

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 189733 В НА ОСНОВЕ МНОГОЦВЕТНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ТРАНЗИТА

© 2024 г. Е. В. Бекесов^{1,*}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: egor03121996@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята в печать 04.06.2024 г.

В работе проведен анализ и интерпретация кривых блеска, полученных при наблюдении телескопом HST транзита экзопланеты HD 189733 b по диску звезды. Наблюдения проводились в широком диапазоне длин волн 5500–10500 Å, что позволило выявить зависимость между длиной волны и получаемым в ходе интерпретации радиусом планеты. Также было показано, что данная зависимость может быть объяснена наличием у планеты рэлеевской атмосферы, а также проведена примерная оценка возможных параметров данной атмосферы.

Ключевые слова: кривые блеска транзита, двойные системы с экзопланетами, эксцентриситет, коэффициенты затемнения к краю, радиус планеты, радиус звезды, атмосфера экзопланеты, HD 189733 b

DOI: 10.31857/S0004629924080032 **EDN:** ITKXJU

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных способов изучения внесолнечных планет является транзитный метод. Его суть заключается в наблюдении звезды в момент прохождения по ее диску экзопланеты, когда видимый блеск звезды падает из-за того, что часть ее диска оказывается закрытой диском планеты. Это позволяет получить важную информацию о размерах планеты, а также о характеристике ее орбиты, не прибегая к сложным спектрометрическим наблюдениям.

Также одним из важных преимуществ транзитного метода изучения экзопланет является возможность получения эмпирической информации о размерах, структуре и составе их атмосфер. Так как при прохождении внесолнечной планеты по диску материнской звезды часть лучей проходит сквозь атмосферу планеты, ее состав и характеристики не могут не оказывать влияния на фотометрическую и спектроскопическую картину, получаемую при наблюдениях транзитной системы.

Хотя для получения точной картины требуются спектрометрические наблюдения, определенную информацию о планетарных атмосферах можно получить также из анализа фотометрических кривых блеска. При рэлеевском поглощении с увеличением

длины волны уменьшается коэффициент поглощения и, соответственно, большее количество излучения проходит сквозь атмосферу и доходит до наблюдателя в красной части спектра. Поэтому радиус экзопланеты, найденный из анализа затмения в красной части спектра, будет меньше, нежели в синей. Рефракция в атмосфере планеты незначительно влияет на данную зависимость, так как ее вклад для большинства планет исчисляется миллионными долями звездной величины [1]. Таким образом, по мере увеличения длины волны глубина транзита будет падать. При аппроксимации с использованием модели, в которой планета представлена однородным черным кружком, не пропускающим свет, это приведет к тому, что определяемый радиус планеты также будет падать по мере увеличения длины волны.

В настоящей работе представлены данные интерпретации наблюдений транзита экзопланеты HD 189733 b по диску материнской звезды, проведенные в десяти разных фильтрах с эффективными длинами волн от 5500 Å до 10500 Å. Основной целью было определить, как меняется радиус экзопланеты при наблюдении транзита на разных длинах волн, а также меняется ли характер этих изменений при смене ряда вводных характеристик, таких как радиус звезды, эксцентриситет и наклонение орбиты.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе проведена обработка кривых блеска, полученных в 2007 г. телескопом HST при наблюдениях системы HD 198733 b [2, 3]. Наблюдения проведены в десяти различных фильтрах с эффективными длинами волн от $\text{\AA}$ до $\lambda\lambda = 10000 - 10500 \text{ \AA}$. Каждая кривая блеска состоит из 625 точек с индивидуальной точностью порядка $\sigma \approx 10^{-4}$. Учитывая, что глубина транзита составляла порядка 2.5×10^{-2} , относительная ошибка (по отношению к глубине затмения) составляет менее $\sim 1 \%$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Интерпретация кривых блеска проводилась с помощью написанной автором программы, принцип работы которой описан в статье [4]. Вычисления проводились для трех различных значений эксцентриситета $e = 0, 0.01$ и 0.02 с фиксированным аргументом перигея, равным $\omega = 270^\circ$ (транзит проходит ровно в перигее). Данные значения соответствуют существующим оценкам эксцентриситета у данной системы, полученным на основе анализа кривых лучевых скоростей [5, 6, 7]. При используемых в данной работе небольших значениях эксцентриситета такое предположение является оправданным, так как асимметрия, вызванная неравномерностью движения планеты по орбите, в данном случае проявляет себя крайне слабо. При значениях $e < 0.1$ форма транзитной кривой при изменении эксцентриситета изменяется в основном вследствие изменения расстояния от планеты до звезды в момент транзита, что было показано в нашей предыдущей работе. Таким образом, приведенные в статье эффекты влияния эксцентриситета можно рассматривать как описываемые величиной $e \sin \omega$ и характеризующие расстояние от планеты до звезды в момент транзита.

