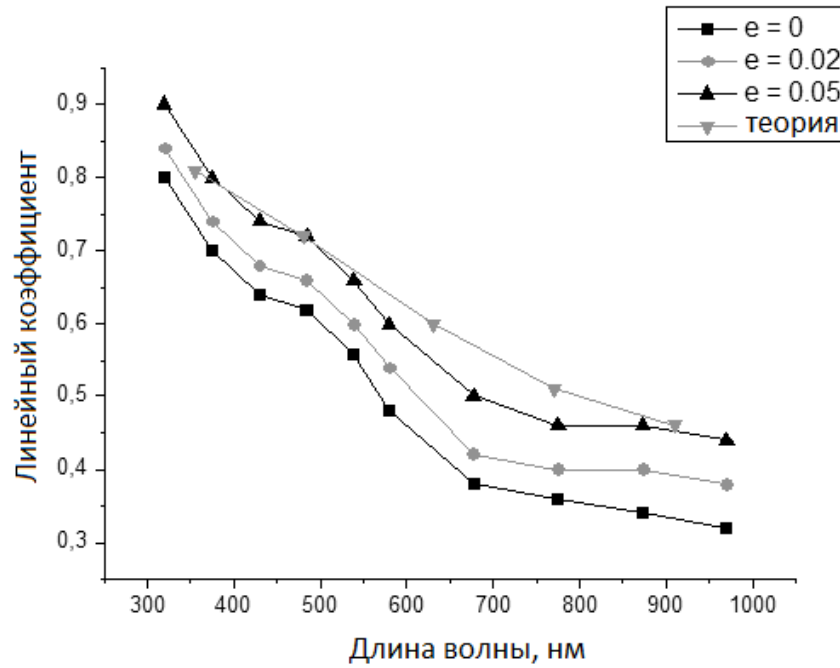


Рисунок 2.13 — Значения линейного коэффициента потемнения к краю, соответствующие наименьшей сумме квадратов невязки для различных длин волн и значений эксцентриситета, и их сравнение с теоретическими предсказаниями Кларэ (Claret, 2004) для радиуса звезды равного $1.19 R_{\odot}$.

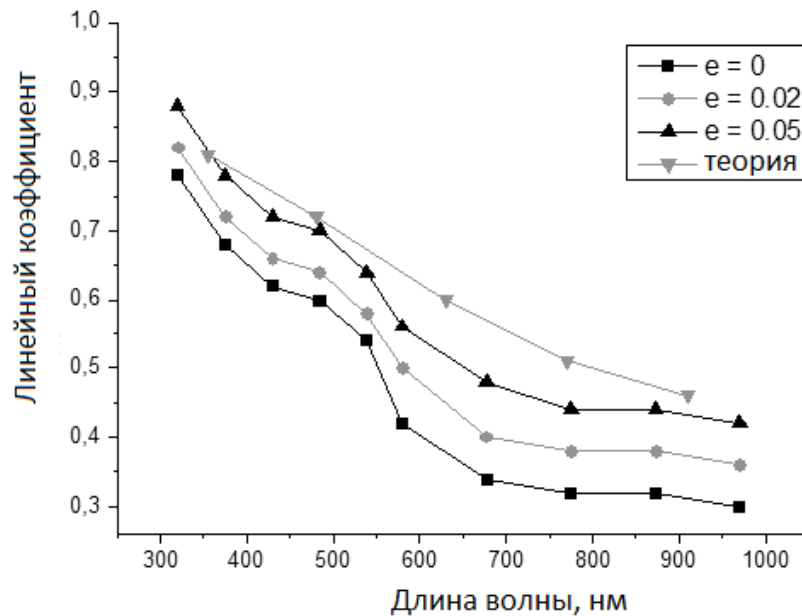


Рисунок 2.14 — Значения линейного коэффициента потемнения к краю, соответствующие наименьшей сумме квадратов невязки для различных длин волн и значений эксцентриситета, и их сравнение с теоретическими предсказаниями Кларэ (Claret, 2004) для радиуса звезды равного $1.2 R_{\odot}$.

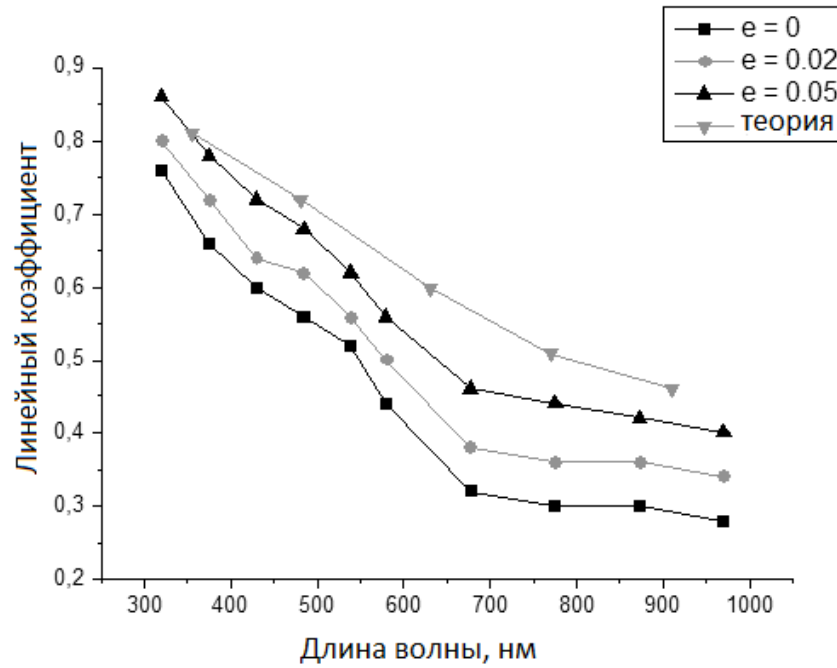


Рисунок 2.15 — Значения линейного коэффициента потемнения к краю, соответствующие наименьшей сумме квадратов невязки для различных длин волн и значений эксцентриситета, и их сравнение с теоретическими предсказаниями Кларэ (Claret, 2004) для радиуса звезды равного $1.21 R_{\odot}$.

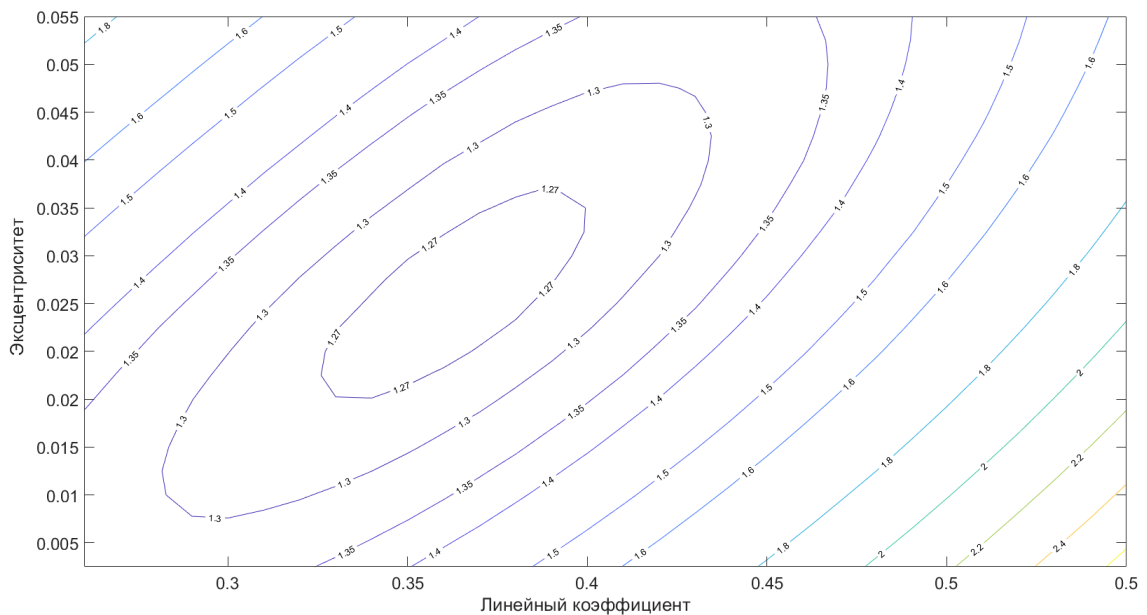


Рисунок 2.16 — Распределение приведённого χ^2 для кривой блеска транзита, полученной на длине волны 970 нм, в зависимости от эксцентриситета и линейного коэффициента потемнения к краю. Радиус звезды был зафиксирован равным $1.2 R_{\odot}$.

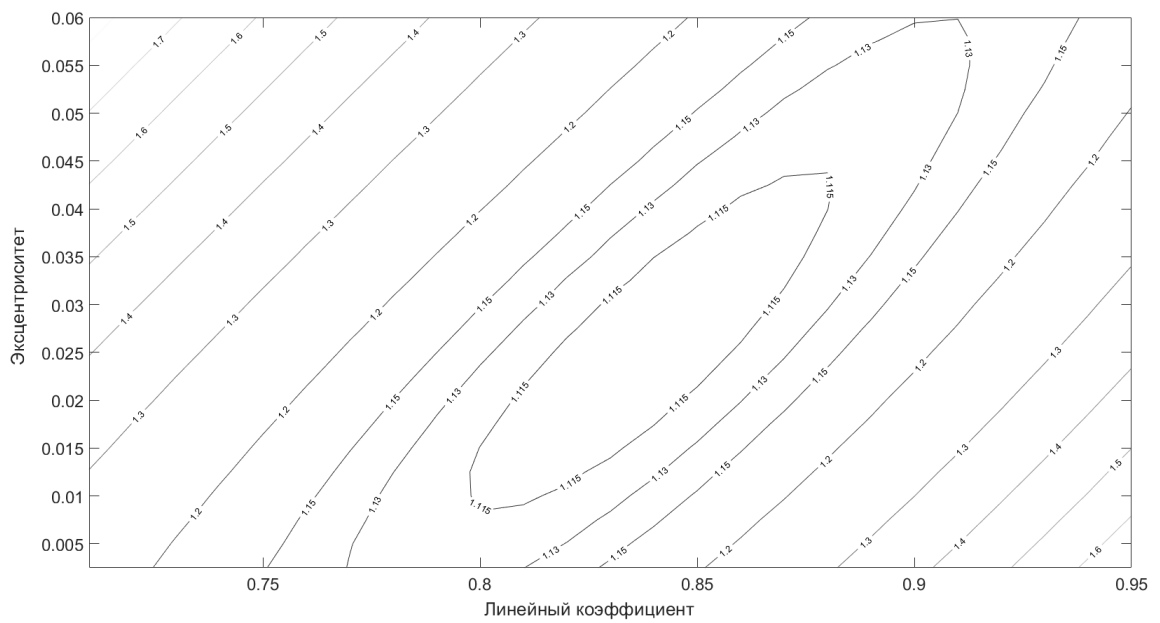


Рисунок 2.17 — Распределение приведённого χ^2 для кривой блеска транзита, полученной на длине волны 320 нм, в зависимости от эксцентриситета и линейного коэффициента потемнения к краю. Радиус звезды был зафиксирован равным $1.2 R_{\odot}$.

Глава 3. Определение влияния атмосферы на радиус экзопланеты на основе интерпретации спутниковых кривых блеска HD 189733 b и HD 209458 b

Глава основана на работах 4 и 6 из списка публикаций по теме диссертации.

3.1 Интерпретация смоделированных кривых блеска

Для оценки точности, с которой радиус планеты может быть определён на основе интерпретации кривых блеска, нами было проведено исследование синтетических кривых с заранее известными параметрами. Основной задачей было определить, каково будет среднеквадратичное отклонение по радиусу планеты в случае интерпретации по одному параметру, а также зависимость погрешности от количества точек и индивидуальной точности кривой блеска.

Радиус звезды был задан равным радиусу Солнца, радиус планеты – 85680 км ($1.2 R_{Jup}$). Период обращения был принят равным 2.8 сут, большая полуось – 0.0388964 а. е., наклонение орбиты – 87.5° . Эксцентриситет устанавливался равным нулю. Таким образом, система по своим параметрам была похожа на такие экзопланетные системы, как HD 189733 b и HAT-P-13 b. Для описания потемнения к краю был выбран квадратичный закон. Коэффициенты были выбраны равными таковым для звезды HD 189733 в фильтре В ($\lambda = 4420 \text{ \AA}$; $u_1 = 0.77618$; $u_2 = 0.04921$) и Н ($\lambda = 16500 \text{ \AA}$; $u_1 = 0.07159127$; $u_2 = 0.37713557$).

Кривые блеска для каждого фильтра были получены таким образом, чтобы временной интервал между точками составлял 60, 30 и 15 секунд, что соответственно дало 203, 407 и 815 точек для самих кривых. Исходя из предположения о том, что ошибки распределяются по нормальному закону, был добавлен шум для каждой кривой со среднеквадратическим отклонением равным $\sigma_N = 0.002$. Также для кривой, состоящей из 407 точек, были добавлены шумы со среднеквадратичным отклонением равным 0.0001, 0.001, 0.002 и 0.005.

Далее на получившиеся кривые блеска были наложены теоретические кривые, для которых совпадали все параметры кроме радиуса планеты, чтобы понять, как меняется сумма квадратов разностей, рассчитанная по формуле для нормированного χ^2 в зависимости от изменения радиуса планеты.

$$\chi^2(r) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(I_i^o - I_i^c(r))^2}{\sigma^2}, \quad (3.1)$$

где r – радиус планеты, N – количество точек в модельной кривой блеска, вычисленной для $r = 85680$ км и среднеквадратичной ошибки шума σ_N , I_i^o – блеск в рамках модельной кривой, I_i^c – блеск в рамках теоретической кривой, вычисленный с текущим значением радиуса планеты r .

Данный функционал с точностью до константы равен:

$$\chi^2(r) = \frac{-2}{N-1} \sum_{i=1}^N \ln P(I_i^o - I_i^c(r)) = \frac{-2}{N-1} \ln L(r), \quad (3.2)$$

где $P(I_i^o - I_i^c(r))$ – вероятность обнаружить соответствующее отклонение при фиксированных погрешностях, $L(r)$ – функция правдоподобия, максимум которой будет соответствовать наиболее оптимальному решению. Так как согласно центральной предельной теореме функция должна стремиться к нормальному распределению, функционал χ^2 должен стремиться к параболе:

$$\chi^2(r) = \frac{1}{N-1} \frac{(r - r_0)^2}{\sigma_r^2} + const, \quad (3.3)$$

где r_0 – значение радиуса, соответствующее наименьшему значению χ^2 , σ_r – среднеквадратическое отклонение радиуса планеты.

Таким образом, смещение оцениваемого радиуса на σ_r соответствует увеличению ненормированного $\chi^2(r)$ на 1. Данное соотношение использовалось нами для определений погрешностей радиуса планеты.

На рисунке 3.1 показана зависимость нормированного χ^2 от радиуса экзопланеты для кривых блеска с разным количеством точек N с одинаковой среднеквадратической ошибкой шума $\sigma_N = 0.002$ при коэффициентах потемнения к краю, соответствующих фильтрам B и H соответственно. Аналогично на рисунке 3.2 показана та же зависимость для кривой блеска, состоящей из 407 точек, на которую были наложены шумовые дорожки с различными среднеквадратическими отклонениями.

Величины среднеквадратичных отклонений определяемого методом наименьших квадратов радиуса экзопланеты для разных значений количества то-

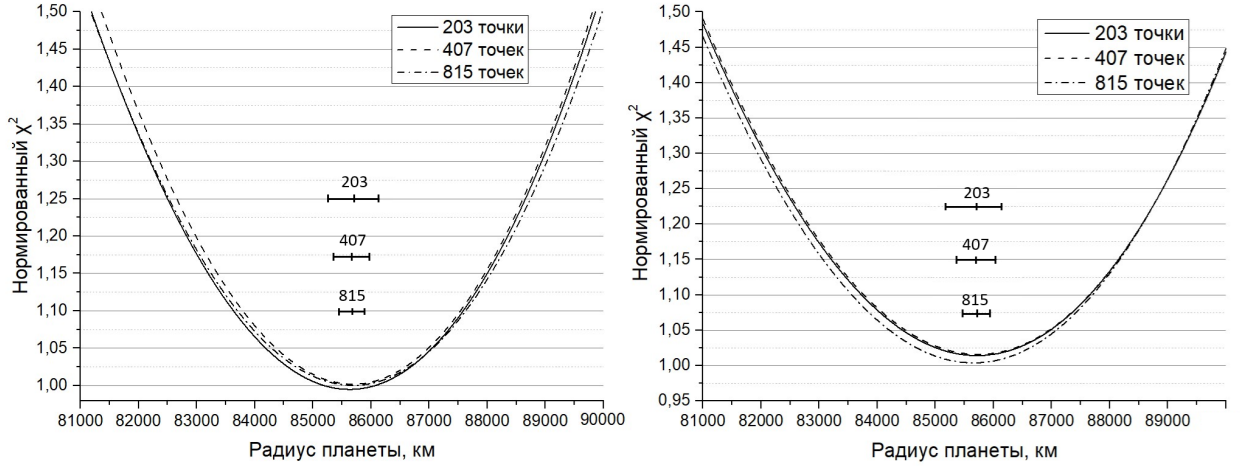


Рисунок 3.1 — Зависимость значений нормированного χ^2 от радиуса при обработке кривых блеска с разным количеством точек с добавленным шумом со среднеквадратическим отклонением $\sigma_N = 0.002$, с различным количеством точек, построенных для коэффициентов потемнения к краю, соответствующих фильтрам В (левый график) и Н (правый график). Также на графиках отмечены значения для оптимального решения и границ интервала 1σ для разного количества точек.

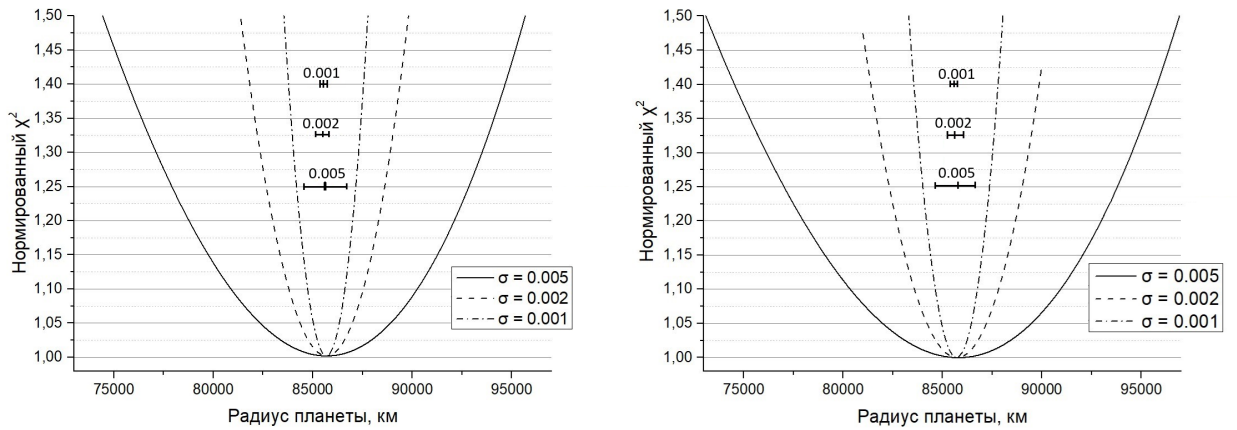


Рисунок 3.2 — Зависимость значений нормированного χ^2 от радиуса при обработке кривых блеска, состоящих из 407 точек, с различным среднеквадратическим отклонением добавленного шума, построенных для коэффициентов потемнения к краю, соответствующих фильтрам В (левый график) и Н (правый график). Также на графиках отмечены значения для оптимального решения и границ интервала 1σ для разного уровня шума.

Таблица 3.1 — Результаты обработки модельных кривых блеска в фильтре B для транзита планеты типа HD 189733 b.

Характеристики модельной кривой		Полученное значение, км	Среднеквадратичная ошибка, σ км		1 σ интервал, км		1.645 σ интервал ($P = 0.95$), км	
Количество точек	Индивидуальное отклонение		σ_-	σ_+	min	max	min	max
203	0.002	85608	446	414	85162	86022	84874	86289
407	10^{-4}	85687	16	15	85671	85702	85661	85712
407	0.001	85688	155	143	85533	85831	85433	85923
407	0.002	85687	309	287	85378	85974	85179	86159
407	0.005	85686	858	832	84828	86518	84275	87055
815	0.002	85677	229	212	85448	85889	85300	86026

Таблица 3.2 — Результаты обработки модельных кривых блеска в фильтре H для транзита планеты типа HD 189733 b.

Характеристики модельной кривой		Полученное значение, км	Среднеквадратичная ошибка, σ км		1 σ интервал, км		1.645 σ интервал ($P = 0.95$), км	
Количество точек	Индивидуальное отклонение		σ_-	σ_+	min	max	min	max
203	0.002	85658	488	452	85170	86110	84855	86401
407	10^{-4}	85691	17	16	85674	85707	85663	85718
407	0.001	85722	173	160	85549	85882	85437	85985
407	0.002	85718	348	320	85370	86038	85146	86244
407	0.005	85820	951	889	84869	86709	84256	87282
815	0.002	85714	245	227	85469	85941	85311	86087

чек и величины шума даны в таблицах 3.1, и 3.2. В них же даны ширины доверительных интервалов 1σ и 95% интервал. Приведённые в таблицах значения отображают некоторую асимметричность зависимости χ^2 от радиуса планеты (предположительно это связано с нелинейностью задачи), это проявляется в том что среднеквадратическая ошибка в сторону уменьшения (σ_-) оказывается чуть больше, чем в сторону увеличения (σ_+).

