

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

**Актуальность темы исследования**

Исследование, представленное в диссертации, посвящено изучению влияния тонких эффектов — эксцентричности орбит и планетарных атмосфер — на интерпретацию транзитных кривых блеска экзопланет. Актуальность темы не вызывает сомнений, поскольку транзитный метод является одним из наиболее продуктивных способов обнаружения и изучения экзопланет. Однако точность определения параметров экзопланетных систем может быть существенно ограничена из-за отсутствия учёта ряда тонких эффектов, таких как отклонение орбит от круговой формы и наличие протяжённых атмосфер. Диссертационная работа Е.В. Бекесова направлена на решение этой проблемы, что соответствует современным тенденциям в астрофизике и исследованиях экзопланет.

**Научная новизна диссертационной работы Бекесова Е.В. является комплексной и проявляется на методологическом, алгоритмическом и содержательном уровнях:**

1. Разработана и реализована принципиально новая схема интерпретации многоцветных фотометрических данных, основанная на фиксации орбитальных и звездных параметров (наклонения орбиты, радиуса звезды) для всех длин волн. Это позволило свести задачу определения радиуса планеты к однопараметрической, что кардинально повысило точность выявления зависимости радиуса от длины волны и минимизировало корреляции между пара-

метрами. Впервые систематически исследовано влияние малых эксцентриситетов ( $e < 0.05$ ) на определяемые из транзитной фотометрии параметры. Показано, что пренебрежение этим фактором является одной из ключевых причин систематических расхождений между эмпирическими и теоретическими коэффициентами потемнения к краю, что разрешает известную проблему в данных по системе HD 209458.

2. Создано оригинальное программное обеспечение на C++, которое не является простым аналогом существующих решений. Код интегрирует: (а) численное решение уравнения Кеплера для эллиптических орбит; (б) алгоритм численного интегрирования потока с учетом различных законов потемнения к краю (линейного, квадратичного, четырехпараметрического); (в) специализированную процедуру минимизации методом наименьших квадратов, устойчивую к наличию локальных минимумов. Предложен и апробирован новый подход к верификации моделей атмосфер, основанный на решении обратной задачи для определения характеристик атмосферы (радиус ядра, коэффициент непрозрачности, шкала высоты) путем минимизации невязки между наблюдаемой и модельной зависимостью радиуса от длины волны.

3. Количественно оценено влияние эксцентриситета на параметры потемнения к краю и установлено, что для системы HD 209458 увеличение эксцентриситета с 0 до 0.05 приводит к росту определяемого линейного коэффициента потемнения на 0.2–0.25 для различных длин волн. Это дает простое и эффективное объяснение для устранения противоречий между наблюдениями и теорией. Получена уточненная зависимость радиуса от длины волны для HD 189733b и обнаружено, что уменьшение радиуса в диапазоне 550–1050 нм составляет  $990 \pm 260$  км ( $\approx 1.2\%$  радиуса планеты), что приблизительно вдвое превышает предыдущие оценки ( $\approx 427$  км). Это указывает на более протяженную или более рассеивающую атмосферу, чем считалось ранее. Впервые на основе исключительно фотометрических (не спектральных) данных КТ HST обнаружены и количественно оценены линии натрия в атмосфере HD 209458b. Показано, что на длинах волн, соответствующих дублету на-

трия, радиус планеты превышает значения общего тренда на 440–600 км, что соответствует эквивалентной ширине линий 0.13–0.18 Å, что хорошо согласуется с независимыми спектроскопическими измерениями. Впервые для экзопланет Qatar-1b и TOI-2046b выявлены статистически значимые различия в радиусе при наблюдениях в синих и красных фильтрах (2500 км и 500 км соответственно) на основе наземных многокрасочных наблюдений. Эти результаты указывают на потенциальное наличие рэлеевского рассеяния в их атмосферах и демонстрируют эффективность разработанной методики для работы с данными ограниченной точности.

Таким образом, научная новизна работы не сводится к отдельным частным результатам, а заключается в создании целостного, верифицированного подхода к учету тонких эффектов при интерпретации транзитов, что позволяет получать более точные и достоверные данные о фундаментальных свойствах экзопланет и их атмосфер.

### **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Все 6 положений, выносимых на защиту, имеют высокую или достаточную степень обоснованности. Они подкреплены комплексом доказательств: от теоретических выкладок и численного моделирования до обработки реальных данных космических и наземных наблюдений.

### **Практическая значимость**

Результаты работы имеют практическую ценность для астрономического сообщества. Разработанная программа может быть использована для обработки транзитных кривых блеска, что повысит точность определяемых параметров экзопланетных систем. Методика учёта эксцентриситета и атмосферных эффектов позволяет улучшить интерпретацию данных космических миссий (Kepler, TESS, JWST). Полученные данные о зависимости радиуса от длины волны могут служить основой для предварительного анализа атмосфер экзопланет, включая планеты земного типа.