Длина большой полуоси была зафиксирована на значении $a = 0.03126$ а. е., период обращения $P = 2.2185752^d$ [5, 6, 8].

Для каждого значения эксцентриситета автором изначально проводилась интерпретация кривой блеска, соответствующей длине волны $6750 \text{ \AA}$, с тремя свободными параметрами — радиус звезды, радиус планеты и наклонение орбиты. Впоследствии радиус звезды и наклонение орбиты фиксировались при обработке остальных 9 кривых блеска. Таким образом, единственным параметром, который определялся при их интерпретации, оставался радиус планеты. В этом состоит главное отличие нашей интерпретации от интерпретации, проведенной в работе [9], где наклонение орбиты и радиус звезды

искались совместно с радиусом планеты для каждой длины волны. Для коэффициентов потемнения к краю было рассмотрено два случая. В первом брался квадратичный закон с фиксированными для каждой длины волны теоретическими коэффициентами, взятыми из работы [10], которые были получены на основе моделирования звездных атмосфер, искомым параметром был только один — радиус планеты. Во втором случае использовался линейный закон с коэффициентом, определяемым из минимума невязки χ^2 ; таким образом, интерпретация проводилась по двум параметрам: радиусу планеты и линейному коэффициенту потемнения к краю. Результаты обработки с использованием квадратичного закона потемнения к краю и теоретических коэффициентов представлены в табл. 1–3, а также в графическом виде на рис. 1–3. С использованием линейного закона и коэффициентов, полученных при интерпретации, в табл. 4–6, в графическом виде — на рис. 4–6.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Как видно из результатов, представленных в предыдущей главе, интерпретация с использованием модели, представляющей планету в виде однородного непрозрачного черного кружка, выявила заметную зависимость радиуса планеты от длины волны. Автором было решено провести моделирование кривых блеска с добавлением частично прозрачного кольца вокруг непрозрачного диска, которое бы представляло собой упрощенную модель атмосферы, точнее ее верхней оптически прозрачной части.

Основной задачей применения данной модели было проверить гипотезу о связи радиуса планеты, полученного при интерпретации кривых блеска на различных длинах волн, с наличием атмосферы, рассеивающей излучение по закону Рэлея, и хотя бы приблизительно оценить ее структуру.

Автором была взята упрощенная экспоненциальная модель атмосферы, в которой плотность описывалась формулой $\rho(h) = \rho_0 \exp(h/H)$, где ρ_0 — плотность газа у условной поверхности, h — высота слоя атмосферы, H — характеристическая высота. Также автором предполагалось в рамках данной модели, что коэффициент рассеяния σ прямо пропорционален плотности газа ρ . Все остальные параметры (большая полуось орбиты, период обращения, наклонение орбиты) фиксировались и принимались равными тем, что были использованы при интерпретации наблюдательных данных. Коэффициенты потемнения к краю фиксировались

Таблица 1. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0$

$\lambda, \text{\AA}$	$R_{\text{star}}, R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Квадрат. коэффициент	Наклон орбиты, °	$R_p, \text{ км}$	Нормированный χ^2
5750	0.756	0.60964	0.14806	85.72	82 538	2.27896
6250	0.756	0.54384	0.18148	85.72	82 542	1.35196
6750	0.756	0.50189	0.19045	85.72	82 269	0.99531
7250	0.756	0.45994	0.21097	85.72	82 000	0.96278
7750	0.756	0.42083	0.20747	85.72	81 893	0.95105
8250	0.756	0.39202	0.2125	85.72	82 000	1.00925
8750	0.756	0.36532	0.21735	85.72	81 678	0.99496
9250	0.756	0.3414	0.22402	85.72	81 785	0.91441
9750	0.756	0.32165	0.23343	85.72	81 781	1.20305
10250	0.756	0.30189	0.24284	85.72	81 678	1.2075

Примечание. R_p — радиус планеты; χ^2 — нормированная невязка.