Как видно из таблиц, существует определённая асимметричность кривых зависимости функционала χ^2 от радиуса планеты. На рисунке 3.3 показаны модельные кривые, соответствующие границам различных интервалов, определённых при обработке модельной кривой из 407 точек с точностью $\sigma_N = 0.002$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже точности, соответствующей наземным наблюдениям, достаточно для выявления различий в радиусе экзопланеты в различных фильтрах, которые могут достигать нескольких сотен километров (Pont et al., 2007). Однако данные результаты были получены в идеальных условиях, так как нам были точно известны все параметры планетной системы и шумы строго подчинялись нормальному распределению.

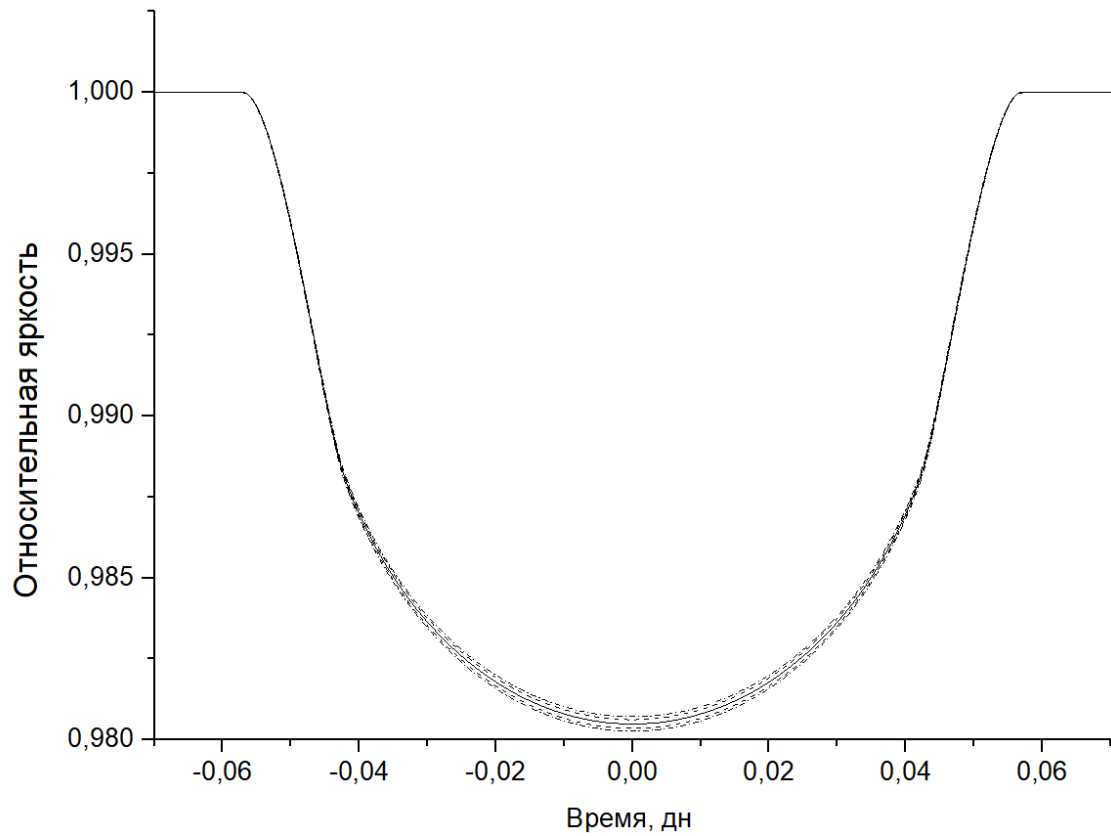


Рисунок 3.3 — Кривые блеска, соответствующие результатам обработки модельной кривой, состоящей из 407 точек со среднеквадратичной ошибкой $\sigma_N = 0.002$. Сплошная линия — изначальная кривая, пунктирная линия — результаты, соответствующие границам диапазона 1σ , пунктирная линия с точкой — результаты, соответствующие границам диапазона 1.645σ .

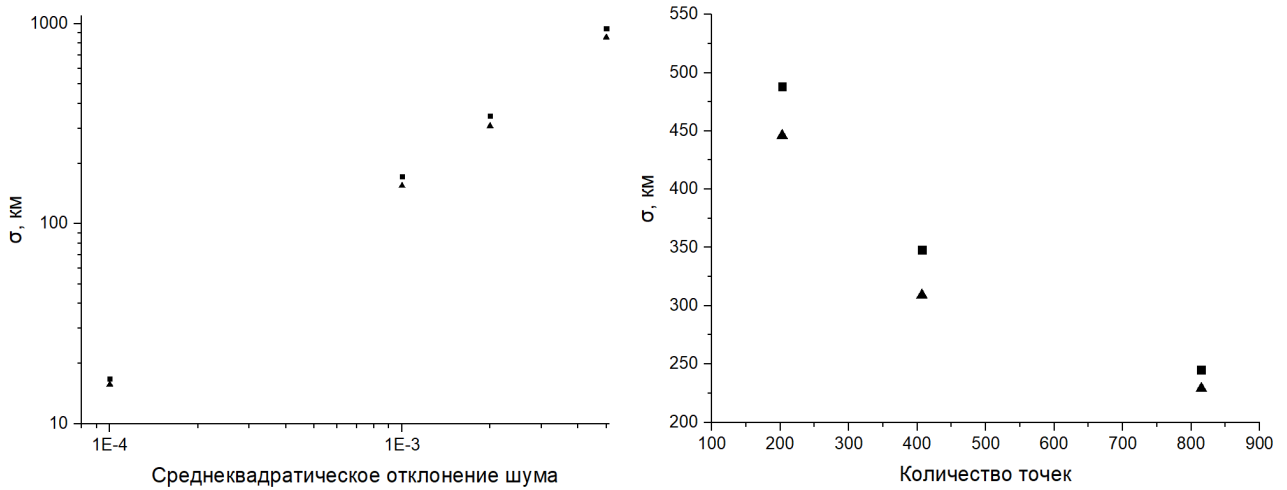


Рисунок 3.4 — Зависимость среднеквадратичной ошибки определения радиуса планеты от ширины шумовой дорожки и количества точек модельной кривой. Квадраты соответствуют условному фильтру H , треугольники – фильтру B .

Также предполагалось, что уровень внезатменного блеска был известен нам и не изменялся со временем, хотя, как показывает ряд исследований (например, (Абубекеров и Гостев, 2021)), вариация значения радиуса планеты вследствие неточности нормировки транзитной кривой блеска может достигать 6–10%. Однако, так как нашей текущей задачей было определение не абсолютных радиусов экзопланеты, а зависимость радиуса от длины волны, при обработке реальных наблюдательных кривых мы рассматривали внезатменный блеск как известный из анализа внезатменной части кривых блеска. Также стоит отметить, что при интерпретации наблюдательных данных по нескольким параметрам величина ошибки будет возрастать. Отметим, что, согласно данным таблиц 3.1 и 3.2, 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. Рисунок 3.4 поясняет сказанное.

3.2 Интерпретация с использованием квадратичного закона потемнения к краю и модели с облачным слоем

Помимо того, что транзитный метод предоставляет возможность относительно простого обнаружения экзопланет и определения ряда их геометриче-

ских параметров (таких, как радиус планеты, наклон орбиты и др.), он обладает ещё одним важным преимуществом – он даёт возможность получения эмпирической информации о размерах, структуре и составе их атмосфер. Во время прохождения экзопланеты по диску звезды часть её лучей проходит сквозь атмосферу, претерпевая рассеяние и поглощение, характер которых в свою очередь зависит как от длины волны, так и от состава и плотности атмосферы планеты (Fortney et al., 2010). Таким образом, характеристики экзопланетной атмосферы могут оказывать влияние на результаты фотометрических и спектральных наблюдений планетной системы. Одним из проявлений этого влияния является уменьшение радиуса планеты по мере увеличения длины волны.

При рэлеевском поглощении эффективное сечение рассеяния зависит от длины волны как $\sim \lambda^{-4}$, следствием чего является падение величины объёмного коэффициента рассеяния с увеличением длины волны. Таким образом, чем больше длина волны, тем большее количество излучения проходит сквозь атмосферу и доходит до наблюдателя. Это приводит к уменьшению глубины транзита. Так как при интерпретации транзитных кривых блеска глубина транзита в первом приближении равна квадрату отношения радиуса экзопланеты и радиуса звезды, радиус планеты, найденный из анализа наблюдений, полученных в красной части спектра (например, в фильтрах R или I), будет меньше, нежели из наблюдений, полученных в синей (например, в фильтрах U или B).

Для исследования возможности определения зависимости влияния атмосферы на определяемый радиус экзопланеты были выбраны данные наблюдений одной из наиболее изученных внесолнечных планет HD 189733 b. Интерпретируемые кривые блеска были получены в 2007 году телескопом HST (Pont et al., 2007, 2008). Наблюдения проводились в десяти различных фильтрах с диапазоном длин волн от $\lambda = 5500 - 6000 \text{ \AA}$ до $\lambda = 10000 - 10500 \text{ \AA}$. Каждая кривая блеска состоит из 625 точек с индивидуальной точностью порядка $\sigma \approx 10^{-4}$. При этом 475 точек находились за пределами непосредственно транзита, что позволяло с достаточно хорошей точностью определить уровень внезатмненного блеска и частично нивелировать проблему описанную в предыдущем разделе. С учётом того, что глубина транзита составляла порядка $2.5 \cdot 10^{-2}$, относительная ошибка (по отношению к глубине затмения) составляет менее $\sim 1\%$.

Для данной системы уже проводились попытки установить зависимость радиуса экзопланеты от длины волны, например, (Абубекеров и др., 2011; Pont et al., 2007). Новизной данной работы является идея свести задачу определения радиуса планеты к однопараметрической, зафиксировав все остальные параметры, включая радиус звезды и наклон орбиты равными значениям, одинаковым для всех длин волн. Вторая идея заключалась в проверке того, как на характер зависимости радиуса от длины волны может повлиять принятое в модели значение эксцентриситета орбиты экзопланеты.

Реализация первой идеи заключалась в том, что изначально была проведена интерпретация кривой блеска, соответствующей длине волны $6750 \text{ \AA}$, три раза различными значениями эксцентриситета. Интерпретация данной кривой проводилась с тремя свободными параметрами: радиусом звезды, радиусом планеты и наклоном орбиты. Впоследствии для остальных 9 кривых блеска использовались те значения радиуса звезды и наклона орбиты, которые были получены из решения трёхпараметрической задачи для длины волны $6750 \text{ \AA}$.

Реализация второй идеи заключалась в том, что вычисления проводились трижды для трёх различных значений эксцентриситета 0, 0.01 и 0.02 с фиксированным аргументом перицентра, равным $\omega = 270^\circ$ (транзит проходит ровно в перицентре). Данные значения эксцентриситета были выбраны на основе имеющихся результатов спектральных наблюдений данной системы и анализа кривых лучевых скоростей (Bonomo et al., 2017; Paredes et al., 2021; Rosenthal et al., 2021).

Длина большой полуоси была задана фиксированной, равной $a = 0.03126 \text{ а. е.}$, период обращения – $P_{orb} = 2.2185752 \text{ д}$ (Addison et al., 2019; Bonomo et al., 2017; Rosenthal et al., 2021).

Единственными фиксированными параметрами, которые отличались для каждой длины волны, были коэффициенты потемнения к краю. При интерпретации использовался квадратичный закон, для каждой длины волны фиксировались коэффициенты, рассчитанные теоретически на основе модели звёздных атмосфер в работе (Eastman et al., 2013). Следует отметить, что, как показывают предыдущие результаты данной работы, а также ряд других исследований (см. например, (Абубекеров и Гостев, 2023)), изменения коэффициентов потем-

Таблица 3.3 — Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0$

Длина волны, Å	Радиус звезды $R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Квадратичный коэффициент	Наклон орбиты, °	Радиус планеты, км	Нормированный χ^2
5750	0.756	0.6096	0.1481	85.72	82538	2.27896
6250	0.756	0.5438	0.1815	85.72	82542	1.35196
6750	0.756	0.5018	0.1905	85.72	82269	0.99531
7250	0.756	0.4599	0.211	85.72	82000	0.96278
7750	0.756	0.4208	0.2075	85.72	81893	0.95105
8250	0.756	0.392	0.2125	85.72	82000	1.00925
8750	0.756	0.3653	0.2174	85.72	81678	0.99496
9250	0.756	0.3414	0.224	85.72	81785	0.91441
9750	0.756	0.3217	0.2334	85.72	81781	1.20305
10250	0.756	0.3019	0.2428	85.72	81678	1.2075

Таблица 3.4 — Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0.01$

Длина волны, Å	Радиус звезды $R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Квадратичный коэффициент	Наклон орбиты, °	Радиус планеты, км	Нормированный χ^2
5750	0.763	0.6096	0.1481	85.65	83499	2.27256
6250	0.763	0.5438	0.1815	85.65	83227	1.31716
6750	0.763	0.5018	0.1905	85.65	82683	1.02421
7250	0.763	0.4599	0.211	85.65	82738	0.96368
7750	0.763	0.4208	0.2075	85.65	82520	0.95285
8250	0.763	0.392	0.2125	85.65	82629	1.03565
8750	0.763	0.3653	0.2174	85.65	82412	1.01356
9250	0.763	0.3414	0.224	85.65	82520	0.90821
9750	0.763	0.3217	0.2334	85.65	82516	1.19095
10250	0.763	0.3019	0.2428	85.65	82303	1.1757

нения к краю оказывают слабое влияние на определяемые геометрические параметры системы, в том числе на радиус планеты.

Результаты обработки с использованием квадратичного закона потемнения к краю и теоретических коэффициентов представлены в таблицах 3.3, 3.4, 3.5, а также в графическом виде на рисунке 3.5.

Таким образом, удалось выявить различие в радиусе планеты между результатами интерпретации на длине волны 5750 Å и 10250 Å, которое существен-

Таблица 3.5 — Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0.02$

Длина волны, Å	Радиус звезды $R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Квадратичный коэффициент	Наклон орбиты, °	Радиус планеты, км	Нормированный χ^2
5750	0.77	0.6096	0.1481	85.58	83896	2.25266
6250	0.77	0.5438	0.1815	85.58	83892	1.35456
6750	0.77	0.5018	0.1905	85.58	83456	1.02851
7250	0.77	0.4599	0.211	85.58	83346	0.94568
7750	0.77	0.4208	0.2075	85.58	83236	0.95775
8250	0.77	0.392	0.2125	85.58	83341	1.01105
8750	0.77	0.3653	0.2174	85.58	83017	1.00076
9250	0.77	0.3414	0.224	85.58	83126	0.92911
9750	0.77	0.3217	0.2334	85.58	83124	1.19645
10250	0.77	0.3019	0.2428	85.58	83016	1.2073

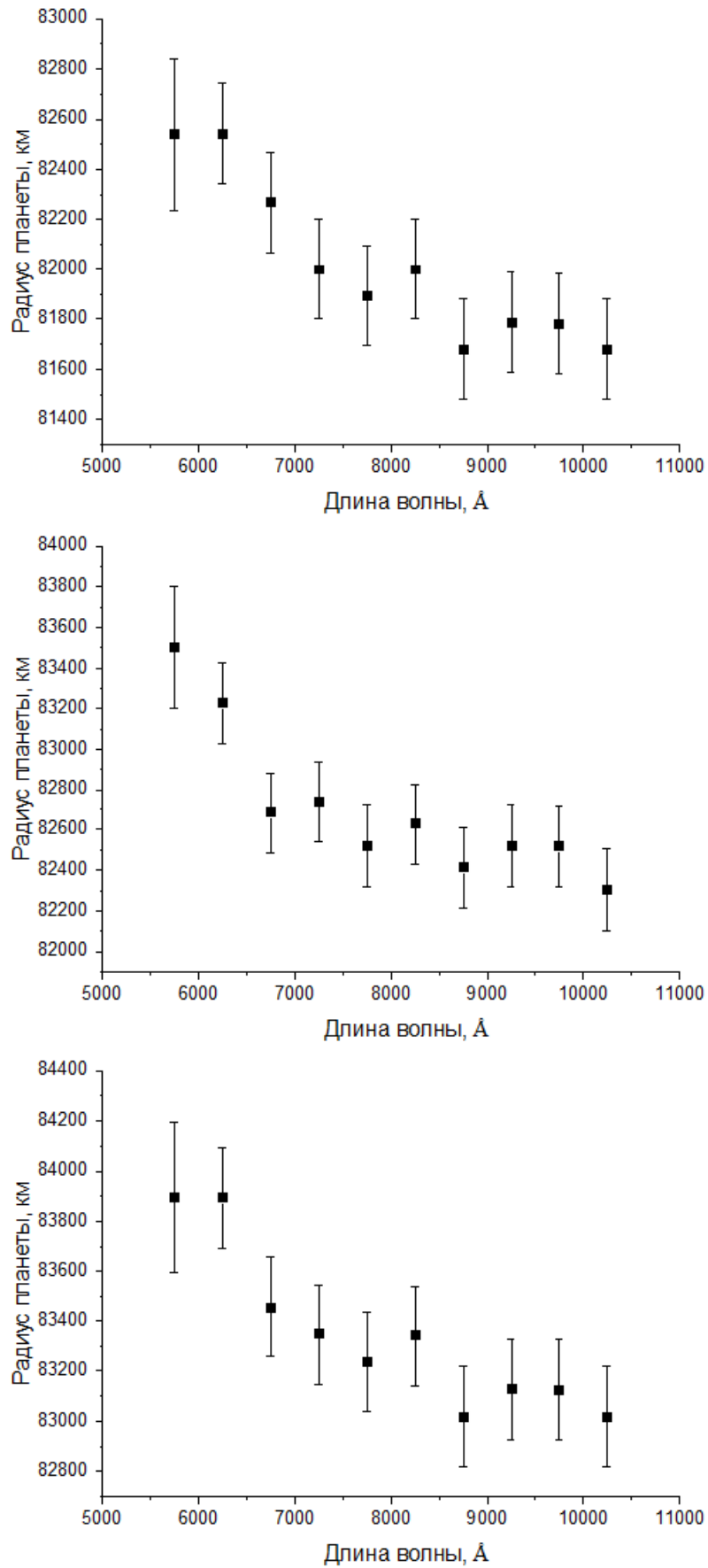


Рисунок 3.5 — Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, полученные при интерпретации в рамках квадратичного закона потемнения к краю и фиксированным эксцентриситетом $e = 0$ (верхний график), $e = 0.01$ (средний график) и $e = 0.02$ (нижний график).

но превосходит значения стандартных отклонений радиуса, а также значительно превышает оценки данного различия, полученные другими исследователями (Абубекеров и др., 2011; Pont et al., 2007).

Для анализа характера зависимости радиуса планеты от длины волны было проведено сравнение полученных значений радиуса планеты со значениями, которые были получены с использованием модели, состоящей из частично прозрачного кольца вокруг непрозрачного диска, которое бы представляло собой упрощённую модель атмосферы с оптически непрозрачным слоем облаков.

Для моделирования атмосферы была взята упрощённая экспоненциальная модель с распределением концентрации частиц по высоте в соответствии с формулой $n(h) = n_0 \exp(h/H)$, где n_0 – концентрация частиц вблизи облачного слоя, h – высота слоя атмосферы, H – характеристическая высота. Коэффициент рассеяния κ считался прямо пропорциональным концентрации частиц газа n .

Таким образом, кольцо частичной прозрачности, моделирующее верхнюю часть атмосферы планеты, характеризовалось двумя параметрами: коэффициентом рассеяния вблизи облачного слоя κ и характеристической высотой атмосферы H . Моделирование проводилось с использованием численного метода, в рамках которого атмосфера планеты была разбита на тонкие кольца, для каждого из которых была рассчитана оптическая толщина вдоль луча зрения τ по формуле:

$$\tau(\xi) = 2 \int_{\xi}^{R_a} \frac{\kappa(r)rdr}{\sqrt{r^2 - \xi^2}}, \quad (3.4)$$

где ξ – прицельное расстояние, $r = r_0 + h$, где r_0 – радиус непрозрачного кружка, R_a – радиус планеты с атмосферой.

Далее для каждого кольца с фиксированной τ были определены площади его пересечения с кольцами диска звезды с постоянной светимостью, использованными в рамках центрально-симметричного закона потемнения к краю. После суммирования излучения со всех таких площадок определялось количество света, падающего на кольцо со стороны звезды. Далее, исходя из формулы:

$$I = I_0 \exp(-\tau), \quad (3.5)$$

где I_0 – излучение, падающее на площадь кольца со стороны звезды, I – излучение, прошедшее сквозь атмосферу, не претерпев рассеяния. Из их разности устанавливалось количество света, рассеиваемое каждым кольцом с постоянным τ . По итогам суммирования по всем кольцам определялась суммарная доля излучения звезды, рассеиваемая атмосферой.

На основе допущения, что глубина транзита в средней точке (она же наибольшая глубина) в первом приближении пропорциональна квадрату радиуса планеты, были определены эффективные радиусы для каждой длины волны. Под эффективными радиусами подразумевались такие радиусы непрозрачного кружка, при которых глубина транзита соответствовала бы той, что получилась при моделировании транзита с заданными характеристиками атмосферы.

Мы пренебрегали вкладом рефракции в экзопланетных атмосферах ввиду того, что существующие оценки её влияния на результаты фотометрических наблюдений дают значения порядка 10^{-5} от уровня блеска звезды, что значительно меньше точности использовавшихся нами спутниковых наблюдений (Alp and Demory, 2018).

В рамках данной модели была решена обратная задача. Её суть заключалась в переборе по трём параметрам: радиусу центрального непрозрачного ядра, характеристической высоте атмосферы и коэффициенту непрозрачности у условной поверхности на длине волны 5750 Å (коэффициенты непрозрачности для остальных длин волн задавались в соответствии с рэлеевским рассеянием как пропорциональные λ^{-4}). Задача решалась отдельно для каждого из трёх значений эксцентриситета. В итоге были выбраны значения трёх вышеупомянутых параметров атмосферы, соответствовавшие наименьшей сумме квадратов разностей значений эффективных радиусов и радиусов планеты, полученных из интерпретации наблюдательных данных. Их значения представлены в таблице 3.6. В таблице 3.7 приведены коэффициенты непрозрачности для разных длин волн, полученные в ходе решения обратной задачи.