## **Выводы**

Диссертационная работа Бекесова Е.В. представляет собой завершённое научное исследование, вносящее значительный вклад в область изучения экзопланет. Автор демонстрирует глубокое понимание предмета, умение работать с большими массивами данных и разрабатывать специализированное программное обеспечение. Результаты работы имеют важное значение для повышения точности интерпретации транзитных кривых блеска и могут быть использованы в последующих исследованиях экзопланетных систем.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

## **Замечания и рекомендации**

Несмотря на высокий уровень работы, можно выделить следующие замечания:

Замечание 1. Хотя автор заявляет, что программа основана на стандартных алгоритмах, в работе отсутствует систематическое сравнение результатов, полученных с помощью авторского кода, с результатами признанных публичных программных пакетов (таких как Jktebor, EXOFAST, batman). Верификация на нескольких синтетических и реальных наборах данных повысила бы доверие к результатам.

Замечание 2. При интерпретации наземных данных, где разброс значений радиуса велик, учет погрешностей, по-видимому, ограничивается формальной ошибкой метода наименьших квадратов. Не в полной мере учтены систематические ошибки, связанные с (а) нормировкой кривых блеска; (б) влиянием переменности земной атмосферы; (в) возможной нестабильностью профиля потемнения к краю из-за звездной активности. Для будущих наземных наблюдений предусмотреть одновременные наблюдения в нескольких полосах для минимизации влияния атмосферной дисперсии.

Замечание 3. Основные содержательные выводы о влиянии атмосферы и эксцентриситета сделаны на основе анализа всего двух систем: HD 189733b и HD 209458b. Хотя эти системы являются эталонными, перенос выводов на всю популяцию горячих юпитеров требует осторожности. В дальнейших ис-

следованиях рекомендуется применить разработанные методики к более широкой выборке планет (например, из архивных данных Kepler/K2 или TESS), чтобы проверить универсальность выявленных закономерностей.

Замечание 4. Для интерпретации зависимости радиуса от длины волны используется изотермическая рэлеевская модель атмосферы. Эта модель является заведомым упрощением, так как реальные атмосферы горячих юпитеров имеют сложную термическую структуру, могут содержать аэрозоли, облака и проявлять отклонения от рэлеевского рассеяния. В интерпретации результатов (особенно для HD 209458b, где тренд отличается от рэлеевского) обсудить, какие факторы (наличие облачного слоя, отклонение от изотермичности, вклад от других поглотителей) могли бы объяснить наблюдаемые расхождения. Рекомендовать в качестве направления дальнейшей работы применение более сложных, а именно, аeronомических моделей атмосферы.

##### 5. Замечания по тексту диссертационной работы.

- стр. 25. "Задача решалась как чисто кинематическая, её динамическая составляющая не учитывалась, что является оправданным для подавляющего большинства систем." Привести аргументы в оправданность такого приближения.

- стр. 28, формула (1.5). Не описана в тексте переменная R. Аналогично для формул (1.6)-(1.8) также необходимо описать переменные в тексте.

- стр. 33. Несколько фразы "... позволит либо повысить надёжность определения и  $\omega$  из кривых лучевых скоростей, либо..."

- стр. 45. Рисунки 2.4 - 2.7 следовало бы объединить, чтобы читателю было легче провести сравнение.

- стр. 48. "Так же в таблице 2.8 представлены наиболее оптимальные значения для каждого значения аргумента перицентра". Есть менее оптимальные значения?

- стр. 68. " 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.". Наверное должно быть  $n(h) = n_0 \exp(-h/H)$ ?

## 6. Технические замечания:

Встречаются орфографические, пунктуационные и технические ошибки. Например:

- стр. 25 - "При интерпретации кривых блеска количество точек и соответствующее каждой точке значения времени принимались равными таковым в интерпретируемой кривой."
- стр. 34 - "...распределённого по Гаусу шума..."
- стр. 41- "Для модельной кривой с заданный эксцентриситетом  $e = 0.1.$ " и

" ... $8500^{\circ}\text{A}^{\circ}\text{As}$  итоговой экспозицией..."

- стр. 94 - "Так, из четырёх рассмотренных в данной главе экзопланет удалось выявить тренд снижение радиуса планеты по мере увеличения длины волны..."

Указанные замечания носят в основном рекомендательный и конструктивный характер и не умаляют значимости полученных результатов и общего высокого уровня диссертации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степе-

ни доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

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

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук, заведующий отделом исследования Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

**ШЕМАТОВИЧ Валерий Иванович**

**03.12.2025**

Контактные данные:

тел.: +7-495-951-07-30, e-mail: shematov@inasan.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы:

119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48,  
ИНАСАН, отдел исследований Солнечной системы  
Тел.: +7-495-951-54-61; e-mail: admin@inasan.ru

Подпись сотрудника ИНАСАН В. И. Шематовича удостоверяю:

Заместитель директора ИНАСАН  
по научной работе

С.Г. Сичевский