Таблица 2. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0.01$

$\lambda, \text{\AA}$	$R_{\text{star}}, R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Квадрат. коэффициент	Наклон орбиты, °	$R_p, \text{ км}$	Нормированный χ^2
5750	0.763	0.60964	0.14806	85.65	83 499	2.27256
6250	0.763	0.54384	0.18148	85.65	83 227	1.31716
6750	0.763	0.50189	0.19045	85.65	82 683	1.02421
7250	0.763	0.45994	0.21097	85.65	82 738	0.96368
7750	0.763	0.42083	0.20747	85.65	82 520	0.95285
8250	0.763	0.39202	0.2125	85.65	82 629	1.03565
8750	0.763	0.36532	0.21735	85.65	82 412	1.01356
9250	0.763	0.3414	0.22402	85.65	82 520	0.90821
9750	0.763	0.32165	0.23343	85.65	82 516	1.19095
10250	0.763	0.30189	0.24284	85.65	82 303	1.1757

Примечание. R_p — радиус планеты; χ^2 — нормированная невязка.

Таблица 3. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0.02$

$\lambda, \text{\AA}$	$R_{\text{star}}, R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Квадрат. коэффициент	Наклон орбиты, °	$R_p, \text{ км}$	Нормированный χ^2
5750	0.77	0.60964	0.14806	85.58	83 896	2.25266
6250	0.77	0.54384	0.18148	85.58	83 892	1.35456
6750	0.77	0.50189	0.19044	85.58	83 456	1.02851
7250	0.77	0.45994	0.21097	85.58	83 346	0.94568
7750	0.77	0.42083	0.20747	85.58	83 236	0.95775
8250	0.77	0.39202	0.21250	85.58	83 341	1.01105
8750	0.77	0.36532	0.21735	85.58	83 017	1.00076
9250	0.77	0.3414	0.22402	85.58	83 126	0.92911
9750	0.77	0.32165	0.23343	85.58	83 124	1.19645
10250	0.77	0.30189	0.24284	85.58	83 016	1.2073

Примечание. R_p — радиус планеты; χ^2 — нормированная невязка.

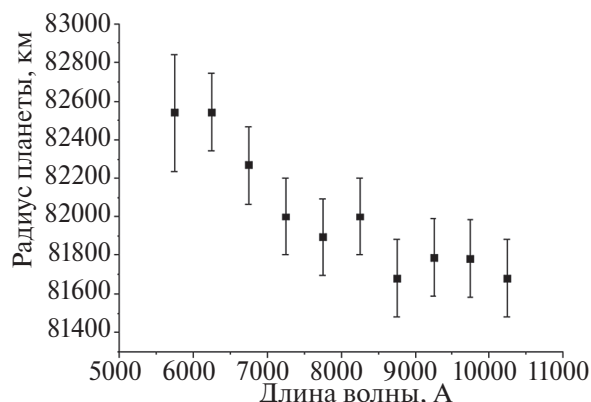


Рис. 1. Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, полученные при интерпретации с использованием квадратичного закона потемнения к краю и фиксированных коэффициентов из работы [10] при фиксированном эксцентриситете $e = 0$.

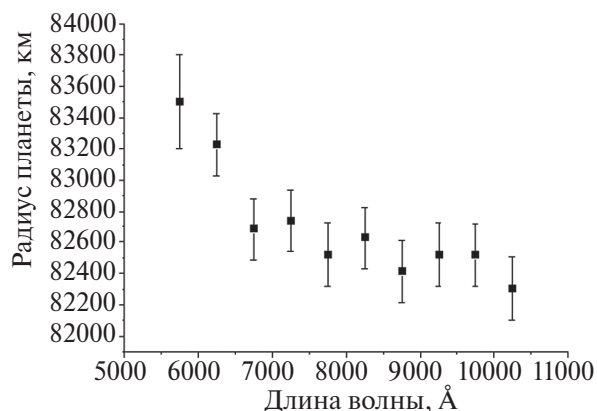


Рис. 2. Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, полученные при интерпретации с использованием квадратичного закона потемнения к краю и фиксированных коэффициентов из работы [10] при фиксированном эксцентриситете $e = 0.01$.