Полученное значение для коэффициента непрозрачности в приближении атмосферы, состоящей из молекулярного водорода, соответствует концентрации частиц в $2.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ или около 3.487 моль/ м^3 , что примерно соответствует плотности атмосферы в тропопаузе Юпитера (50-100 км выше уровня облаков) (Seiff et al., 1998). Это является достаточно правдоподобным результа-

Таблица 3.6 — Полученные в ходе решения обратной задачи параметры радиуса непрозрачного ядра, коэффициента непрозрачности атмосферы и характеристической высоты смоделированной атмосферы для разных значений эксцентриситета.

Эксцентриситет	Радиус непрозрачного ядра, км	Коэффициент рассеяния при $\lambda = 5750 \text{ \AA}$, 10^{-4} км^{-1}	Характеристическая высота атмосферы, км
0.0	81400	1.5	1000
0.01	82100	1.5	1000
0.02	82800	1.5	950

Таблица 3.7 — Коэффициенты непрозрачности атмосферы, полученные в ходе решения задачи минимизации суммы квадратов разностей.

Длина волны λ , $\text{\AA}$	Коэффициент непрозрачности у поверхности, 10^{-5} км^{-1}
5750	15
6250	10.74
6750	7.898
7250	5.934
7750	4.545
8250	3.539
8750	2.797
9250	2.239
9750	1.814
10250	1.485

том с учётом высокой температуры рассматриваемой планеты. Также важным результатом является то, что полученные характеристики атмосферы мало зависят от заданного параметра эксцентриситета при небольших его значениях ($e \leq 0.02$).

На рисунке 3.6 представлены значения эффективных радиусов, полученные для параметров атмосферы, определённых в ходе решения обратной задачи для трёх значений эксцентриситета в сравнении с радиусами планеты, полученными из интерпретации кривых блеска.

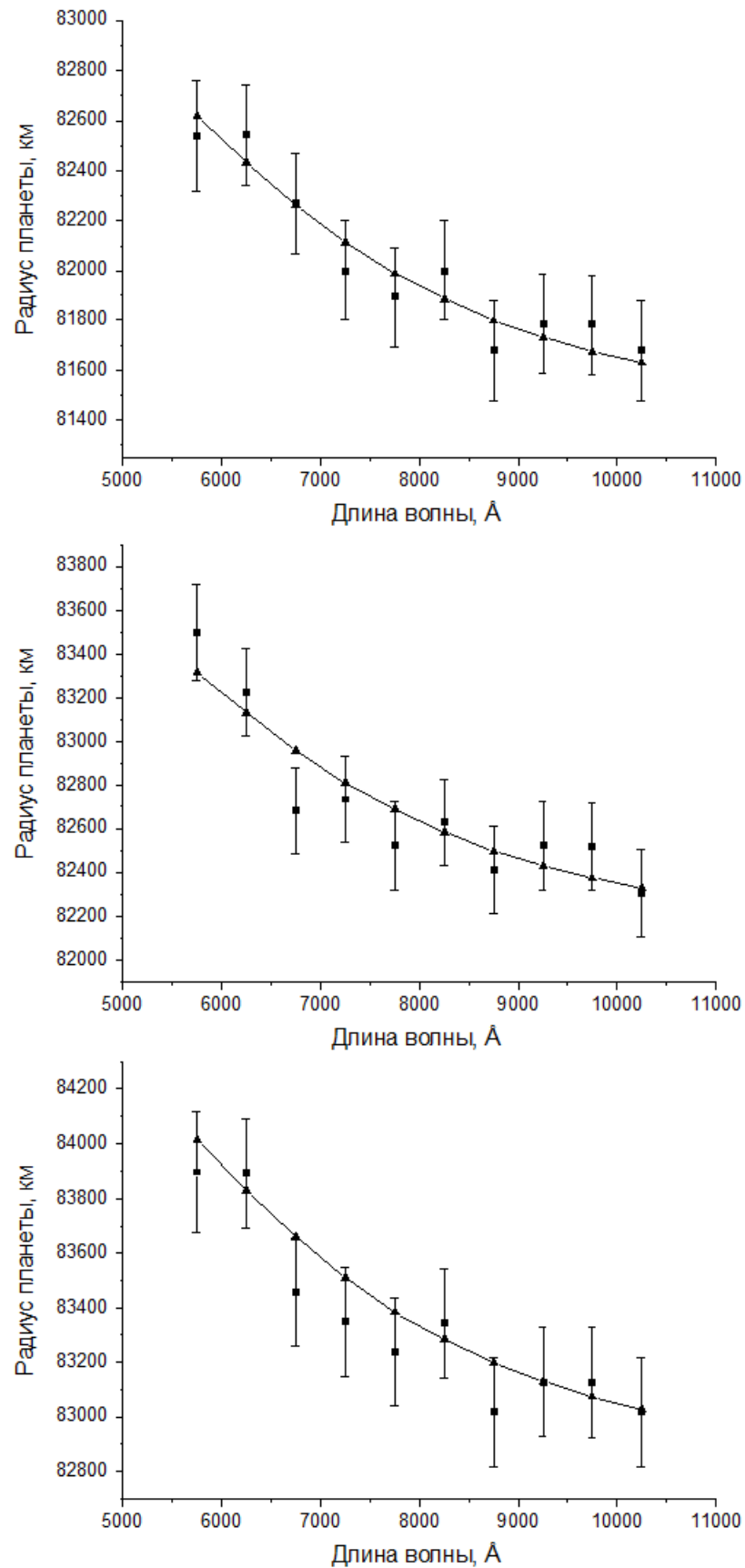


Рисунок 3.6 — Радиусы планеты при интерпретации наблюдений HD 189733 b (квадраты) и эффективные радиусы, полученные при моделировании её атмосферы (линия) при значениях эксцентриситета $e = 0$ (верхний график), $e = 0.01$ (средний график) и $e = 0.02$ (нижний график).

3.3 Интерпретация с использованием четырёхпараметрического закона потемнения к краю и простой экспоненциальной модели атмосферы

Для дальнейшего развития идеи, представленной в предыдущем разделе, требовалось усложнить подход к учёту эффекта потемнения к краю. Предположение о необходимости равенства наклона орбиты и радиуса звезды для интерпретации кривых блеска, полученных при наблюдении на различных длинах волн, является вполне приемлемым с учётом логики и имеющихся моделей (наклон орбиты – это геометрическая характеристика орбиты, которая никак не связана с длиной волны, а радиус звезды для звёзд главной последовательности меняется с длиной волны незначительно). В то же время с коэффициентами потемнения к краю, которые в используемом методе были единственным параметром, не считая радиуса планеты, который менялся от длины волны, ситуация сложнее. Хотя квадратичный закон в целом достаточно хорошо описывает характер падения блеска к краю звезды, он не является наиболее точным из существующих.

Также не является наиболее точной и статическая одномерная модель звёздной атмосферы. В работах (Cunha et al., 2009; Grupp, 2004; Hayek et al., 2012) проведены расчёты в рамках более сложной трёхмерной модели атмосферы, учитывающие в том числе наличие в ней конвективных движений. В частности, в работе (Hayek et al., 2012) приведены коэффициенты четырёхпараметрического закона потемнения к краю, рассчитанные на основе данной модели и вычисленные специально для транзитов HD 189733 b и HD 209458 b.

Таким образом, расчёты зависимости радиуса внесолнечной планеты от длины волны были повторены для HD 189733 b, а также проведены для HD 209458 b с использованием более сложного четырёхпараметрического закона. Данный закон потемнения к краю описывается формулой (Claret and Bloemen, 2011):

$$\frac{I(\psi)}{I(0)} = 1 - \sum_{n=1}^4 u_n (1 - (\cos^{\frac{n}{2}} \psi)), \quad (3.6)$$

где ψ – угол между нормалью излучающей поверхности и направлением на наблюдателя. Коэффициенты потемнения к краю u_n были взяты нами из рабо-

Таблица 3.8 — Коэффициенты потемнения, использовавшиеся при интерпретации кривых блеска HD 189733 b.

Длина волны, Å	u1	u2	u3	u4
5750	0.646102	-0.38499	1.0617947	-0.455922
6250	0.695889	-0.426089	1.019505	-0.4454
6750	0.692335	-0.468011	1.048818	-0.447527
7250	0.737112	-0.53009	1.024321	-0.436876
7750	0.765776	-0.562083	0.992405	-0.425666
8250	0.7685685	-0.572945	0.972618	-0.41628
8750	0.78245	-0.606133	0.9542891	-0.405923
9250	0.789165	-0.617292	0.919586	-0.389956
9750	0.781734	-0.587625	0.867041	-0.370106
10250	0.774302984	-0.557959	0.814495	-0.350255

Таблица 3.9 — Коэффициенты потемнения, использовавшиеся при интерпретации кривых блеска HD 209458 b.

Длина волны, Å	u1	u2	u3	u4
3201	0.216726	0.7661	-0.04706	-0.019333
3750	0.287522	0.646635	0.00393	-0.046687
4300	0.37938	0.487325	0.0704125	-0.0588
4840	0.489949	0.318677	0.0804263	-0.05071745
5398	0.582382	0.151122	0.130352	-0.060919
5802	0.624466	0.056913	0.169525	-0.072738
6779	0.643443	-0.031513	0.227925	-0.093163
7755	0.721413	-0.248879	0.324668	-0.120335
8732	0.74116	-0.355263	0.391188	-0.143191
9708	0.777375	-0.534513	0.516216	-0.188161

ты (Nauck et al., 2012), где они были рассчитаны на основе трёхмерной модели атмосфер звёзд HD 189733 и HD 209458. Значения коэффициентов приведены в таблицах 3.8 и 3.9.

На рисунке 3.7 приведены сравнения зависимостей поверхностной яркости от параметра $\mu = \cos \psi$ для звезды HD 189733 на длинах волн 5750 Å и 10250 Å для четырёхпараметрического и квадратичного законов потемнения к краю.

Для интерпретации использовались те же наблюдательные данные для экзопланет HD 189733 b и HD 209458 b, что были представлены во второй и третьей главе данной работы.

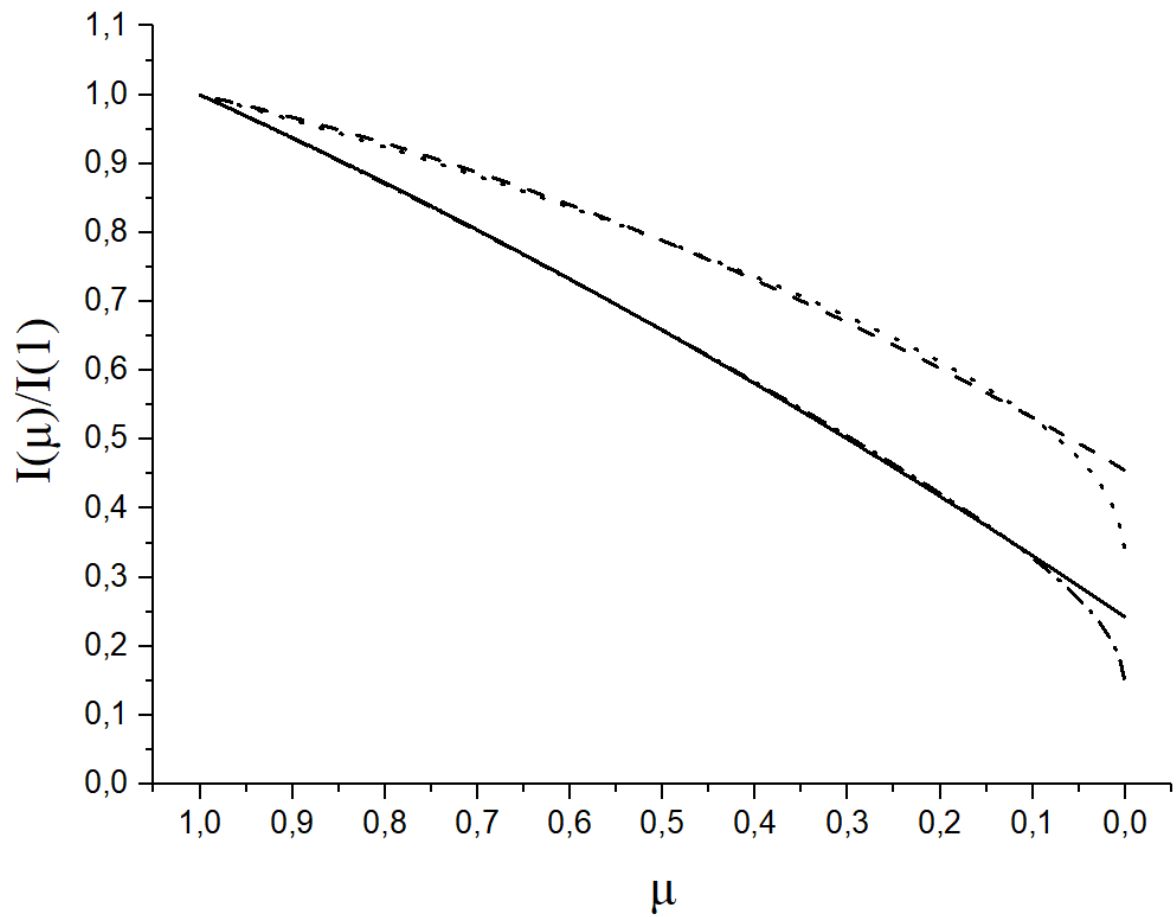


Рисунок 3.7 — Зависимость яркости от косинуса угла между нормалью излучающей поверхности и лучом зрения для звезды HD 189733. Сплошная линия и линия с точками соответствуют квадратичному и четырёхпараметрическому закону на длине волны $5750 \text{ \AA}$, пунктирная линия и точки — квадратичному и четырёхпараметрическому закону на длине волны $10250 \text{ \AA}$.

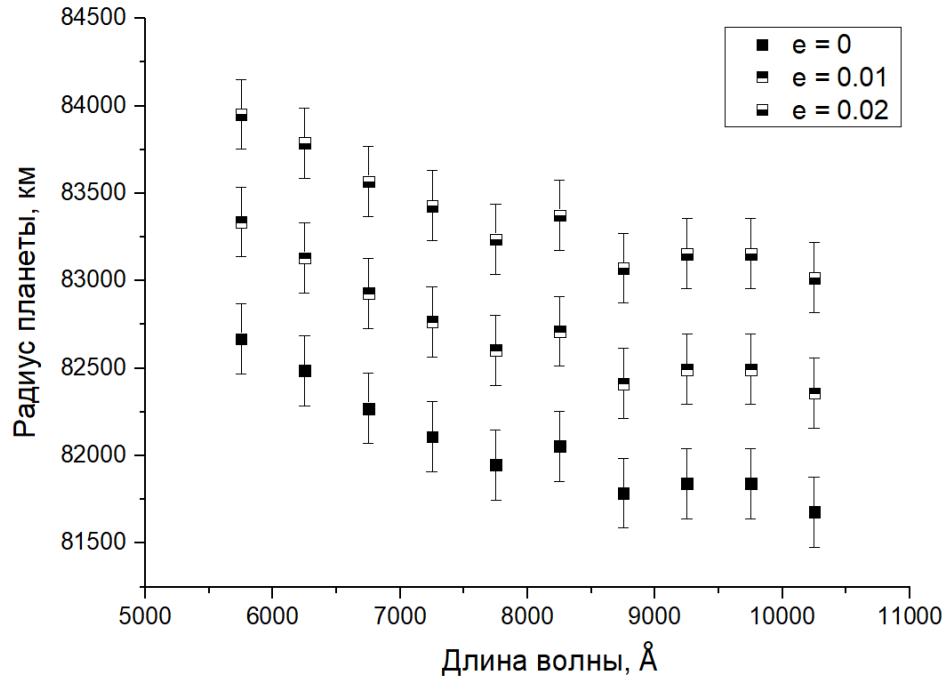


Рисунок 3.8 — Зависимость радиуса планеты от длины волны при интерпретации кривой блеска HD 189733 b. В рамках однопараметрической интерпретации для трёх различных значений эксцентриситета, с использованием четырёхпараметрического закона потемнения к краю.

Для HD 189733 b был использован тот же метод интерпретации и те же значения фиксированных параметров, что были использованы при интерпретации в рамках квадратичного закона. Для HD 209458 b были взяты значения эксцентриситета 0, 0.02 и 0.05 также с допущением, что транзит проходит в перицентре орбиты. Для каждого значения эксцентриситета решалась предварительно задача с тремя свободными параметрами: наклоном орбиты, радиусом звезды, радиусом планеты. На основе полученных величин наклона орбиты и радиуса звезды рассчитывались средневзвешенные значения, которые использовались для решения окончательной задачи интерпретации. Итоговые значения радиуса звезды и наклона орбиты указаны в таблице 3.13.

Результаты интерпретации кривых блеска экзопланеты HD 189733 b представлены в таблицах 3.10, 3.11, 3.12 и на рисунке 3.8.

Результаты интерпретации кривых блеска экзопланеты HD 209458 b представлены в таблицах 3.14, 3.15, 3.16 и на рисунке 3.9.

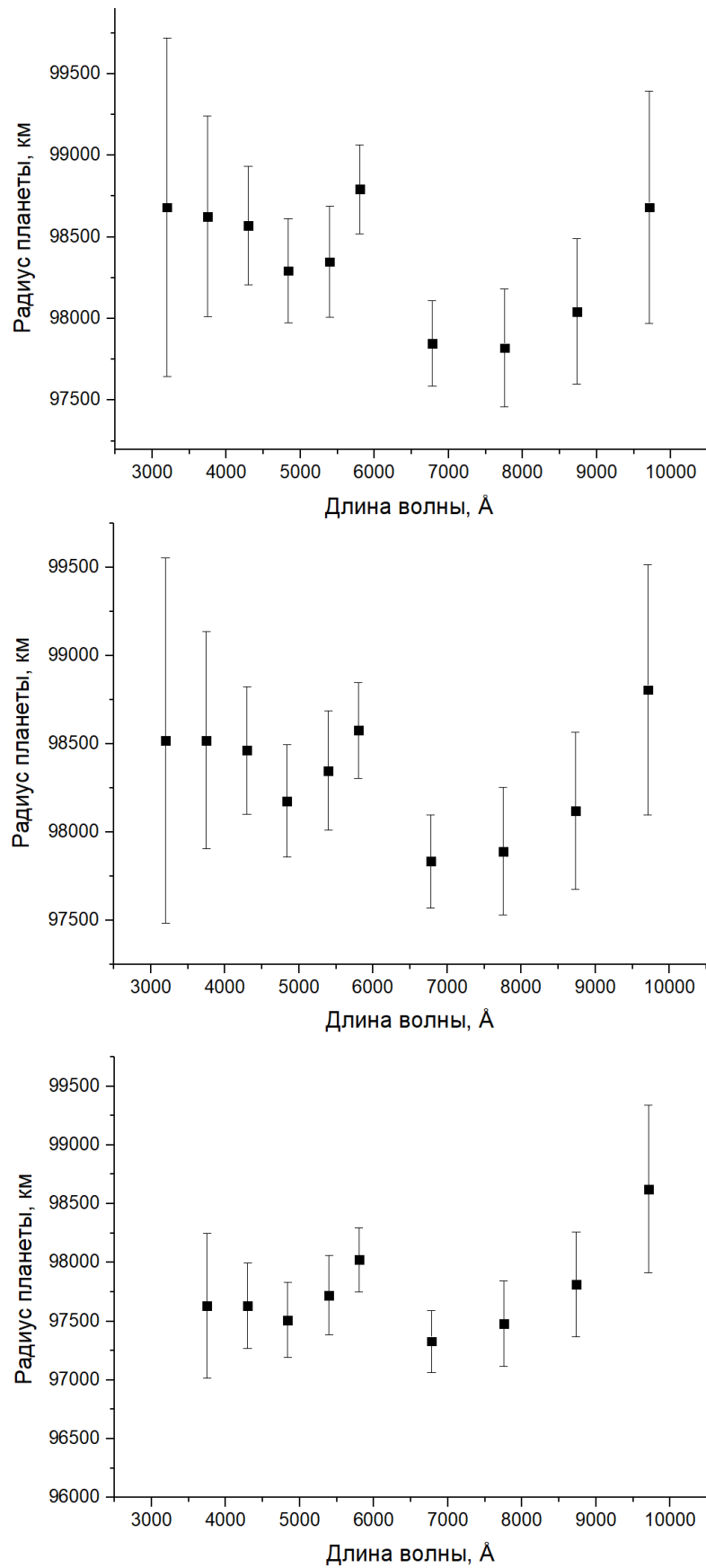


Рисунок 3.9 — Зависимость радиуса планеты от длины волны при интерпретации кривой блеска HD 209458 b. Для эксцентриситета $e = 0$ (верхний график), $e = 0.02$ (средний график) и $e = 0.05$ (нижний график). В рамках однопараметрической интерпретации, с использованием четырёхпараметрического закона потемнения к краю.

Полученные результаты были сопоставлены с моделью рэлеевской изотермической атмосферы. В рамках данной модели предполагалось, что распределение плотности в атмосфере подчиняется экспоненциальному закону и уменьшается в e раз при увеличении высоты на одну характеристическую высоту $H = kT/Mg$, где M обозначает массу частиц. В таком случае оптическая толщина атмосферы в зависимости от высоты описывается формулой $\tau(\lambda, z) = \sigma(\lambda)n(z)\sqrt{2\pi R_p H}$, где R_p – предполагаемый радиус планеты, $n(z)$ – концентрация частиц, $\sigma(\lambda)$ – площадь сечения рассеяния (Fortney, 2008). В таком случае оптическая толщина, соответствующая эффективной высоте $\tau(\lambda, z_{eff})$, будет определяться только соотношением R_p/H , и для значений от 30 до 3000 она будет равна примерно 0.56 (Etangs et al., 2008). z_{eff} здесь – эффективная высота, а именно разница между эффективным радиусом и радиусом планеты, иными словами $R_{eff} = R_p + z_{eff}$.