и принимались равными теоретическим коэффициентам, использованным при интерпретации в рамках квадратичного закона.

Таким образом, кольцо частичной прозрачности, моделирующее верхнюю часть атмосферы планеты, характеризовалось двумя параметрами: коэффициентом рассеяния у условной поверхности σ , а также 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

$$\tau(\xi) = 2 \int_{\xi}^{R_a} \frac{\sigma(r) r dr}{\sqrt{r^2 - \xi^2}}, \quad (1)$$

где ξ — прицельное расстояние, $r = r_0 + h$, 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 автором в рамках центрально-симметричного закона потемнения к краю. Просуммировав излучение со всех таких площадок, мы полу-

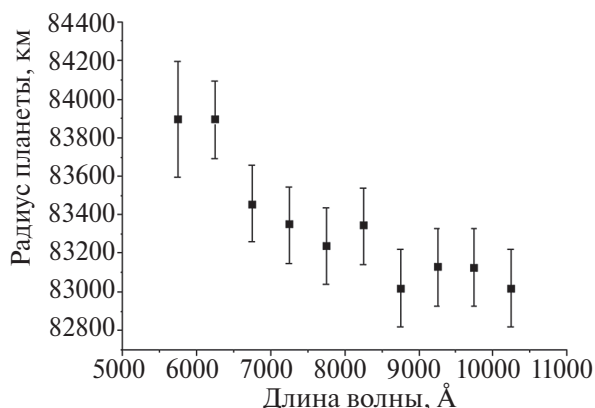


Рис. 3. Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, полученные при интерпретации с использованием квадратичного закона потемнения к краю и фиксированных коэффициентов из работы [10] при фиксированном эксцентриситете $e = 0.02$.

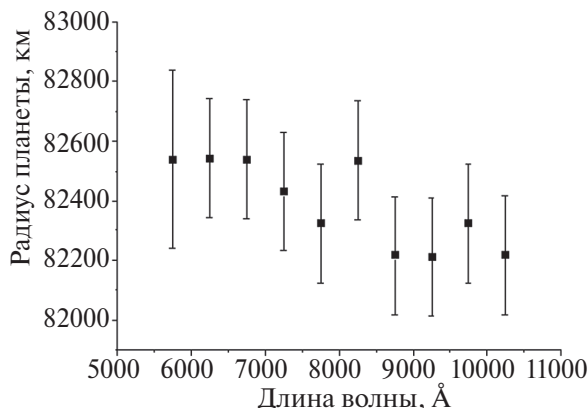


Рис. 4. Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, вычисленные при интерпретации с использованием линейного закона потемнения к краю и полученных значений коэффициентов при фиксированном эксцентриситете $e = 0$.

Таблица 4. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при найденных из решения обратной задачи коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0$

$\lambda, \text{\AA}$	$R_{\text{star}}, R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Наклон орбиты, °	$R_p, \text{ км}$	Нормированный χ^2
5750	0.756	0.6	85.72	82 539	2.23886
6250	0.756	0.64	85.72	82 542	1.30606
6750	0.756	0.66	85.72	82 538	0.99581
7250	0.756	0.62	85.72	82 431	0.93308
7750	0.756	0.6	85.72	82 323	0.90825
8250	0.756	0.58	85.72	82 535	0.99995
8750	0.756	0.56	85.72	82 215	0.97666
9250	0.756	0.52	85.72	82 211	0.89341
9750	0.756	0.52	85.72	82 323	1.16815
10250	0.756	0.52	85.72	82 217	1.1741

Примечание. R_p — радиус планеты; χ^2 — нормированная невязка.

Таблица 5. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при найденных из решения обратной задачи коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0.01$

$\lambda, \text{\AA}$	$R_{\text{star}}, R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Наклон орбиты, °	$R_p, \text{ км}$	Нормированный χ^2
5750	0.763	0.6	85.65	82 955	2.24956
6250	0.763	0.64	85.65	83 227	1.29206
6750	0.763	0.66	85.65	83 281	0.97631
7250	0.763	0.64	85.65	83 173	0.90308
7750	0.763	0.6	85.65	83 064	0.90465
8250	0.763	0.58	85.65	83 173	1.01325
8750	0.763	0.56	85.65	82 846	0.98666
9250	0.763	0.52	85.65	82 955	0.88021
9750	0.763	0.52	85.65	82 942	1.17775
10250	0.763	0.54	85.65	82 945	1.1453

Примечание. R_p — радиус планеты; χ^2 — нормированная невязка.

Таблица 6. Результаты интерпретации транзитных кривых блеска при найденных из решения обратной задачи коэффициентах потемнения к краю и фиксированном $e = 0.02$

$\lambda, \text{\AA}$	$R_{\text{star}}, R_{\odot}$	Линейный коэффициент	Наклон орбиты, °	$R_p, \text{ км}$	Нормированный χ^2
5750	0.77	0.62	85.58	83 896	2.23236
6250	0.77	0.66	85.58	84 171	1.31796
6750	0.77	0.68	85.58	84 006	0.99141
7250	0.77	0.64	85.58	83 896	0.90778
7750	0.77	0.62	85.58	83 786	0.90555
8250	0.77	0.6	85.58	83 896	1.00025
8750	0.77	0.58	85.58	83 876	0.99726
9250	0.77	0.54	85.58	83 678	0.88111
9750	0.77	0.54	85.58	83 656	1.16315
10250	0.77	0.56	85.58	83 670	1.1529

Примечание. R_p — радиус планеты; χ^2 — нормированная невязка.

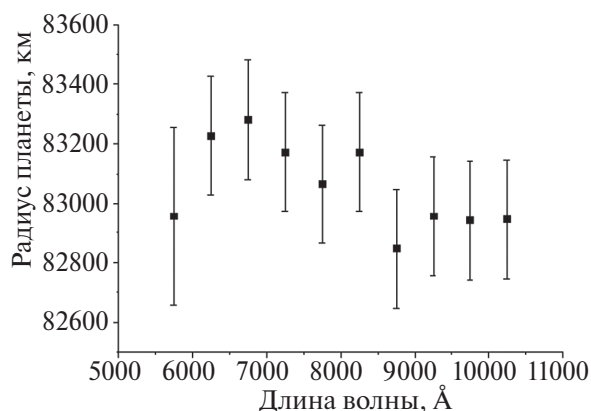


Рис. 5. Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, вычисленные при интерпретации с использованием линейного закона потемнения к краю и полученных значений коэффициентов при фиксированном эксцентриситете $e = 0.01$.

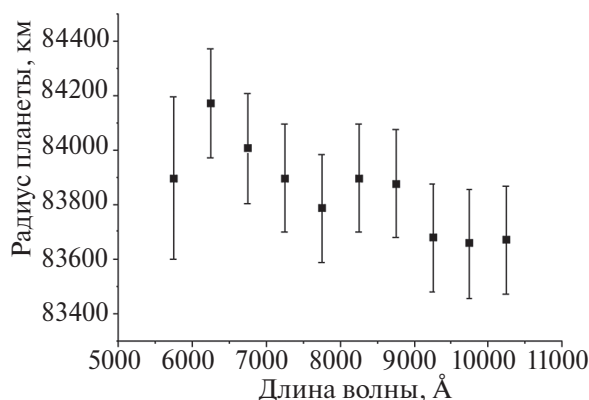


Рис. 6. Значения радиуса экзопланеты HD 189733 b, вычисленные при интерпретации с использованием линейного закона потемнения к краю и полученных значений коэффициентов при фиксированном эксцентриситете $e = 0.02$.