Всё это приводит нас к соотношению (Sing et al., 2016):

$$z_{eff} = H \ln\left(\frac{\sigma(\lambda)P}{\tau(\lambda, z_{eff})}\sqrt{\frac{2\pi R_p}{kTMg}}\right), \quad (3.7)$$

где P – давление, соответствующее эффективной высоте.

Если задать площадь сечения как функцию от длины волны, как $\sigma(\lambda)/\sigma_0 = (\lambda/\lambda_0)^{-\alpha}$, где α для случая рэлеевского рассеяния равна 4, то в таком случае прямым следствием из формулы является соотношение:

$$\alpha H = \frac{dR_{eff}}{d \ln \lambda}. \quad (3.8)$$

Таким образом, в случае рэлеевского рассеяния разница в радиусах для HD 189733 b должна составлять $2.31 H$ (диапазон длин волн от 5750 до 10250 Å) и $4.44 H$ для HD 209458 b (диапазон длин волн от 3201 до 9708 Å).

Для определения параметров нами была решена обратная задача для радиусов планеты, полученных из интерпретации. Задача решалась по 3 параметрам: радиусу планеты, массе частиц и произведению $\sigma_0 P$, где σ_0 – площадь сечения на длине волны 5750 Å. В случае HD 189733 b брались все 10 точек, что давало 7 степеней свободы. В случае HD 209458 b отбрасывались значения для длины волны 5802 Å, так как на участок данного фильтра приходятся

фраунгоферовы линии натрия, влияние которых мы хотели учесть отдельно. Также мы отбросили значение, полученное на длине волны 9708 Å, по причине слишком большой погрешности значений, что в итоге оставляло 8 точек и 5 степеней свободы.

Результаты решения обратной задачи представлены в таблице 3.17. Значения температуры нами фиксировались равными равновесным температурам для данной планеты (Addison et al., 2019; Southworth, 2010). В графическом виде результаты представлены на рисунках 3.10, 3.11. Вследствие явного вырождения параметров $\sigma_0 P$ и R_p нами также приведено объединяющее их выражение $\ln(\sigma_0 P \sqrt{R_p}) + R_p/H$. Высота атмосферы задавалась как разница радиуса планеты, определённого из интерпретации, и радиуса планеты, определённого из решения обратной задачи.

Таким образом, было определено, что изменение радиуса экзопланеты HD 189733 b достаточно хорошо описывается моделью изотермической рэлеевской атмосферы. Значения нормированного χ^2 оказываются существенно меньше единицы.

Полученное для данной экзопланеты уменьшение значения радиуса составило порядка 990 ± 260 км на диапазоне частот от 550 нм до 1050 нм, что даёт характеристическую высоту атмосферы порядка 383—397 км. Работы других исследователей, в которых использовалась такая же модель атмосферы, оценивали общую разницу в радиусе в 427 ± 148 км на участке от 600 до 1000 нм, что даёт характеристическую высоту около 230 км для случая рэлеевского рассеяния (Pont et al., 2008).

Изменение эксцентриситета практически не влияет на величину характеристической высоты (отличие составляет порядка 4% и примерно соответствует величине ошибки). Тем не менее, общий радиус планеты увеличивается, что, в частности, приводит к изменению определяемого среднего молекулярного веса частиц атмосферы M .

Также стоит отметить, что полученное значение среднего молекулярного веса частиц атмосферы $M = 1.18\text{—}1.28$ атомных единиц массы, при котором наблюдается наилучшее соответствие теоретической и смоделированной зависимости падения радиуса планеты при росте длины волны, говорит о значительной доле атомарного водорода в атмосфере планеты.

В то же время в случае экзопланеты HD 209458 b заметна значительная разница в характере зависимости радиуса экзопланеты от длины волны для различных значений эксцентриситета. Так, изменение эксцентриситета от 0 до 0.05 привело к уменьшению характеристической высоты с 256 до 102 км, что, как следствие, привело к увеличению определяемого из неё среднего молекулярного веса с 4.9 до 11.8 атомных единиц массы. Данный эффект может быть связан с тем, что планета HD 209458 b имеет более удалённую от звезды орбиту, в результате чего изменение эксцентриситета на ту же величину сильнее сказывается на изменении значения прицельного параметра, нежели в случае HD 189733 b. Также объяснения могут быть связаны с законом потемнения к краю звезды и характером планетарной атмосферы HD 209458 b. Как показывают наши результаты и результаты других авторов, в атмосфере HD 209458 b помимо водорода и гелия присутствует значительное количество тяжёлых элементов (Barman, 2007; Giacobbe et al., 2021; Schneider et al., 2022).

Также несмотря на наличие общего тренда на снижение радиуса планеты по мере увеличения длины волны (по крайней мере, для случая круговой орбиты), присутствуют отклонения, прежде всего выраженные в радиусах планеты, полученных на длинах волн 5802 и 9708 Å. Если второй случай может быть объяснён низкой точностью наблюдений, то первый может быть связан с наличием в полосе пропускания данного фильтра (5320 - 6290 Å) фраунгоферова дублета линий натрия (5895.92 и 5889.95 Å). Аналогичные отклонения уже были выявлены в работах других исследователей (Sing et al., 2016).

Исходя из разницы радиуса планеты, полученного нами из интерпретации на длине волны 5802 Å, и полученного для этой же длины волны эффективного радиуса, соответствующего модели атмосферы (628 км для круговой орбиты, 442 км для $e = 0.02$ и 480 км для $e = 0.05$), мы определили эквивалентные ширины фраунгоферова дублета натрия (5895.92 Å и 5889.95 Å) в атмосфере HD 209458 b. Они составили 0.185 Å для круговой орбиты, 0.13 и 0.14 Å для эксцентриситета 0.02 и 0.05 соответственно.

Таблица 3.10 — Результаты интерпретации кривых блеска HD 189733 b при значении эксцентриситета $e = 0$.

Длина волны, Å	Радиус планеты, км	Радиус планеты, R_{jup}	χ^2
5750	82668 ± 130	1.1578 ± 0.018	2.55114
6250	82485 ± 130	1.1552 ± 0.018	1.43152
6750	82270 ± 130	1.1522 ± 0.018	1.1993
7250	82108 ± 130	1.1499 ± 0.018	1.0183
7750	81947 ± 130	1.1477 ± 0.018	1.064812
8250	82055 ± 130	1.1492 ± 0.018	0.9591502
8750	81786 ± 130	1.1454 ± 0.018	0.83009
9250	81840 ± 130	1.1462 ± 0.018	0.86017
9750	81843 ± 130	1.1462 ± 0.018	1.21049
10250	81678 ± 130	1.1439 ± 0.018	2.31442

Таблица 3.11 — Результаты интерпретации кривых блеска HD 189733 b при значении эксцентриситета $e = 0.01$.

Длина волны, Å	Радиус планеты, км	Радиус планеты, R_{jup}	χ^2
5750	83336 ± 132	1.1671 ± 0.018	2.45114
6250	83129 ± 132	1.1642 ± 0.018	1.30002
6750	82928 ± 132	1.1614 ± 0.018	1.2893
7250	82765 ± 132	1.1591 ± 0.018	1.0274
7750	82602 ± 132	1.1568 ± 0.018	1.064812
8250	82711 ± 132	1.1584 ± 0.018	0.989011
8750	82412 ± 132	1.1542 ± 0.018	0.92996
9250	82494 ± 132	1.1553 ± 0.018	0.99127
9750	82490 ± 132	1.1553 ± 0.018	1.19238
10250	82358 ± 132	1.1534 ± 0.018	2.30291

Таблица 3.12 — Результаты интерпретации кривых блеска HD 189733 b при значении эксцентриситета $e = 0.02$.

Длина волны, Å	Радиус планеты, км	Радиус планеты, R_{jup}	χ^2
5750	83952 ± 134	1.1758 ± 0.018	2.44732
6250	83787 ± 134	1.1735 ± 0.018	1.25992
6750	83567 ± 134	1.1704 ± 0.018	1.11025
7250	83429 ± 134	1.1685 ± 0.018	1.06056
7750	83237 ± 134	1.1658 ± 0.018	0.98466
8250	83374 ± 134	1.1677 ± 0.018	1.024915
8750	83072 ± 134	1.1635 ± 0.018	0.97545
9250	83154 ± 134	1.1646 ± 0.018	0.989011
9750	83148 ± 134	1.1646 ± 0.018	1.37614
10250	83017 ± 134	1.1627 ± 0.018	2.58366

Таблица 3.13 — Фиксированные значения наклона орбиты и радиуса звезды для системы HD 209458.

e	0	0.02	0.05
$i, ^\circ$	86.664	86.72	86.96
$R, R_\odot$	1.168	1.17	1.172

Таблица 3.14 — Результаты интерпретации кривых блеска HD 209458 b для эксцентриситета $e = 0$.

Длина волны, Å	Радиус планеты, км	Радиус планеты, R_{jur}	χ^2
3201	98681 ± 1035	1.3821 ± 0.0145	1.14721
3750	98626 ± 615	1.3813 ± 0.0086	1.20521
4300	98570 ± 362	1.3805 ± 0.0051	2.03745
4840	98292 ± 319	1.3766 ± 0.0045	1.39215
5398	98348 ± 338	1.3774 ± 0.0047	1.17044
5802	98793 ± 272	1.3837 ± 0.0038	2.14355
6779	97848 ± 263	1.3704 ± 0.0037	2.2828
7755	97820 ± 362	1.37 ± 0.0051	2.38839
8732	98042 ± 445	1.3731 ± 0.0062	1.86758
9708	98681 ± 710	1.3821 ± 0.01	1.56624

Таблица 3.15 — Результаты интерпретации кривых блеска HD 209458 b для эксцентриситета $e = 0.02$.

Длина волны, Å	Радиус планеты, км	Радиус планеты, R_{jur}	χ^2
3201	98519 ± 1039	1.3798 ± 0.0146	1.11399
3750	98519 ± 619	1.3798 ± 0.0087	1.24327
4300	98462 ± 366	1.379 ± 0.0051	2.72558
4840	98176 ± 324	1.375 ± 0.0045	1.21373
5398	98348 ± 342	1.3774 ± 0.0048	1.07674
5802	98576 ± 276	1.3806 ± 0.0039	2.03406
6779	97833 ± 268	1.3702 ± 0.0038	1.54713
7755	97890 ± 366	1.371 ± 0.0051	1.69096
8732	98119 ± 449	1.3742 ± 0.0063	1.42721
9708	98805 ± 715	1.3838 ± 0.01	1.43313

Таблица 3.16 — Результаты интерпретации кривых блеска HD 209458 b для эксцентриситета $e = 0.05$.

Длина волны, Å	Радиус планеты, км	Радиус планеты, R_{jur}	χ^2
3201	97510±1044	1.3657±0.0146	1.12589
3750	97631±624	1.3674±0.0087	1.23187
4300	97631±371	1.3674±0.0052	2.7183
4840	97510±329	1.3657±0.0046	1.2701
5398	97721±347	1.3686±0.0049	1.178
5802	98023±281	1.3729±0.0039	2.14745
6779	97330±273	1.3632±0.0038	1.65029
7755	97480±371	1.3653±0.0052	1.73962
8732	97812±454	1.3699±0.0064	1.45044
9708	98625±720	1.3813±0.0101	1.42542

Таблица 3.17 — Результаты решения обратной задачи для моделей атмосфер экзопланет HD 189733 b и HD 209458 b. e – эксцентриситет, T – равновесная температура атмосферы, σ_0 – площадь сечения рассеяния на длине волны 5750 Å, P – давление на высоте $z = 0$, R_p – радиус планеты, H – характеристическая высота, M – средний молекулярный вес в атомных единицах массы.

Планета	e	T, K°	$R_p, 10^3 \text{ км}$	$\ln(\sigma_0 P \sqrt{R_p}) + \dots$ $\dots + R_p/H$	$M, \text{ а. е. м.}$	$H, \text{ км}$	χ^2
HD 189733 b	0.0	1210	82 ± 0.2	154.34 ± 5.97	1.18 ± 0.02	397.3 ± 16.3	1.86732
HD 189733 b	0.01	1210	82.6 ± 0.2	156.45 ± 6.47	1.2 ± 0.02	396.4 ± 16.4	2.13398
HD 189733 b	0.02	1210	83.8 ± 0.2	165.75 ± 10.6	1.28 ± 0.02	382.5 ± 16.4	2.12762
HD 209458 b	0.0	1450	98.4 ± 0.4	331.07 ± 21.61	4.9 ± 0.05	255.6 ± 37.6	1.03719
HD 209458 b	0.02	1450	97.8 ± 0.4	454.81 ± 18.39	6.4 ± 0.05	193.3 ± 37.9	1.32503
HD 209458 b	0.05	1450	97.4 ± 0.4	901.43 ± 48.08	11.8 ± 0.05	102.2 ± 38	1.71085

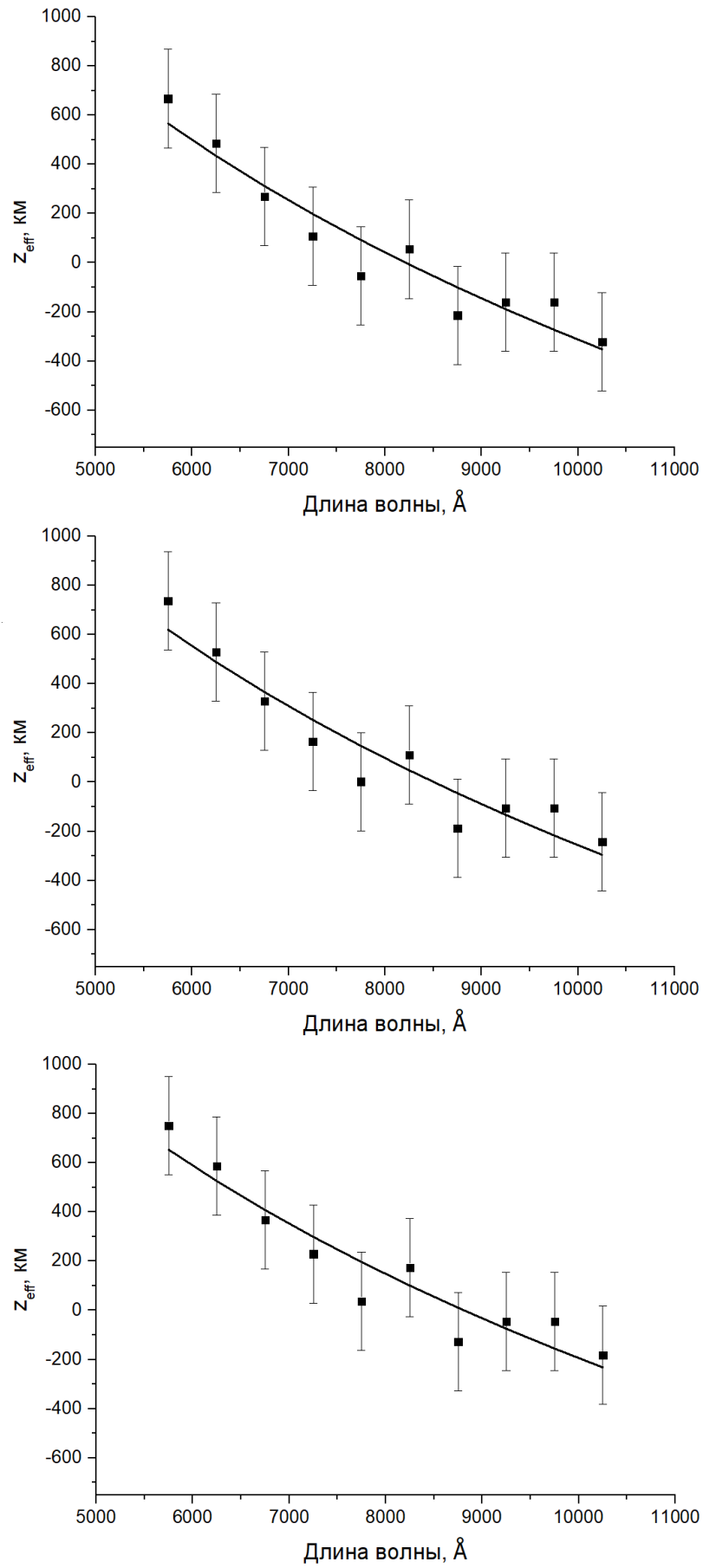


Рисунок 3.10 — Сравнение результатов моделирования атмосферы HD 189733 b (линия) с результатами интерпретации (квадраты) для эксцентриситета $e = 0$ (верхний график), $e = 0.01$ (средний график) и $e = 0.02$ (нижний график) с применением четырёхпараметрического закона потемнения к краю.

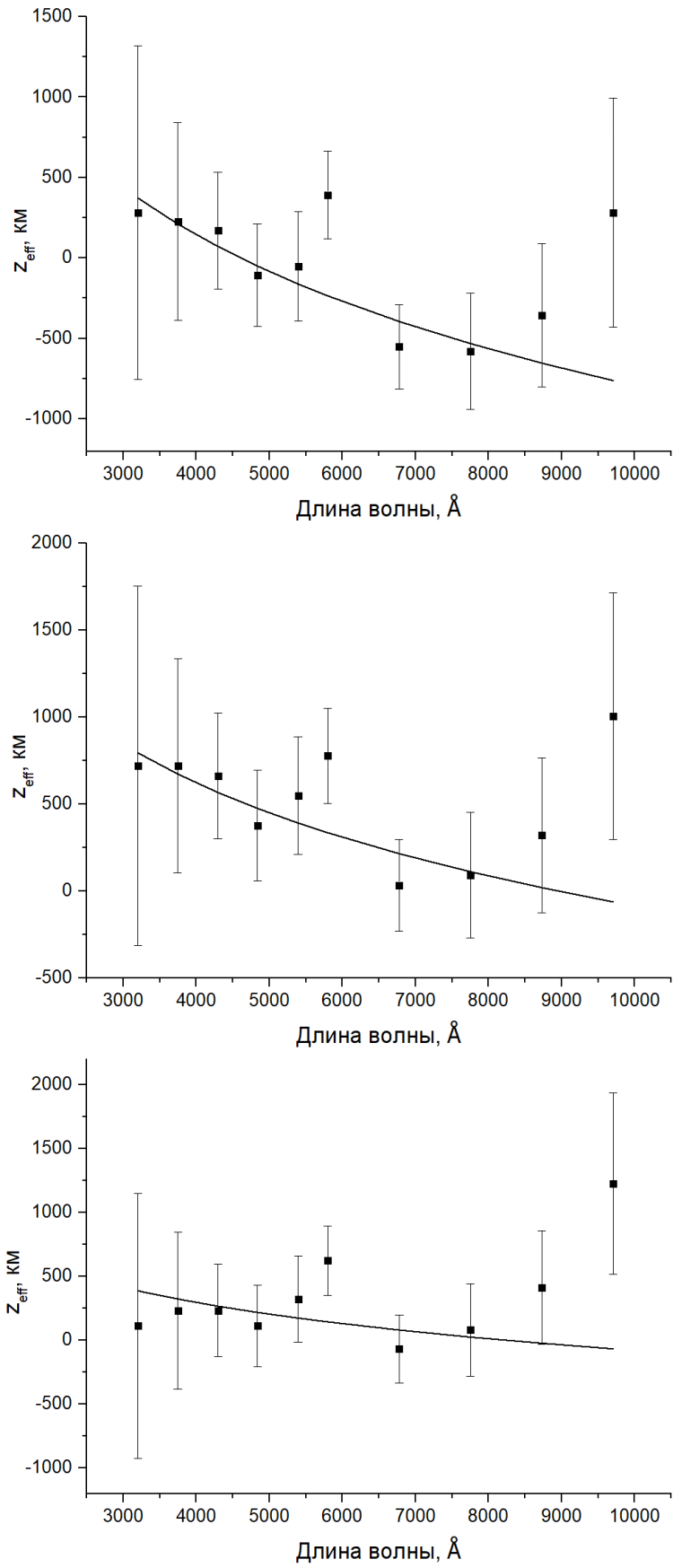


Рисунок 3.11 — Сравнение результатов моделирования атмосферы HD 209458 b (линия) с результатами интерпретации (квадраты) для эксцентриситета $e = 0$ (верхний график), $e = 0.02$ (средний график) и $e = 0.05$ (нижний график) с применением четырёхпараметрического закона потемнения к краю.

3.4 Выводы

В данной работе нам удалось определить то, каким образом заданные априорно параметры модели экзопланетной системы влияют на определяемые по фотометрическим данным характеристики экзопланетной атмосферы. Также определена точность определения радиуса экзопланеты на основе интерпретации экзопланетных кривых.

Показано, что использование таких параметров, как радиус звезды и наклон орбиты, зафиксированных одинаково для всех длин волн, позволяет свести задачу к однопараметрической и тем самым снизить погрешности интерпретации до нескольких сотен километров даже в случае интерпретации наземных наблюдений. Совместно с использованием четырёхпараметрического закона потемнения к краю это позволяет получить более ясную картину изменения радиуса экзопланеты в зависимости от длины волны вызванного рассеянием в планетарной атмосфере. Так, для экзопланеты HD 189733 b удалось получить разницу в радиусе, полученном из интерпретации кривых блеска на $5500 \text{ \AA}$ и $10500 \text{ \AA}$ порядка $1000 \pm 260 \text{ км}$, что почти вдвое превосходит оценки других авторов. При этом изменение параметров радиуса звезды и наклона орбиты приводит к изменению абсолютных значений радиуса планеты, но характер тренда при этом практически не меняется.