чили количество света, падающего на кольцо со стороны звезды. Далее, исходя из формулы

$$I = I_0 \exp(-\tau), \quad (2)$$

где I_0 — излучение, падающее на площадь кольца со стороны звезды, I — излучение, прошедшее сквозь атмосферу, не претерпев рассеяния. Вычитая одно из другого, мы определили количество излучения, которое рассеивает каждое кольцо с постоянным τ . По итогам суммирования по всем кольцам, была получена суммарная доля излучения звезды, рассеиваемая атмосферой.

Далее автором было сделано допущение, что глубина транзита в средней точке (она же наибольшая глубина) в первом приближении пропорциональна квадрату радиуса планеты. Исходя из этого, были определены эффективные радиусы, то есть радиусы непрозрачного кружка, при которых глубина транзита соответствовала бы той, что получилась при моделировании транзита с заданными характеристиками атмосферы. При решении обратной задачи была выполнена вариация по трем 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}). Таким образом, для каждого значения эксцентриситета (и соответствующих ему значений наклона орбиты и радиуса звезды) были определены пара-

метры коэффициента непрозрачности на длине волны 5750 Å (и соответствующие ему коэффициенты непрозрачности для остальных длин волн), радиуса непрозрачного ядра и характеристической высоты атмосферы, для которых сумма квадратов разностей между значениями эффективных радиусов и радиусов планеты, полученных из интерпретации наблюдательных данных, для всех десяти длин волн, была бы наименьшей. Их значения представлены в табл. 7. В табл. 8 приведены коэффициенты непрозрачности для разных длин волн, полученные в ходе решения обратной задачи.

На рис. 7–9 представлены значения эффективных радиусов, полученные для параметров атмосферы, определенных в ходе решения обратной задачи для трех значений эксцентриситета в сравнении с радиусами планеты, полученными из интерпретации кривых блеска. В табл. 9–11 приведены подробные данные об изменении глубины транзита при добавлении частично прозрачного кольца по сравнению с моделью, где присутствовало только непрозрачное ядро при заданных параметрах, указанных в табл. 7. Все параметры системы, кроме радиуса планеты, фиксировались и принимались равными тем, что использовались при аппроксимации кривых блеска в рамках квадратичного закона (см. табл. 1–3 и раздел 3). Коэффициенты потемнения к краю фиксировались на значениях, равных теоретическим, для каждой длины волны отдельно (этим вызваны различия в глубинах транзита за счёт непрозрачного ядра для разных длин волн).

Таблица 7. Полученные в ходе решения обратной задачи параметры радиуса непрозрачного ядра, коэффициента непрозрачности атмосферы и характеристической высоты смоделированной атмосферы для разных значений эксцентриситета

Параметр	Значения		
Эксцентриситет	0.00	0.01	0.02
Радиус непрозрачного ядра, км	81 400	82 100	82 800
Коэффициент рассеяния при $\lambda = 5750 \text{ \AA}$, м^{-1}	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Характеристическая высота атмосферы, км	1000	1000	950

Таблица 8. Коэффициенты непрозрачности атмосферы, полученные в ходе решения задачи минимизации суммы квадратов разностей

$\lambda, \text{\AA}$	Коэффициент непрозрачности у поверхности, км^{-1}
5750	$1.5 \cdot 10^{-4}$
6250	$1.07458944 \cdot 10^{-4}$
6750	$7.89855318 \cdot 10^{-5}$
7250	$5.93486182 \cdot 10^{-5}$
7750	$4.54522962 \cdot 10^{-5}$
8250	$3.53954015 \cdot 10^{-5}$
8750	$2.79724448 \cdot 10^{-5}$
9250	$2.23973020 \cdot 10^{-5}$
9750	$1.81444653 \cdot 10^{-5}$
10250	$1.48548126 \cdot 10^{-5}$

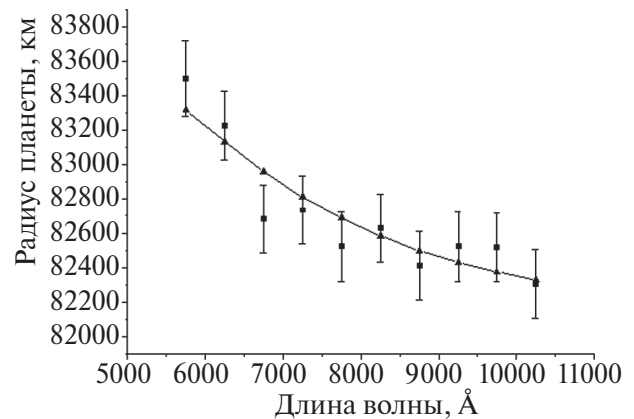


Рис. 8. Радиусы планеты при интерпретации наблюдений HD 189733 b и эффективные радиусы, полученные при моделировании ее атмосферы при $e = 0.01$.