Влияние эксцентриситета и расстояния от звезды до планеты в момент транзита в то же время оказывается более сложным. Если для случая экзопланеты HD 189733 b изменение принятого в модели эксцентриситета также приводит к изменению абсолютных значений без существенного влияния на характер тренда, то в случае экзопланеты HD 209458 b наблюдается иная картина. Изменение эксцентриситета существенно изменяет как общий характер тренда определяемый рассеянием рэлеевской атмосферы, так и величину отклонений от него, вызванных рассеянием на фраунгоферовых линиях натрия.

Всё это показывает, что правильный учёт параметров экзопланетной системы критически важен при изучении атмосферы с использованием как спектрометрических, так и фотометрических наблюдательных данных.

Глава 4. Интерпретация наземных многоцветных фотометрических наблюдений

Глава основана на работе 5 из списка публикаций по теме диссертации.

4.1 Выбор планет и проведение наблюдений

Точность наземных фотометрических наблюдений, как правило, на порядок уступает аналогичной точности спутниковых наблюдений. Тем не менее попытки выявить следы атмосферы по наземным данным уже предпринимались, например, в работе (Valyavin et al., 2018).

Результаты интерпретации синтетических кривых блеска, приведённые в главе 3 данной работы, показали, что в условиях решения однопараметрической задачи точность определения радиуса эзопланеты с использования метода наименьших квадратов может быть достаточной для выявления следов планетной атмосферы даже с использованием наземных фотометрических наблюдений. С целью проверки данной возможности нами была составлена программа наземных наблюдений ряда экзопланет с использованием различных фильтров и инструментов.

Для проведения наблюдений был выбран ряд планет, относящихся к классу горячих супер-Юпитеров. Такие планеты имеют наибольшую глубину транзита, и, как следствие, уровень относительной ошибки для них будет минимальным. Небольшой период обращения и высокая частота транзитов позволяет получать несколько кривых блеска в течение относительно небольшого промежутка времени. Также нами была выбрана планета HD 189733 b, для которой нами уже проводилась интерпретация спутниковых данных, с которыми можно было бы сравнить результаты интерпретации наземных кривых блеска.

Также итоговый список планет был скорректирован с учётом загруженности телескопа, и были выбраны те планеты, для которых моменты транзитов совпадали с доступным для нашего использования временем приборов.

Было проведено две серии наблюдений летом-осенью 2022 и 2024 годов. Всего было получено и проинтерпретировано 34 кривых блеска транзитов 10 различных экзопланет, а именно: HD 189733 b, HAT-P-16 b, HAT-P-13 b, HAT-P-32 b, HAT-P-65 b, Qatar-1 b, TOI-2046 b, WASP-12 b, WASP-33 b, Gaia-2 b.

Наблюдения проводились на телескопах RC600 (ПЗС-фотометр Andor) и RC2500 (ИК-камера ASTRONIRCAM (ANC), расположенных на территории Кавказской горной обсерватории (КГО) (Shatsky et al., 2020), а также на телескопе Z60-2 (ПЗС-фотометр FLI 16803) (Комплекс астрономических обсерваторий ГАИШ МГУ URL:obs.sai.msu.ru/cas/z6002), расположенном на территории Крымской астрономической станции ГАИШ (КАС).

Наблюдения в полосе H были выполнены с инфракрасной камерой ASTRONIRCAM (Nadjip et al., 2017), установленной на 2.5-м телескопе КГО. При наблюдениях использовалось автогидирование для удержания неподвижными звезд на кадрах. Для всех данных проводились стандартные процедуры первичной обработки и калибровки: вычитание шума подложки (bias), вычитание темновых токов (dark), учет плоских полей (flat field) (Tatarnikov et al., 2023). После этого в программе AstroImageJ (Collins et al., 2016) для каждой серии была получена кривая блеска, с которой велась дальнейшая работа. Учет трендов, которые могут иметь место вследствие переменности звезды и изменении характеристик атмосферы, проводился при помощи аппроксимации внезатменной части кривых блеска полиномами второй степени.

В таблице 4.1 представлена основная информация о телескопах и инструментах, на которых проводились наблюдения.

Таблица 4.1 — Характеристики наблюдательного оборудования (Berdnikov et al., 2020; Nadjip et al., 2017)

Телескоп	Детектор	Диаметр зеркала	Эквивалентное фокусное расстояние	Поле зрения	Полосы	Система
RC600	Andor	60 см	4.2 м	$22' \times 22'$	$UBVRcIc$ $g'r'i'$ z'	Джонсона-Казинса SDSS Pan-STARRS
RC2500	ANC	250 см	20 м	$4.5' \times 4.5'$	$YJHK$, узкие полосы H_2 , K_{cont} , CO , $Br\gamma$, $[FeII]$, CH_4 (on/off)	МКО-NIR
Z60-2	FLI 16803	60 см	7.5 м	$22' \times 22'$	$UBVRI$ узкие полосы $[OIII]$	Джонсона-Казинса

4.2 Полученные результаты

В данной работе будут представлены результаты интерпретации тех экзопланет, для которых удалось получить хотя бы несколько подходящих для ра-

Таблица 4.2 — Журнал наблюдений

Название	Дата	Фильтр	Количество точек	Количество точек в пределах транзита	Средняя индивидуальная точность
HD 189733 b	09.07.2022	g'	803	602	0.00411
HD 189733 b	09.07.2022	Ic	619	528	0.00985
HD 189733 b	28.08.2024	Bn	458	165	0.00230
HAT-P-16 b	21.10.2022	B	232	192	0.00265
HAT-P-16 b	21.10.2022	Ic	232	188	0.00233
HAT-P-16 b	15.11.2022	B	494	398	0.00318
HAT-P-16 b	09.10.2024	Ic	1616	882	0.00350
HAT-P-16 b	23.10.2024	Ic	1789	879	0.00394
HAT-P-16 b	09.10.2024	B	289	154	0.00353
Qatar-1 b	28.08.2024	Ic	620	221	0.00349
Qatar-1 b	22.10.2024	Rc	1309	432	0.00414
Qatar-1 b	01.11.2024	Rc	436	136	0.00206
Qatar-1 b	29.08.2024	B	460	174	0.00820
Qatar-1 b	29.08.2024	B	102	47	0.00774
Qatar-1 b	05.10.2024	Bn	132	54	0.00216
Qatar-1 b	22.10.2024	B	126	47	0.00512
TOI-2046 b	27.10.2024	Bn	464	204	0.00272
TOI-2046 b	08.11.2024	B	367	158	0.00187
TOI-2046 b	20.11.2024	Bn	529	318	0.00291
TOI-2046 b	17.11.2024	Rc	886	402	0.00384
TOI-2046 b	27.10.2024	Ic	458	198	0.00330
TOI-2046 b	11.11.2024	Ic	707	250	0.00342
TOI-2046 b	08.11.2024	Ic	176	78	0.00301
TOI-2046 b	02.12.2024	Ic	1162	542	0.00296

боты транзитов, а именно HAT-P-16 b (6 кривых блеска), Qatar-1 b (7 кривых блеска), TOI-2046 b (8 кривых блеска), а также 3 кривых блеска экзопланеты HD 189733 b. Основные характеристики наблюдательных данных представлены в таблице 4.2.

При интерпретации кривых блеска HD 189733 b использовались те же самые параметры, что использовались при работе со спутниковыми данными. Радиус звезды и наклон орбиты были зафиксированы равными значениям, определённым для круговой орбиты при интерпретации спутниковых кривых блеска, описанной в предыдущей главе. Также для данной планеты использовался четырёхпараметрический закон потемнения к краю, коэффициенты для каждого фильтра определялись на основе данных работы (Hayek et al., 2012).

Для других экзопланет первоначально решалась задача с тремя свободными параметрами, после чего определялись средневзвешенные значения радиуса звезды и наклона орбиты, которые использовались как фиксированные параметры при интерпретации по одному параметру. Для данных экзопланет использовался квадратичный закон потемнения к краю, коэффициенты которого

Таблица 4.3 — Коэффициенты потемнения к краю.

Название	Фильтр	u_1	u_2
НАТ-P-16 b	Ic	0.2394	0.3024
НАТ-P-16 b	B	0.5774	0.2139
Qatar-1 b	Ic	0.4372	0.1919
Qatar-1 b	Rc	0.5681	0.1527
Qatar-1 b	B	0.9264	-0.0728
TOI-2046 b	Ic	0.2211	0.3033
TOI-2046 b	Rc	0.2904	0.3146
TOI-2046 b	Bn	0.5347	0.2412

были выбраны на основе расчётов Истмана (Eastman et al., 2013); их значения приведены в таблице 4.3.

Кривые блеска с наложенными результатами интерпретации представлены в приложении А.

Полученные в ходе интерпретации радиусы экзопланет представлены в таблице 4.4. И на рисунках 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 .

Также в таблице 4.5 представлены средневзвешенные значения радиусов, полученные для экзопланет НАТ-P-16 b, Qatar-1 b и TOI-2046 b для фильтров В, R и I. Значения статистических весов были приняты нами равными $1/\sigma_{rp}$, то есть обратно пропорциональными значениям погрешности полученного радиуса планеты.

Абсолютные значения радиусов для всех четырёх планет в целом достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными другими исследователями (Buchave et al., 2010; Collins et al. , 2017; Kabath et al., 2022).

В то же время разброс значений радиуса даже для наблюдений, проведённых в одном фильтре оказывается существенно больше, чем точность наблюдений, оценённая в соответствии с методом наименьших квадратов. Это говорит о том, что ряд эффектов, оказывающих влияние на глубину транзита при наземных наблюдениях достаточно трудно учесть даже при наличии в кривых блеска широких участков наблюдений, проведённых вне затмения.

Тем не менее, значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, полученные на основе интерпретации наземных наблюдений, достаточно хорошо согласуются с результатами интерпретации спутниковых кривых блеска, представленными

Таблица 4.4 — Найденные из интерпретации радиусы экзопланет, выраженные в километрах, радиусах Юпитера и радиусах материнской звезды.

Название	Дата	Фильтр	гр, км	гр, R_{jup}	гр/ R_s	χ^2
HD 189733 b	09.07.2022	g'	83614 ± 498	$1,1696 \pm 0.007$	0.15902 ± 0.00095	0.80982
HD 189733 b	09.07.2022	Ic	80496 ± 1422	1.126 ± 0.0199	0.15309 ± 0.00271	0.82982
HD 189733 b	28.08.2024	Bn	83291 ± 309	1.165 ± 0.0043	0.15841 ± 0.00059	0.90541
HAT-P-16 b	21.10.2022	B	95736 ± 724	1.3391 ± 0.0101	0.11128 ± 0.00084	0.90184
HAT-P-16 b	21.10.2022	Ic	93716 ± 711	1.3109 ± 0.0099	0.10893 ± 0.00083	0.80477
HAT-P-16 b	15.11.2022	B	93716 ± 711	1.2057 ± 0.0088	0.10019 ± 0.00073	0.82662
HAT-P-16 b	09.10.2024	Ic	93584 ± 251	1.309 ± 0.0035	0.10878 ± 0.00029	1.38514
HAT-P-16 b	23.10.2024	Ic	86338 ± 268	1.2077 ± 0.0038	0.10035 ± 0.00031	0.92808
HAT-P-16 b	09.10.2024	B	90158 ± 599	1.2611 ± 0.0084	0.10479 ± 0.0007	1.55137
Qatar-1 b	28.08.2024	Ic	80682 ± 404	1.1286 ± 0.0057	0.14501 ± 0.00073	0.90314
Qatar-1 b	22.10.2024	Rc	81371 ± 330	1.1382 ± 0.0046	0.14624 ± 0.00059	1.17515
Qatar-1 b	01.11.2024	Rc	80369 ± 284	1.1242 ± 0.004	0.14444 ± 0.00051	1.10766
Qatar-1 b (SK)	29.08.2024	B	81622 ± 1102	1.1417 ± 0.0154	0.1467 ± 0.00198	1.12108
Qatar-1 b (Z2)	29.08.2024	B	83001 ± 2212	1.161 ± 0.0309	0.14917 ± 0.00398	1.20383
Qatar-1 b	05.10.2024	Bn	81622 ± 543	1.1417 ± 0.0076	0.1467 ± 0.00098	0.96253
Qatar-1 b	22.10.2024	B	89412 ± 1316	1.2507 ± 0.0184	0.1607 ± 0.00237	1.4312
TOI-2046 b	27.10.2024	Bn	96499 ± 365	1.3498 ± 0.0051	0.11758 ± 0.00044	0.98508
TOI-2046 b	08.11.2024	B	96930 ± 281	1.3558 ± 0.0039	0.11811 ± 0.00034	1.31578
TOI-2046 b	20.11.2024	Bn	101023 ± 366	1.4131 ± 0.0051	0.12309 ± 0.00045	0.89487
TOI-2046 b	17.11.2024	Rc	99227.6 ± 372	1.388 ± 0.0052	0.12091 ± 0.00045	0.97383
TOI-2046 b	27.10.2024	Ic	93486 ± 445	1.3076 ± 0.0062	0.11391 ± 0.00054	1.14334
TOI-2046 b	11.11.2024	Ic	96787 ± 371	1.3538 ± 0.0052	0.11793 ± 0.00045	1.03396
TOI-2046 b	08.11.2024	Ic	101454 ± 654	1.4191 ± 0.0091	0.12362 ± 0.0008	2.08919
TOI-2046 b	02.12.2024	Ic	98725 ± 251	1.3809 ± 0.0035	0.12029 ± 0.00031	1.04797

Таблица 4.5 — Средневзвешенные значения радиусов для разных фильтров и среднеквадратичные отклонения.

	B	R	I
HAT-P-16 b	90463 ± 2697		90643 ± 2531
Qatar-1 b	83275 ± 1745	80834 ± 500	80683
TOI-2046 b	98038 ± 1396	99228	97499 ± 1466

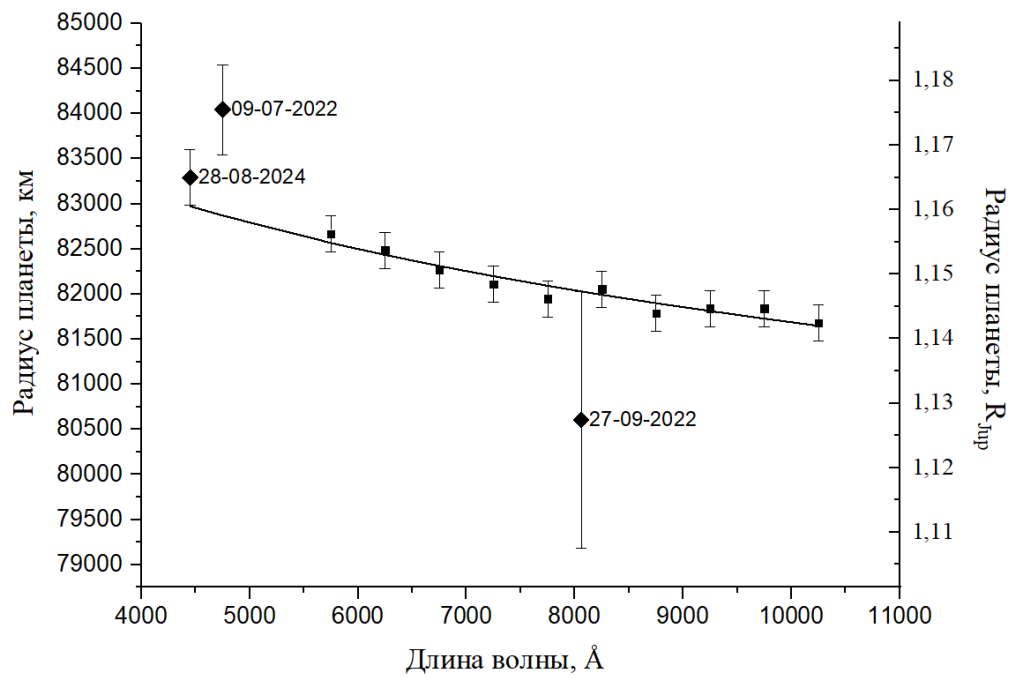


Рисунок 4.1 — Сравнение радиусов HD 189773 b, полученных из интерпретации наземных кривых блеска, с результатами интерпретации космических наблюдений, а также изотермической моделью атмосферы (линия). Ромбиками обозначены наземные наблюдения, квадратиками — спутниковые. Рядом с точками, соответствующими наземным наблюдениям, указаны даты наблюдений.

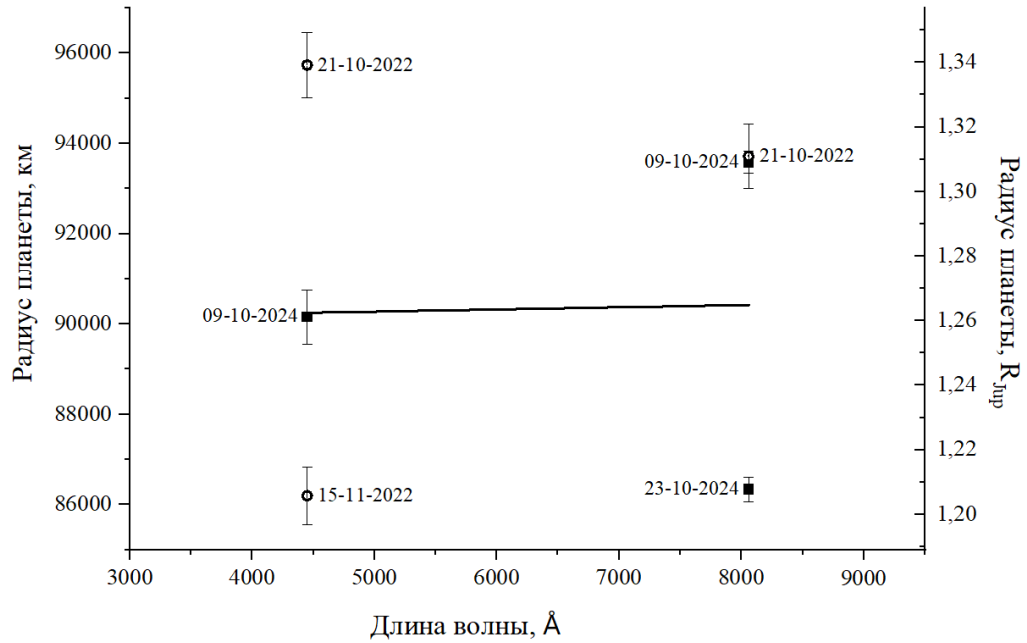


Рисунок 4.2 — Результаты интерпретации наземных кривых блеска НАТ-Р-16 b. Рядом с точками указаны даты наблюдений. Линия тренда проведена на основе метода наименьших квадратов (линейная аппроксимация).

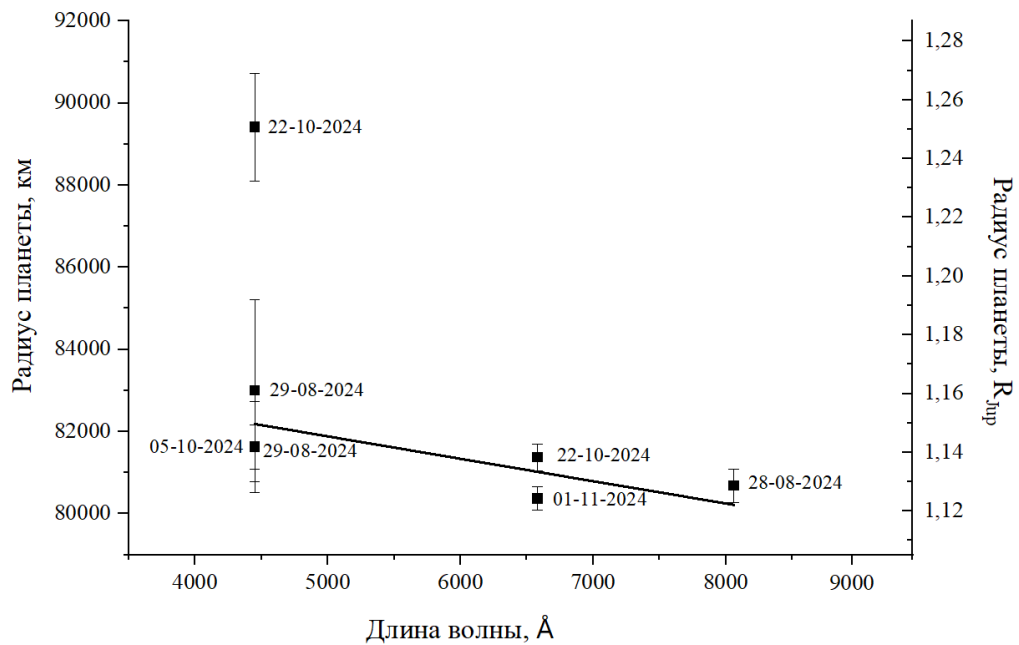


Рисунок 4.3 — Результаты интерпретации наземных кривых блеска Qatar-1 b. Рядом с точками указаны даты наблюдений. Линия тренда проведена на основе метода наименьших квадратов (линейная аппроксимация).