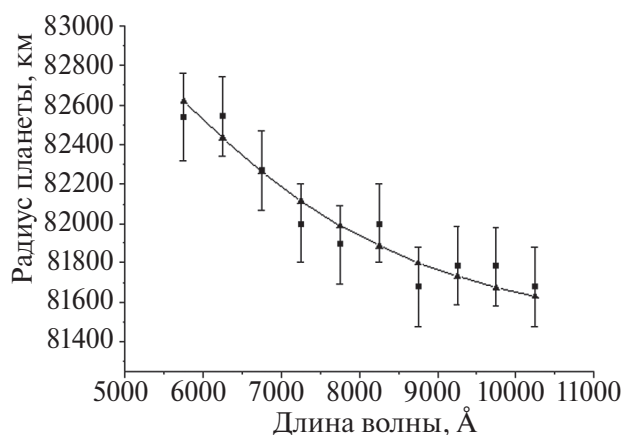


Рис. 7. Радиусы планеты при интерпретации наблюдений HD 189733 b и эффективные радиусы, полученные при моделировании ее атмосферы при $e = 0$.

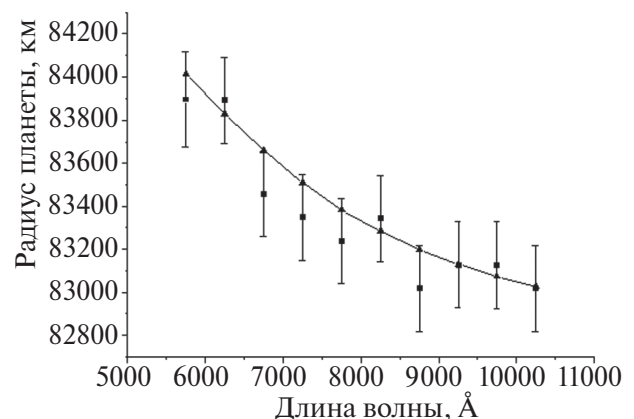


Рис. 9. Радиусы планеты при интерпретации наблюдений HD 189733 b и эффективные радиусы, полученные при моделировании ее атмосферы при $e = 0.02$.

Таблица 9. Результаты моделирования кривой блеска с добавлением кольца переменной прозрачности. Сравнение полученных данных с результатами аппроксимации реальных наблюдений для $e = 0.0$

$\lambda, \text{\AA}$	A_{atm}	A_{core}	ΔA_{atm}	$R_p^{\text{eff}}, \text{ км}$	$R_p^{\text{obs}}, \text{ км}$
5750	0.02649	0.02571	$7.75 \cdot 10^{-4}$	82 618	82 538
6250	0.02628	0.02563	$6.55 \cdot 10^{-4}$	82 432	82 542
6750	0.02609	0.02554	$5.44 \cdot 10^{-4}$	82 262	82 269
7250	0.02594	0.02549	$4.48 \cdot 10^{-4}$	82 112	82 000
7750	0.02574	0.02538	$3.67 \cdot 10^{-4}$	81 986	81 893
8250	0.02562	0.02532	$3.01 \cdot 10^{-4}$	81 882	82 000
8750	0.02551	0.02526	$2.47 \cdot 10^{-4}$	81 797	81 678
9250	0.02543	0.02522	$2.04 \cdot 10^{-4}$	81 728	81 785
9750	0.02537	0.0252	$1.69 \cdot 10^{-4}$	81 672	81 781
10250	0.02532	0.02518	$1.41 \cdot 10^{-4}$	81 627	81 678

Примечание. A_{atm} — глубина транзита с атмосферой, A_{core} — глубина транзита за счёт непрозрачного ядра, ΔA_{atm} — приращение глубины транзита за счёт атмосферы, R_p^{eff} — эффективный радиус планеты, R_p^{obs} — радиус планеты, полученный из аппроксимации наблюдательных данных.