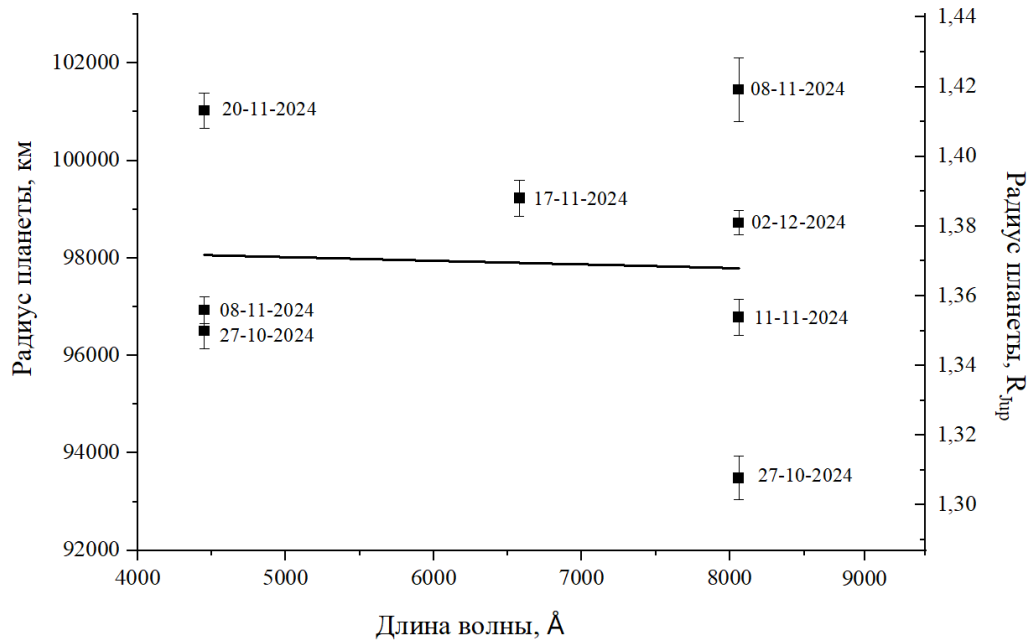


Рисунок 4.4 — Результаты интерпретации наземных кривых блеска TOI-2046 b. Рядом с точками указаны даты наблюдений. Линия тренда проведена на основе метода наименьших квадратов (линейная аппроксимация).

в предыдущей главе и с результатами моделирования изотермической атмосферы.

Также для экзопланет Qatar-1 b и TOI-2046 b удалось выявить расхождение в радиусе планеты между синими и красными фильтрами в 2500 и 500 км соответственно. Хотя данные значения по порядку величины в целом согласуются с результатами, которые могут соответствовать влиянию атмосферы, величина среднеквадратичного отклонения для радиуса экзопланет оказывается слишком велика, чтобы делать однозначные выводы, и для более уверенного утверждения о природе данного расхождения требуется аккумулирование большего количества наблюдательных данных.

4.3 Выводы

В ходе нашей работы нам удалось установить, что, хотя наземные фотометрические наблюдательные данные обладают существенно меньшей точностью, нежели спутниковые, использование достаточно больших выборок транзитов, фиксация ключевых параметров одинаковыми для разных длин волн и

сочетание наземных и высокоточных спутниковых кривых всё же позволяют в ряде случаев обнаружить следы рэлеевской атмосферы у экзопланеты.

Так, из четырёх рассмотренных в данной главе экзопланет удалось выявить тренд снижения радиуса планеты по мере увеличения длины волны (характерный для планет с рэлеевской атмосферой) у двух из них: HD 189733 b и Qatar-1 b, причём результаты для HD 189733 b на качественном уровне оказались хорошо согласованными с результатами интерпретации спутниковых кривых той же планеты и с экспоненциальной моделью атмосферы, построенной на их основе. Для TOI-2046 b удалось выявить уменьшение средневзвешенных значений радиуса в фильтрах с большей длиной волны, но из-за большого разброса значений эта разница оказалась в пределах среднеквадратичных отклонений для каждого фильтра. Для HAT-P-16 b на основе полученных нами наблюдательных кривых тренда на уменьшение радиуса с ростом длины волны выявить на данный момент не удалось.

Таким образом, несмотря на то что выявление следов атмосферы на основе наземных фотометрических наблюдений является сложной задачей, в ряде случаев она оказывается разрешимой при усреднении большого числа транзитов и сведения задачи определения радиуса планеты к однопараметрической.

Заключение

В данной работе было показано, что тонкие эффекты, такие как эксцентриситет орбиты и атмосфера экзопланеты могут оказывать существенное влияние на параметры, которые определяются при помощи интерпретации наблюдательных данных экзопланетных транзитов. Это, во-первых, может иметь большое значение для задачи по уточнению значений таких характеристик, как потемнение к краю звезды, наклон её орбиты и радиус планеты. Во-вторых, это позволяет получить больше информации о явлениях, которые являются источниками данных тонких эффектов.

В частности, было рассмотрено влияние формы и ориентации экзопланетной орбиты, определяемых параметрами эксцентриситета и аргумента перицентра, на результаты интерпретации транзитных кривых блеска. Так, на основе результатов интерпретации синтетических кривых блеска и кривых блеска экзопланеты Kepler-7 b было определено, что значение функционала χ^2 оказывается чувствительным к сочетанию параметров e и ω , однако, наблюдается вырождение, соответствующее значениям, определяющим одинаковое расстояние от звезды до планеты в момент транзита. Таким образом, на основе интерпретации фотометрических наблюдений оказывается возможным с использованием метода наименьших квадратов определить сочетание параметров эксцентриситета и аргумента перицентра, но не каждый из них в отдельности (для этого требуются дополнительные спектральные наблюдения).

Другим важным результатом оказалось то, что параметры закона потемнения к краю, определяемые эмпирически из наблюдений, зависят от эксцентриситета и аргумента перицентра орбиты. Так, даже небольшое значение эксцентриситета орбиты может оказывать серьёзное влияние на определяемые эмпирически коэффициенты закона потемнения к краю. Отклонение априорного значения эксцентриситета всего на несколько сотых способно кардинально изменить картину распределения яркости по диску звезды и привести к изменению полученных из интерпретации коэффициентов потемнения к краю в разы. Например, было показано на основе интерпретации спутниковых кривых блеска экзопланеты HD 209458 b, что увеличение эксцентриситета от $e = 0$ до $e = 0.05$ при аргументе перицентра $\omega = 270^\circ$ (что соответствует уменьшению прицельного расстояния на 5%) способно увеличить значение полученного из

интерпретации коэффициента потемнения к краю на 0.2—0.25 для некоторых длин волн.

Другим рассмотренным тонким эффектом являлось наличие атмосферы экзопланеты. Из-за разницы в рассеянии света на разных длинах волн атмосфера планеты может оказывать влияние на значение её радиуса. Для планет-гигантов этот эффект оказывается достаточно заметен, чтобы быть обнаруженным при сопоставлении результатов интерпретации транзитов одной и той же планеты, проведённых в различных фильтрах. Важным моментом здесь является необходимость использования для различных длин волн одинаковых величин наклона орбиты и радиуса звезды, а также ряда других параметров с целью свести задачу определения радиуса экзопланеты к однопараметрической. При интерпретации высокоточных спутниковых наблюдений в таком случае величина среднеквадратичной ошибки может быть снижена до 100–200 км. Так для экзопланеты HD 189733 b различие между радиусами планеты в диапазоне 5500 – 10500 Å составило более 1000 км, что в 5–6 раз превосходит значение стандартного отклонения и превышает 1% от радиуса планеты. В приближении экспоненциальной изотермической атмосферы это даёт значение характеристической высоты $H = 383\text{—}397$ км, что почти вдвое превышает результаты, полученные другими исследователями. Данная величина характеристической высоты достигается при значении среднего молекулярного веса частиц атмосферы равного $M = 1.18\text{—}1.28$ атомных единиц массы, что соответствует атмосфере, состоящей преимущественно из атомарного водорода.

В то же время для экзопланеты HD 209458 b полученные зависимости радиуса планеты от длины волны оказались различными для разных значений эксцентриситета, принятых при проведении интерпретации, что может говорить о важности учёта формы и ориентации экзопланетной орбиты при изучении таких свойств экзопланеты, как строение её атмосферы. Также было определено, что зависимость радиуса экзопланеты HD 209458 b от длины волны отличается от ожидаемой в соответствии с моделью рэлеевской атмосферы. В частности для наблюдений на длинах волн, на которых присутствуют фраунгоферовы линии натрия (5895.92 Å и 5889.95 Å) наблюдалось увеличение радиуса планеты на 440—600 км относительно ожидаемого в рамках тренда, что соответствует эквивалентной ширине линий натрия в 0.13—0.18 Å.

Ситуация с наблюдениями, проводимыми с наземных телескопов, оказывается более противоречивой, однако и здесь при аккумулировании результатов наблюдений многих транзитов возможно выявление зависимости радиуса планеты от длины волны. Так, значения радиуса, полученные из интерпретации трёх наземных кривых блеска HD 189733 b, полученных при наблюдениях в КГО оказались достаточно хорошо согласованными с результатами интерпретации спутниковых кривых блеска и определённой на их основе изотермической моделью атмосферы. Также удалось выявить различие в радиусе при наблюдении в фильтрах I и V для экзопланет Qatar-1 b и TOI-2046 b в 2500 и 500 км соответственно, что в случае TOI-2046 b примерно равно среднеквадратичному отклонению, а в случае Qatar-1 b значительно его превосходит, что даёт повод предположить наличие у этих планет рэлеевской атмосферы. Единственной из четырёх планет для которой не удалось выявить тренд на понижение радиуса с ростом длины волны осталась экзопланета HAT-P-16 b. Несмотря на противоречивые результаты, нами было показано, что при усреднении результатов нескольких наблюдений в пределах каждого фильтра, изменение радиуса с длиной волны вызванное наличием у экзопланеты рэлеевской атмосферы может быть выявлено и с использованием наземных наблюдений.

Благодарности

Автор благодарит своего научного руководителя академика РАН Черепашука Анатолия Михайловича за наставления и ценные советы. Научных сотрудников ГАИШ Абубекерова Марата Керимовича и Гостева Николая Юрьевича за помощь и рекомендации в ходе научной работы. Постнова Константина Александровича за ценные обсуждения. Лызенко Кристину Артемовну за поддержку и помощь со сбором и обработкой наблюдательных данных. Белинского Александра Александровича, Татарникова Андрея Михайловича и Масленникову Наталью Андреевну за предоставленный наблюдательный материал.

Список литературы

- Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю., Черепашук А. М. Анализ кривых блеска затменных систем с экзопланетами. Система HD 209458 // *Астрономический журнал*. – 2010. – Т. 87. – №. 12. – С. 1199-1220.
- Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю., Черепашук А. М. Анализ кривых блеска затменных систем с экзопланетами. Система HD 189733 // *Астрономический журнал*. – 2011. – Т. 88. – №. 12. – С. 1139-1163.
- Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю. Транзиенты экзопланет: возможные изменения коэффициентов потемнения к краю затмеваемых звезд на коротких временных интервалах // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97. – №. 7. – С. 531-537.
- Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю. Влияние неточности нормировки транзитных кривых блеска на результаты интерпретации // *Астрономический журнал*. – 2021. – Т. 98. – №. 11. – С. 922-928.
- Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю. Влияние пятен на поверхности звезды на определение параметров двойной системы с экзопланетой // *Астрономический журнал*. – 2022. – Т. 99. – №. 11. – С. 883-889.
- Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю. Исследование влияния ошибки коэффициентов потемнения к краю на геометрические параметры двойной системы с экзопланетой // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – №. 6. – С. 481-487.
- 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.
- Бисикало Д. В. и др. Типы газовых оболочек экзопланет, относящихся к классу "горячих юпитеров" // *Астрономический журнал*. – 2013. – Т. 90. – №. 10. – С. 779-779.
- Бисикало Д. В., Шематович В. И., Кайгородов П. В., Жилкин А. Г. Газовые оболочки экзопланет-горячих юпитеров. // Российская академия наук, Институт астрономии. Наука. Москва. - 2020.

Валявин Г. Г. и др. Экзопланетные исследования. Фотометрический анализ трансмиссионных спектров избранных экзопланет // Астрофизический бюллетень. – 2018. – Т. 73. – №. 2. – С. 234-244. eLIBRARY ID: 35120834

Комплекс астрономических обсерваторий ГАИШ МГУ
<https://obs.sai.msu.ru/cas/z6002>

Мушаилов Б. Р., Теплицкая В. С. О надежности определения орбитальных параметров экзопланет доплеровским методом // Космические исследования. – 2012. – Т. 50. – №. 6. – С. 452-452. eLIBRARY ID: 18040418

Сахибулин Н. А. Экзопланеты. Издательство Казанского университета. 2020.

Черепашук А. М. Тесные двойные звезды. Физматлит. Москва. – 2013.

Alp D., Demory B. O. Refraction in exoplanet atmospheres-photometric signatures, implications for transmission spectroscopy, and search in kepler data // Astronomy and Astrophysics. – 2018. – Т. 609. – С. A90. arXiv:1711.03458 [astro-ph.EP]

Addison B. et al. Minerva-Australis. I. Design, commissioning, and first photometric results // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2019. – Т. 131. – №. 1005. – С. 115003. arXiv:1901.11231 [astro-ph.IM]

Collins K. A. et al. AstroImageJ: image processing and photometric extraction for ultra-precise astronomical light curves // The Astronomical Journal. – 2017. – Т. 153. – №. 2. – С. 77. arXiv:1601.02622 [astro-ph.IM]

Agol E., Fabrycky D. C. Transit-timing and duration variations for the discovery and characterization of exoplanets // Handbook of exoplanets. – Springer, Cham, 2018. – С. 797-816. DOI: 10.1007/978-3-319-30648-3_7 – 1

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]

Bailes M., Lyne A. G., Shemar S. L. A planet orbiting the neutron star PSR1829–10 // Nature. – 1991. – Т. 352. – №. 6333. – С. 311-313.

- Barclay T., Pepper J., Quintana E. V. A revised exoplanet yield from the transiting exoplanet survey satellite (TESS) // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2018. – T. 239. – №. 1. – C. 2. arXiv:1804.05050 [astro-ph.EP]
- Barman T. Identification of absorption features in an extrasolar planet atmosphere // The Astrophysical Journal. – 2007. – T. 661. – №. 2. – C. L191. arXiv:0704.1114 [astro-ph]
- Benz W. et al. Planet population synthesis // arXiv preprint arXiv:1402.7086. – 2014.
- Berdnikov L. N. et al. BVI c Observations and Search for Evolutionary Variations in the Cepheid V811 Oph Period // Astronomy Reports. – 2020. – T. 64. – №. 4. – C. 310-318.
- Bisikalo D., Kaygorodov P. V., Shematovich V. I. Exoplanets: Atmospheres of Hot Jupiters 2019. C. 103.
- Bonomo A. S. et al. The GAPS programme with HARPS-N at TNG-XIV. Investigating giant planet migration history via improved eccentricity and mass determination for 231 transiting planets // Astronomy & Astrophysics. – 2017. – T. 602. – C. A107. arXiv:1704.00373 [astro-ph.EP]
- Buchhave L. A. et al. HAT-P-16b: A 4 MJ planet transiting a bright star on an eccentric orbit // The Astrophysical Journal. – 2010. – T. 720. – №. 2. – C. 1118. arXiv:1005.2009 [astro-ph.EP]
- Campbell B., Walker G. A. H., Yang S. A search for substellar companions to solar-type stars // Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 331, Aug. 15, 1988, p. 902-921. Research supported by the National Research Council of Canada, Canada Employment and Immigration Commission, and NSERC. – 1988. – T. 331. – C. 902-921. DOI: 10.1086/166608
- Charbonneau D. et al. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star // The Astrophysical Journal. – 1999. – T. 529. – №. 1. – C. L45. arXiv:astro-ph/9911436

- A Guide to Hubble Space Telescope Objects: Their Selection, Location, and Significance, by Chen, James L.; Chen, Adam, 2015. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-18871-3, e-ISBN: 978-3-319-18872-0.
- Claret A. A new non-linear limb-darkening law for LTE stellar atmosphere models III-Sloan filters: Calculations for $-5.0 \leq \log [M/H] \leq +1$, 2000 K $\leq T \leq$ 50 000 K at several surface gravities // *Astronomy & Astrophysics*. – 2004. – T. 428. – №. 3. – C. 1001-1005. DOI: 10.1051/0004-6361:20041673
- Claret A. Does the HD 209458 planetary system pose a challenge to the stellar atmosphere models? // *Astronomy & Astrophysics*. – 2009. – T. 506. – №. 3. – C. 1335-1340. DOI: 10.1051/0004-6361/200912423
- Claret A., Bloemen S. Gravity and limb-darkening coefficients for the Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK, and Sloan photometric systems // *Astronomy & Astrophysics*. – 2011. – T. 529. – C. A75.
- Collins K. A., Kielkopf J. F., Stassun K. G. Transit timing variation measurements of WASP-12b and Qatar-1b: No evidence of additional planets // *The Astronomical Journal*. – 2017. – T. 153. – №. 2. – C. 78. DOI: 10.1051/0004-6361/201116451
- The CoRoT Legacy Book: the adventure of the ultra high precision photometry from space, by the CoRoT Team - Coordination Annie Baglin. ISBN: 978-2-7598-1876-1. Online at http://open.edpsciences.net/index.php?option=com_contentview=articleid=317. *EDP Sciences*, 2016.
- Cunha K., Spite M., Barbuy B. (ed.). Chemical Abundances in the Universe (Iau S265): Connecting First Stars to Planets. – Cambridge University Press, 2010. – №. 265.
- Danby, J. M. A., Burkardt, T. M. The Solution of Kepler's Equation - Part One. *Celestial mechanics*. - 1983. - T. 31. - №. 2. - C. 95-107. DOI: 10.1007/BF01686811
- Demory B. O. et al. The high albedo of the hot Jupiter Kepler-7 b // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2011. – T. 735. – №. 1. – C. L12. arXiv:1105.5143 [astro-ph.EP]

- Eastman J., Gaudi B. S., Agol E. EXOFAST: a fast exoplanetary fitting suite in IDL // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2013. – T. 125. – №. 923. – C. 83. arXiv:1206.5798 [astro-ph.IM]
- Eker Z. et al. Interrelated main-sequence mass–luminosity, mass–radius, and mass–effective temperature relations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – T. 479. – №. 4. – C. 5491-5511. arXiv:1807.02568 [astro-ph.SR]
- Esteves L. J., De Mooij E. J. W., Jayawardhana R. Changing phases of alien worlds: Probing atmospheres of Kepler planets with high-precision photometry // The Astrophysical Journal. – 2015. – T. 804. – №. 2. – C. 150. arXiv:1407.2245 [astro-ph.EP]
- Espinoza N. et al. Discovery and Validation of a High-Density sub-Neptune from the K2 Mission // The Astrophysical Journal. – 2016. – T. 830. – №. 1. – C. 43. arXiv:1601.07608 [astro-ph.EP]
- Espinoza N. EXO-NAILER: EXOplanet traNsits and rAdial veLocity fittER // Astrophysics Source Code Library. – 2018. – C. ascl: 1806.029.
- Des Etangs A. L. et al. Rayleigh scattering in the transit spectrum of HD 189733b // Astronomy & Astrophysics. – 2008. – T. 481. – №. 2. – C. L83-L86. arXiv:0802.3228 [astro-ph]
- Fortney J. J. The effect of condensates on the characterization of transiting planet atmospheres with transmission spectroscopy // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2005. – T. 364. – №. 2. – C. 649-653. arXiv:astro-ph/0509292
- Fortney J. J. et al. Transmission spectra of three-dimensional hot Jupiter model atmospheres // the Astrophysical Journal. – 2010. – T. 709. – №. 2. – C. 1396. arXiv:0912.2350 [astro-ph.EP]
- Giacobbe P. et al. Five carbon-and nitrogen-bearing species in a hot giant planet's atmosphere // Nature. – 2021. – T. 592. – №. 7853. – C. 205-208. arXiv:2104.03352 [astro-ph.EP]
- Gould A., Loeb A. Discovering planetary systems through gravitational microlenses // Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 396, no. 1, Sept. 1, 1992,

p. 104-114. Research supported by WM Keck Foundation. – 1992. – T. 396. – C. 104-114. DOI: 10.1086/171700

Grupp F. MAFAGS-OS: New opacity sampling model atmospheres for A, F and G stars-I. the model and the solar flux // *Astronomy Astrophysics*. – 2004. – T. 420. – №. 1. – C. 289-305. DOI: 10.1051/0004-6361:20040971

Hayek W. et al. Limb darkening laws for two exoplanet host stars derived from 3D stellar model atmospheres-Comparison with 1D models and HST light curve observations // *Astronomy Astrophysics*. – 2012. – T. 539. – C. A102. arXiv:1202.0548 [astro-ph.SR]

Henry G. W. et al. A transiting “51 Peg-like” planet // *The Astrophysical Journal*. – 1999. – T. 529. – №. 1. – C. L41. DOI: 10.1086/312458

Holczer T. et al. Transit timing observations from Kepler. IX. Catalog of the full long-cadence data set // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2016. – T. 225. – №. 1. – C. 9. arXiv:1606.01744 [astro-ph.EP]

Howell S. B. *The NASA Kepler Mission*, Edited by Steve B. Howell. IOP Publishing, 2020 DOI:10.1080/00107514.2021.1924278

Jacob W. S. On certain anomalies presented by the binary star 70 Ophiuchi. – 1855. DOI: 10.1093/mnras/15.9.228

Kabáth P. et al. TOI-2046b, TOI-1181b, and TOI-1516b, three new hot Jupiters from TESS: planets orbiting a young star, a subgiant, and a normal star // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2022. – T. 513. – №. 4. – C. 5955-5972. arXiv:2205.01860 [astro-ph.EP]

Knutson H. A. et al. Using stellar limb-darkening to refine the properties of HD 209458b // *The Astrophysical Journal*. – 2007. – T. 655. – №. 1. – C. 564.

Kramer M. *Pulsar Timing as an Exoplanet Discovery Method*, *Handbook of Exoplanets*, ISBN 978-3-319-55332-0. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018, id.5 DOI: 10.1007/978-3-319-55333-7₅

- Kurtz M. J., Accomazzi A., Henneken E. A. Merging the Astrophysics and Planetary Science Information Systems // arXiv preprint arXiv:1803.03598. – 2018.
- Latham D. W. et al. the unseen companion of HD114762: a probable brown dwarf // Nature. – 1989. – T. 339. – №. 6219. – C. 38-40. DOI: 10.1038/339038a0
- Latham D. W. et al. Kepler-7b: a transiting planet with unusually low density // the Astrophysical Journal Letters. – 2010. – T. 713. – №. 2. – C. L140. arXiv:1001.0190 [astro-ph.EP]
- Madhusudhan N. et al. New Constraints on DMS and DMDS in the Atmosphere of K2-18 b from JWST MIRI // The Astrophysical Journal Letters. – 2025. – T. 983. – №. 2. – C. L40. arXiv:2504.12267 [astro-ph.EP]
- Mayor M., Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star, 1995 // Nature. – T. 378. – C. 355. DOI: 10.1038/378355a0
- Mallen-Ornelas G. et al. The EXPLORE project: a deep search for transiting extrasolar planets // Discoveries and Research Prospects from 6-to 10-Meter-Class Telescopes II. – SPIE, 2003. – T. 4834. – C. 150-160. arXiv:astro-ph/0203218
- Mandel K., Agol E. Analytic light curves for planetary transit searches // The Astrophysical Journal. – 2002. – T. 580. – №. 2. – C. L171. DOI:10.1086/345520
- McArthur B. E. et al. Detection of a Neptune-mass planet in the ρ 1 Cancri system using the Hobby-Eberly Telescope // The Astrophysical Journal. – 2004. – T. 614. – №. 1. – C. L81. DOI:10.1086/425561
- Miralda-Escudé J. Orbital perturbations of transiting planets: a possible method to measure stellar quadrupoles and to detect Earth-mass planets // The Astrophysical Journal. – 2002. – T. 564. – №. 2. – C. 1019. DOI:10.1086/324279
- Montmerle T. et al. Detection and characterization of extrasolar planets through Doppler spectroscopy // European Astronomical Society Publications Series. – 2010. – T. 41. – C. 27-75. arXiv:0904.0415 [astro-ph.EP]

- Moutou C. et al. Comparative blind test of five planetary transit detection algorithms on realistic synthetic light curves // *Astronomy Astrophysics*. – 2005. – T. 437. – №. 1. – C. 355-368. DOI:10.1051/0004-6361:20042334
- Murray C. D., Correia A. C. M. Keplerian orbits and dynamics of exoplanets // *Exoplanets*. – 2010. – T. 1. – C. 15-23. arXiv:1009.1738 [astro-ph.EP]
- Nadjip A. E. et al. ASTRONIRCAM—the infrared camera-spectrograph for the 2.5-m telescope of SAI Caucasian observatory // *Astrophysical Bulletin*. – 2017. – T. 72. – №. 3. – C. 349-362. DOI 10.1134/S1990341317030245
- NASA Exoplanet Archive. exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.
- Neilson H. R. Comparison of limb-darkening laws from plane-parallel and spherically-symmetric model stellar atmospheres // *Proceedings of the International Astronomical Union*. – 2011. – T. 7. – №. S282. – C. 243-246. arXiv:1109.4559 [astro-ph.SR]
- Paredes L. A. et al. The solar neighborhood XLVIII: nine giant planets orbiting nearby K dwarfs, and the CHIRON spectrograph’s radial velocity performance // *The Astronomical Journal*. – 2021. – T. 162. – №. 5. – C. 176. arXiv:2111.15028 [astro-ph.EP]
- Pearson K. A., Turner J.D., Sagan T.G. 2013. Photometric observation of HAT-P-16b in the near-UV. *New Astronomy*, **27**, 102. arXiv:1310.5397 [astro-ph.EP]
- Poddaný S., Brát L., Pejcha O. Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits // *New Astronomy*. – 2010. – T. 15. – №. 3. – C. 297-301. arXiv:0909.2548 [astro-ph.EP]
- Pont F. et al. Hubble Space Telescope time-series photometry of the planetary transit of HD 189733: no moon, no rings, starspots // *Astronomy Astrophysics*. – 2007. – T. 476. – №. 3. – C. 1347-1355. arXiv:0707.1940 [astro-ph]
- Pont F. et al. Detection of atmospheric haze on an extrasolar planet: the 0.55–1.05 μm transmission spectrum of HD 189733b with the Hubble Space Telescope // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2008. – T. 385. – №. 1. – C. 109-118. arXiv:0712.1374 [astro-ph]

- Rosenthal L. J. et al. The California Legacy Survey. I. A catalog of 178 planets from precision radial velocity monitoring of 719 nearby stars over three decades // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2021. – T. 255. – №. 1. – C. 8. arXiv:2105.11583 [astro-ph.EP]
- "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.
- Ricker G. R. et al. Transiting exoplanet survey satellite // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. – 2015. – T. 1. – №. 1. – C. 014003-014003.
- Rigby J. et al. The science performance of JWST as characterized in commissioning // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2023. – T. 135. – №. 1046. – C. 048001. arXiv:2207.05632 [astro-ph.IM]
- Saba A. et al. A Population Analysis of 20 Exoplanets Observed from the Optical to the Near-infrared Wavelengths with HST: Evidence for Widespread Stellar Contamination // arXiv preprint arXiv:2404.15505. – 2024.
- Schneider, J. In: Second Eddington Workshop: Stellar structure and habitable planet finding, 9 - 11 April 2003, Palermo, Italy. Edited by F. Favata, S. Aigrain and A. Wilson. ESA SP-538, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-848-4, 2004, p. 407 - 410
- Schneider A. D., Carone L., Decin L., Jørgensen U. G., Mollière P., Baeyens R., Kiefer S., Helling C., Exploring the deep atmospheres of HD 209458b and WASP-43b using a non-gray general circulation model // Astronomy & Astrophysics. – 2022. – T. 664. – C. A56.
- Seager S., Mallen-Ornelas G. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve // The Astrophysical Journal. – 2003. – T. 585. – №. 2. – C. 1038.
- 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. – T. 16. – C. 17-23. DOI: 10.1086/102368

Seiff A. et al. Thermal structure of Jupiter's atmosphere near the edge of a 5- μ m hot spot in the north equatorial belt // Journal of Geophysical Research: Planets. – 1998. – T. 103. – №. E10. – C. 22857-22889. DOI: 10.1029/98JE01766

Shatsky N. et al. Caucasian mountain observatory of sternberg astronomical institute: six years of operation // arXiv preprint arXiv:2010.10850. – 2020.

Shematovich V. I., Marov M. Y. Escape of planetary atmospheres: Physical processes and numerical models // Physics-Uspekhi. – 2018. – T. 61. – №. 3. – C. 217.

Sing D. K. et al. A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion // Nature. – 2016. – T. 529. – №. 7584. – C. 59-62. arXiv:1512.04341 [astro-ph.EP]

Sing D. K. Observational techniques with transiting exoplanetary atmospheres // Astrophysics of Exoplanetary Atmospheres: 2nd Advanced School on Exoplanetary Science. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – C. 3-48. arXiv:1804.07357 [astro-ph.EP]

Southworth J. Homogeneous studies of transiting extrasolar planets–I. Light-curve analyses // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. – T. 386. – №. 3. – C. 1644-1666. arXiv:0802.3764 [astro-ph]

Southworth J. Homogeneous studies of transiting extrasolar planets–III. Additional planets and stellar models // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010. – T. 408. – №. 3. – C. 1689-1713. arXiv:1006.4443 [astro-ph.EP]

Southworth J. JKTEBOP: Analyzing light curves of detached eclipsing binaries // Astrophysics Source Code Library. – 2012. – C. ascl: 1207.013.

Southworth, J. The solar-type eclipsing binary system LL Aquarii.// Astronomy & Astrophysics, Volume 557, id.A119, 8 pp. (2013) arXiv:1308.1320 [astro-ph.SR]

- Tatarnikov A. M. et al. Photometric Operation Mode of the ASTRONIRCAM Camera // Astrophysical Bulletin. – 2023. – T. 78. – №. 3. – C. 384-394. DOI 10.1134/S1990341323600163
- The Extrasolar Planets Encyclopaedia. <https://exoplanet.eu/catalog>
- Thorsett S. E., Arzoumanian Z., Taylor J. H. PSR B1620-26-A binary radio pulsar with a planetary companion? // Astrophysical Journal, Part 2-Letters (ISSN 0004-637X), vol. 412, no. 1, p. L33-L36. – 1993. – T. 412. – C. L33-L36. arXiv:astro-ph/9903227
- Torres G. et al. Validation of 12 small Kepler transiting planets in the habitable zone // The Astrophysical Journal. – 2015. – T. 800. – №. 2. – C. 99. arXiv:1501.01101 [astro-ph.EP]
- Van Eylen V., Albrecht S. Eccentricity from transit photometry: small planets in Kepler multi-planet systems have low eccentricities // The Astrophysical Journal. – 2015. – T. 808. – №. 2. – C. 126. arXiv:1505.02814 [astro-ph.EP]
- Winn J. N. Transits and occultations // arXiv preprint arXiv:1001.2010. – 2010.
- Wolszczan A., Frail D. A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12 // Nature. – 1992. – T. 355. – №. 6356. – C. 145-147. DOI 10.1038/355145a0
- Yilmaz M. et al. A Jupiter-mass planet around the K0 giant HD 208897 // Astronomy & Astrophysics. – 2017. – T. 608. – C. A14.
- Zahn J. P. Tidal friction in close binary stars // Astronomy and Astrophysics, vol. 57, no. 3, May 1977, p. 383-394. – 1977. – T. 57. – C. 383-394.

Приложение А. Кривые блеска экзопланетных транзитов
полученные в ходе наблюдений в КГО и на Крымской
астрономической станции ГАИШ

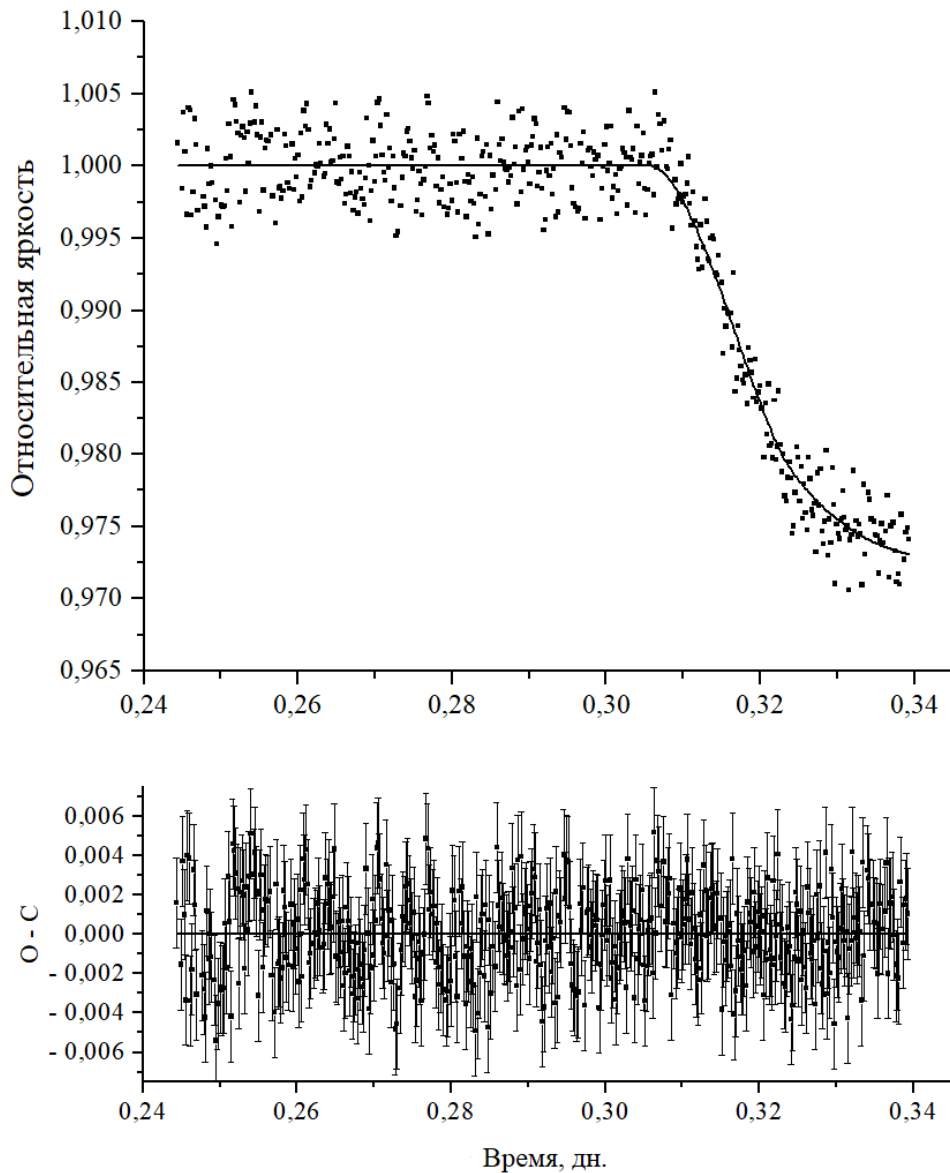


Рисунок А.1 — Кривая блеска и результаты интерпретации экзопланеты HD 189733 b в фильтре Вп. В нижней части графика представлена разность наблюдаемой и полученной в ходе интерпретации кривых.

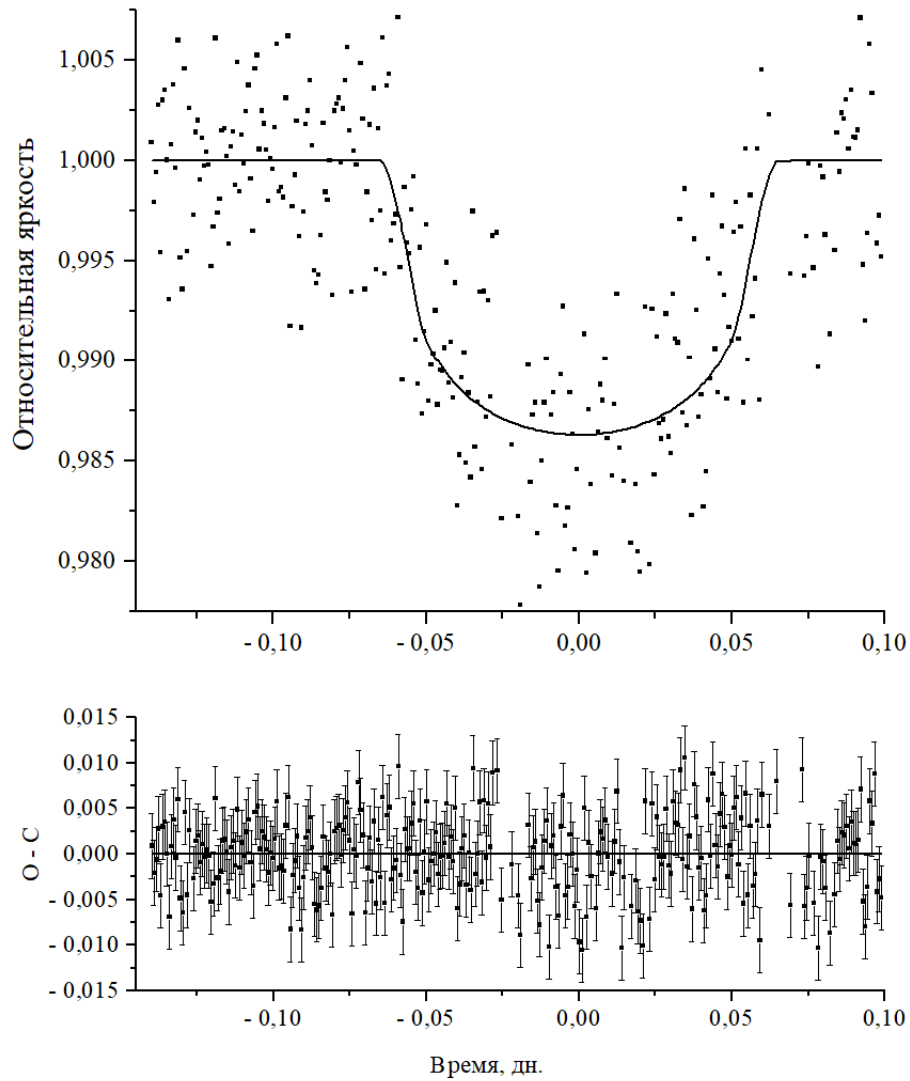


Рисунок А.2 — Кривая блеска и результаты интерпретации экзопланеты НАТ-Р-16 b в фильтре Вп. В нижней части графика представлена разность наблюдаемой и полученной в ходе интерпретации кривых.

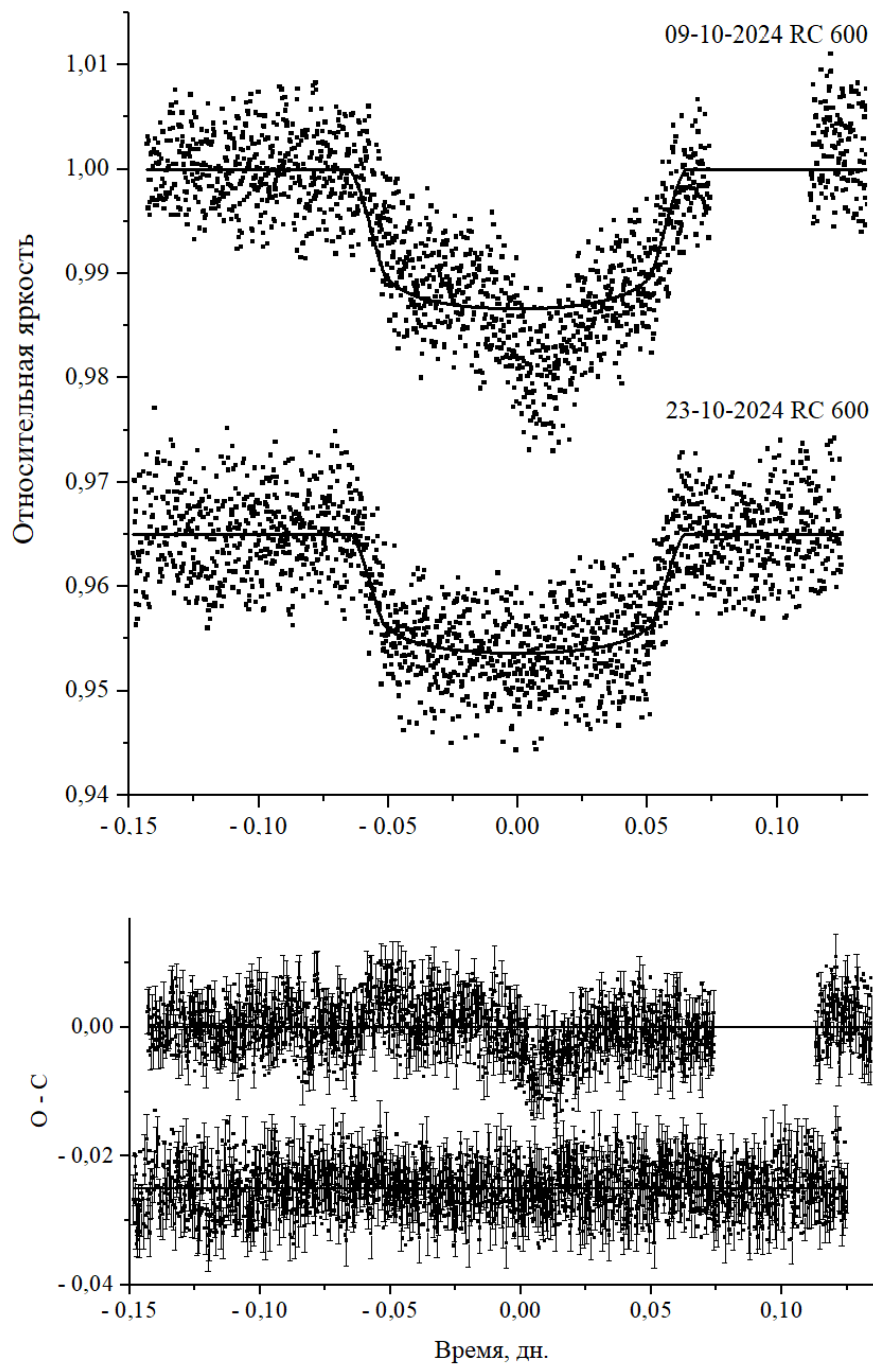


Рисунок А.3 — Кривые блеска и результаты интерпретации экзопланеты НАТ-Р-16 b в фильтре I_c . В нижней части графика представлена разность наблюдаемых и полученных в ходе интерпретации кривых. Подписи рядом с кривыми указывают на даты наблюдений и инструмент, на котором они проводились.

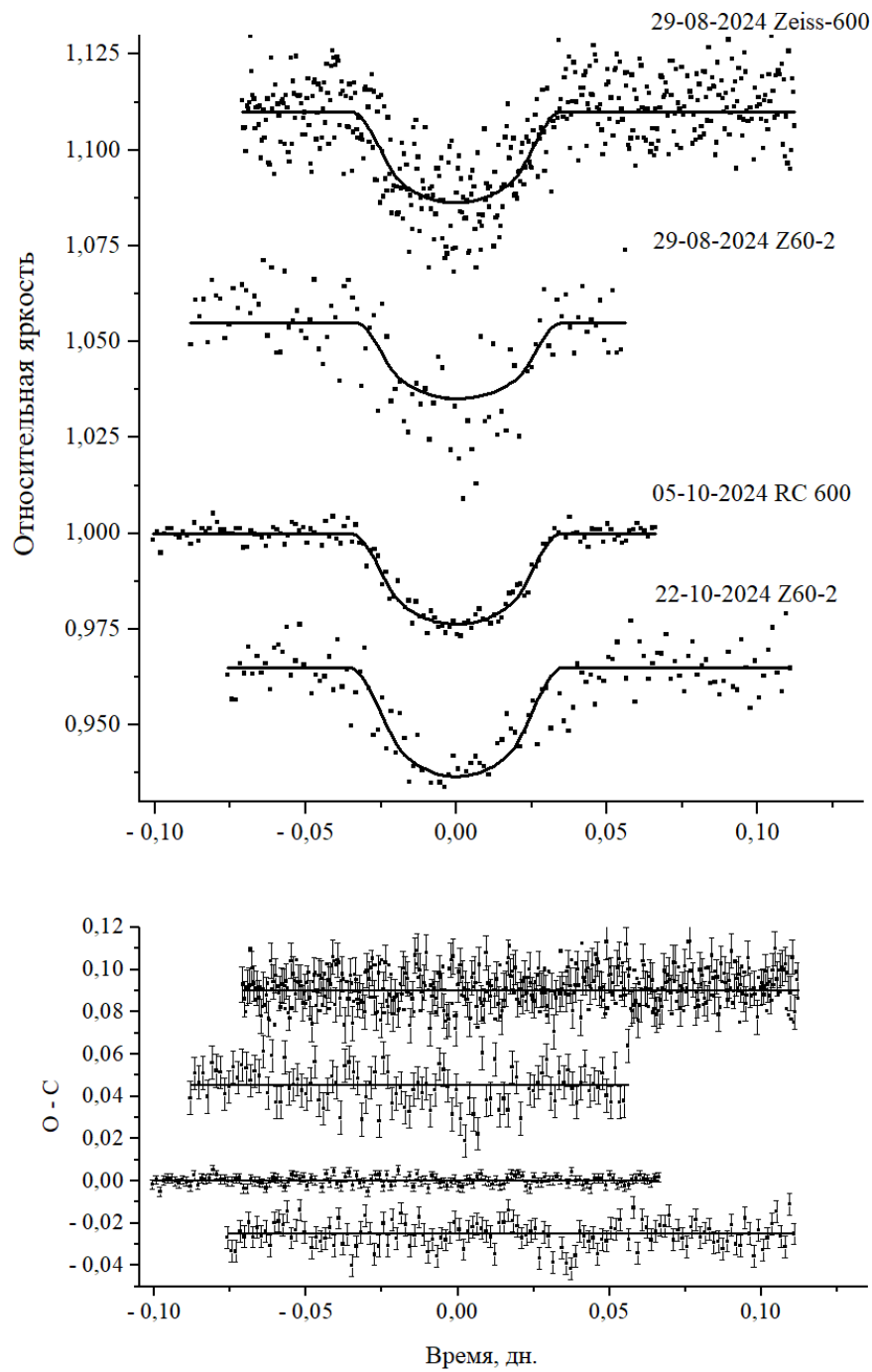


Рисунок А.4 — Кривые блеска и результаты интерпретации экзопланеты Qatar-1 b в фильтре Вп. В нижней части графика представлена разность наблюдаемых и полученных в ходе интерпретации кривых. Подписи рядом с кривыми указывают на даты наблюдений и инструмент, на котором они проводились.

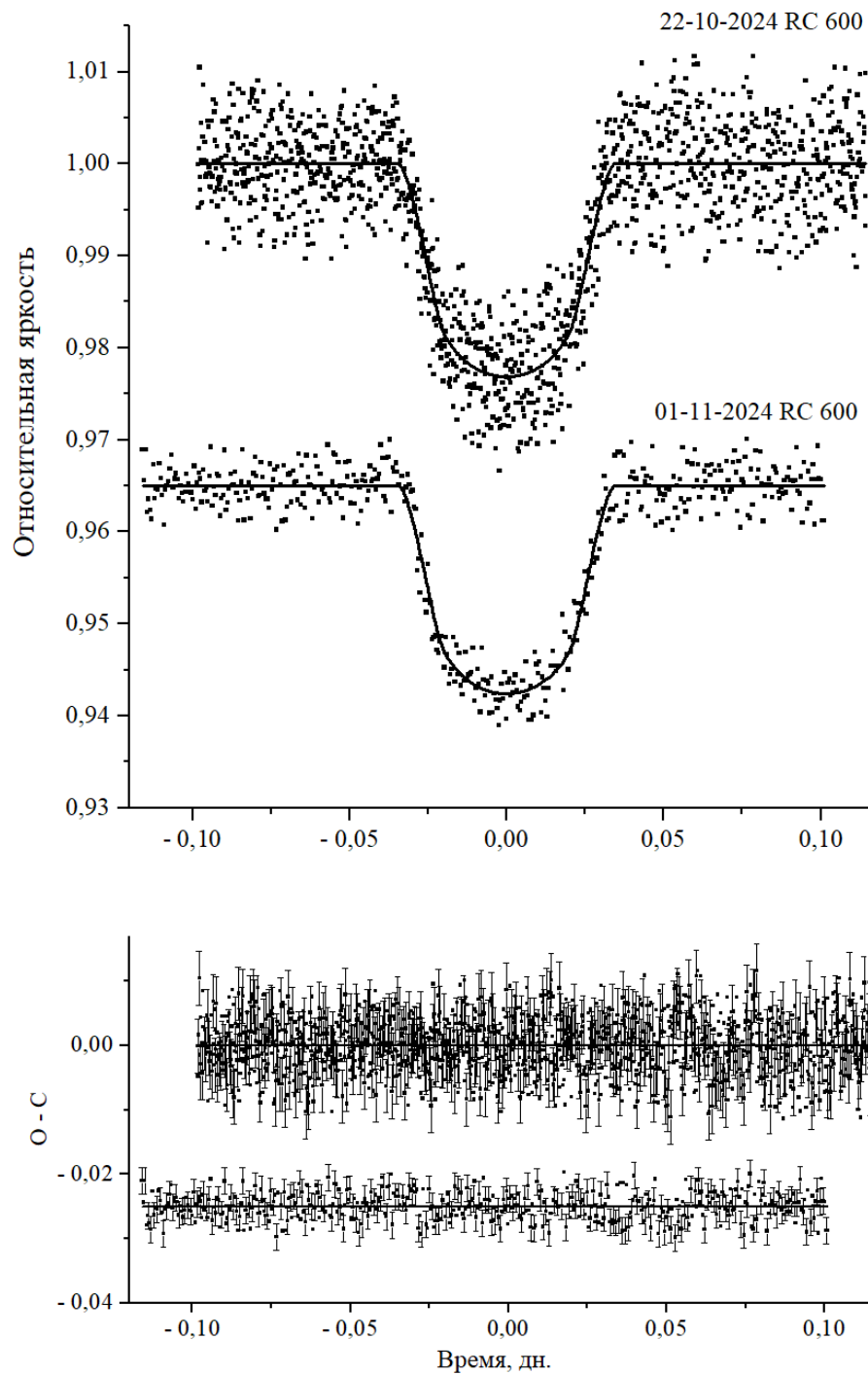


Рисунок А.5 — Кривые блеска и результаты интерпретации экзопланеты Qatar-1 b в фильтре Rc. В нижней части графика представлена разность наблюдаемых и полученных в ходе интерпретации кривых. Подписи рядом с кривыми указывают на даты наблюдений и инструмент, на котором они проводились.

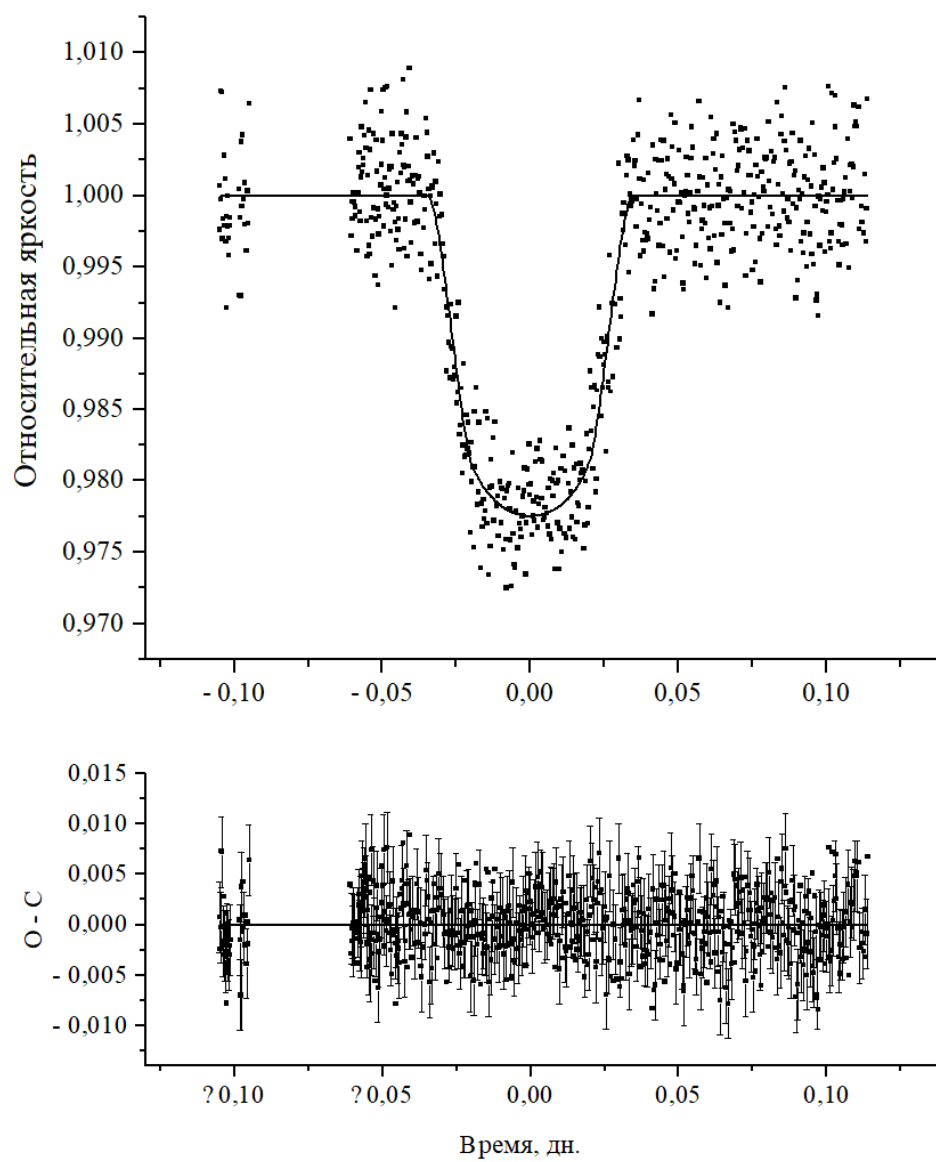


Рисунок А.6 — Кривая блеска и результаты интерпретации экзопланеты Qatar-1 b в фильтре Ic. В нижней части графика представлена разность наблюдаемой и полученной в ходе интерпретации кривых.

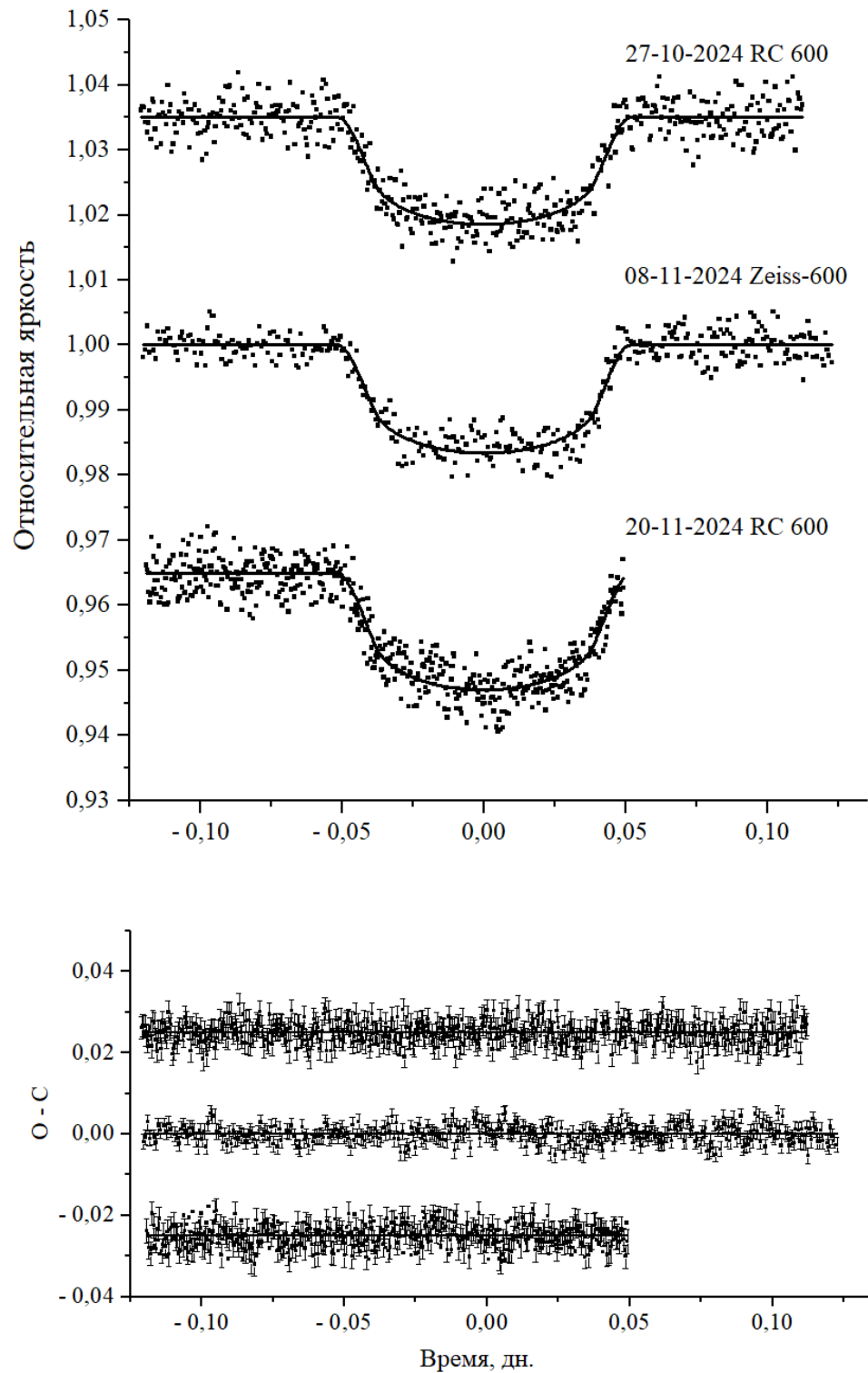


Рисунок А.7 — Кривые блеска и результаты интерпретации экзопланеты TOI-2046 b в фильтре Вп. В нижней части графика представлена разность наблюдаемых и полученных в ходе интерпретации кривых. Подписи рядом с кривыми указывают на даты наблюдений и инструмент, на котором они проводились.

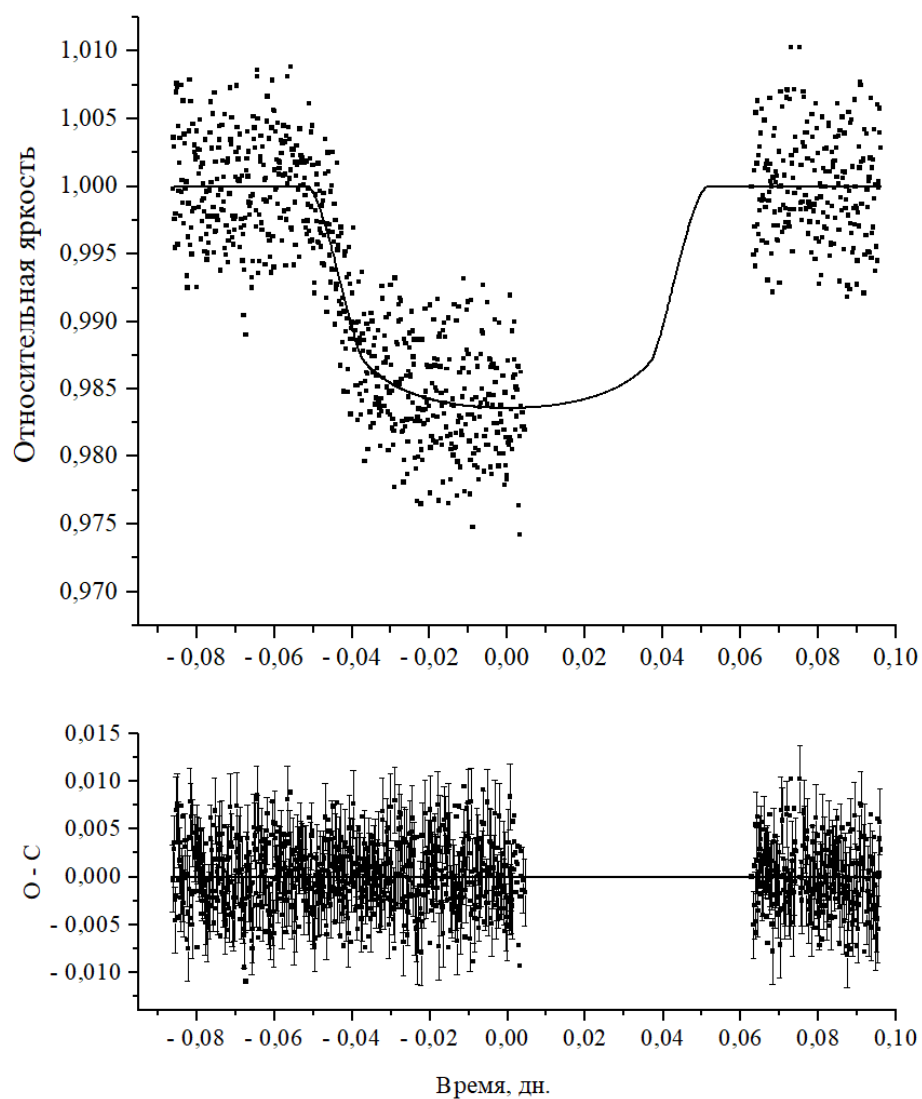


Рисунок А.8 — Кривая блеска и результаты интерпретации экзопланеты TOI-2046 b в фильтре Rc. В нижней части графика представлена разность наблюдаемой и полученной в ходе интерпретации кривых.

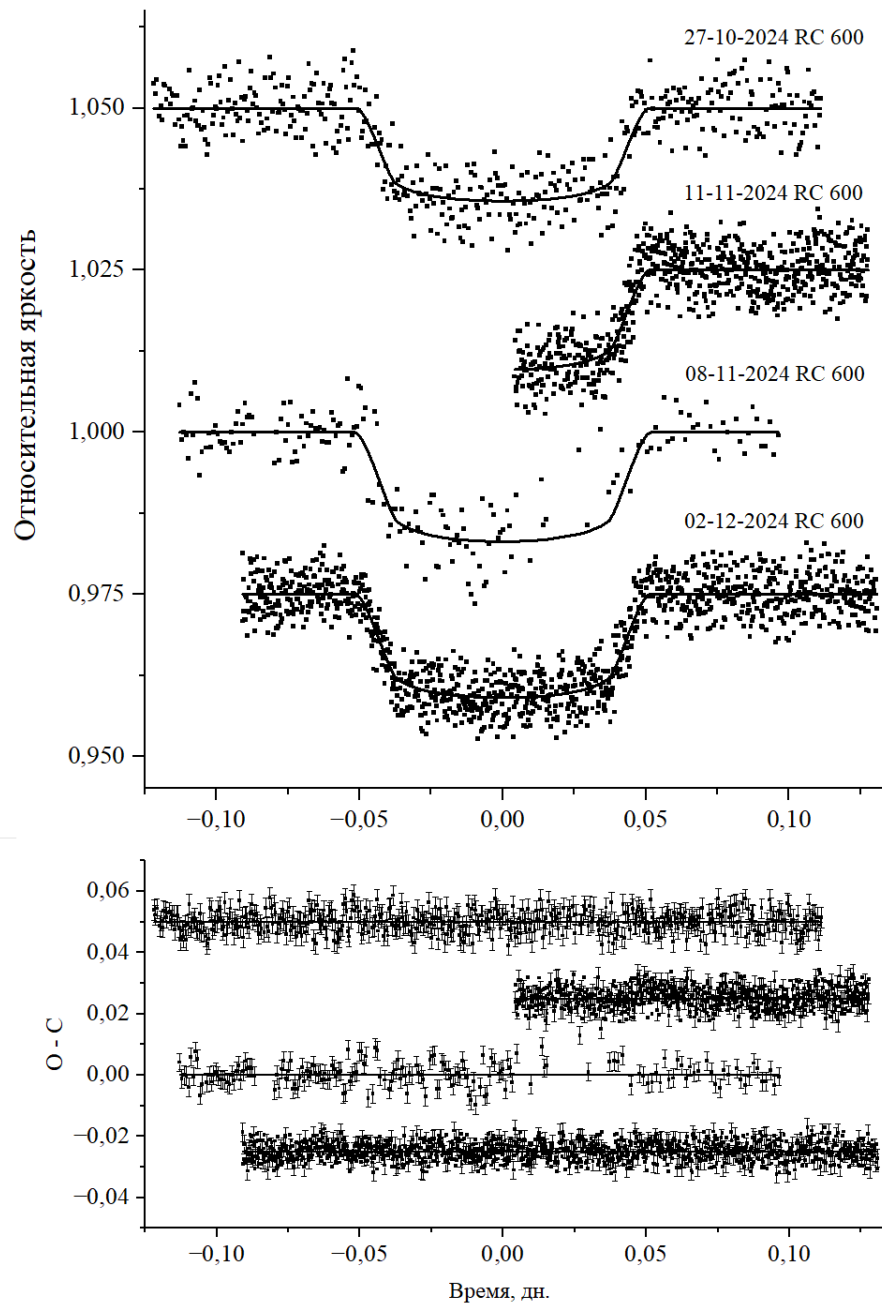


Рисунок А.9 — Кривые блеска и результаты интерпретации экзопланеты TOI-2046 b в фильтре Ic. В нижней части графика представлена разность наблюдаемых и полученных в ходе интерпретации кривых. Подписи рядом с кривыми указывают на даты наблюдений и инструмент, на котором они проводились.