Таблица 10. Результаты моделирования кривой блеска с добавлением кольца переменной прозрачности. Сравнение полученных данных с результатами аппроксимации реальных наблюдений для $e = 0.01$

$\lambda, \text{\AA}$	A_{atm}	A_{core}	ΔA_{atm}	$R_p^{\text{eff}}, \text{ км}$	$R_p^{\text{obs}}, \text{ км}$
5750	0.02635	0.02559	$7.65 \cdot 10^{-4}$	83 317	83 499.5
6250	0.02616	0.02551	$6.46 \cdot 10^{-4}$	83 132	83 227
6750	0.02597	0.02543	$5.37 \cdot 10^{-4}$	82 961	82 683
7250	0.02583	0.02538	$4.43 \cdot 10^{-4}$	82 812	82 738
7750	0.02564	0.02528	$3.62 \cdot 10^{-4}$	82 686	82 520
8250	0.02552	0.02522	$2.97 \cdot 10^{-4}$	82 582	82 629
8750	0.02542	0.02517	$2.44 \cdot 10^{-4}$	82 497	82 412
9250	0.02534	0.02513	$2.02 \cdot 10^{-4}$	82 428	82 520
9750	0.02528	0.02511	$1.67 \cdot 10^{-4}$	82 372	82 516
10250	0.02523	0.02509	$1.39 \cdot 10^{-4}$	82 327	82 303

Примечание. A_{atm} — глубина транзита с атмосферой, A_{core} — глубина транзита за счёт непрозрачного ядра, ΔA_{atm} — приращение глубины транзита за счёт атмосферы, R_p^{eff} — эффективный радиус планеты, R_p^{obs} — радиус планеты, полученный из аппроксимации наблюдательных данных.

Таблица 11. Результаты моделирования кривой блеска с добавлением кольца переменной прозрачности. Сравнение полученных данных с результатами аппроксимации реальных наблюдений для $e = 0.02$

$\lambda, \text{\AA}$	A_{atm}	A_{core}	ΔA_{atm}	$R_p^{\text{eff}}, \text{ км}$	$R_p^{\text{obs}}, \text{ км}$
5750	0.02621	0.02546	$7.52 \cdot 10^{-4}$	84 014	83 896
6250	0.02603	0.0254	$6.36 \cdot 10^{-4}$	83 829	83 892
6750	0.02585	0.02532	$5.28 \cdot 10^{-4}$	83 659	83 456
7250	0.02571	0.02528	$4.36 \cdot 10^{-4}$	83 510	83 346
7750	0.02553	0.02518	$3.57 \cdot 10^{-4}$	83 385	83 236
8250	0.02542	0.02513	$2.93 \cdot 10^{-4}$	83 281	83 341
8750	0.02532	0.02508	$2.41 \cdot 10^{-4}$	83 196	83 017
9250	0.02524	0.02505	$1.99 \cdot 10^{-4}$	83 127	83 126
9750	0.02519	0.02503	$1.65 \cdot 10^{-4}$	83 072	83 124
10250	0.02515	0.02501	$1.38 \cdot 10^{-4}$	83 027	83 016

Примечание. A_{atm} — глубина транзита с атмосферой, A_{core} — глубина транзита за счёт непрозрачного ядра, ΔA_{atm} — приращение глубины транзита за счёт атмосферы, R_p^{eff} — эффективный радиус планеты, — радиус планеты, полученный из аппроксимации наблюдательных данных.

5. ВЫВОДЫ

В ходе данной работы были подтверждены результаты, полученные в статье [9], в части уменьшения определяемого радиуса экзопланеты при увеличении длины волны. Однако, поскольку мы (вполне оправданно) считали, что радиус звезды и наклонение орбиты не зависят от длины волны и принимались одинаковыми для всех 10 кривых блеска, нам удалось более детально исследовать зависимость радиуса планеты от длины волны. Также наши результаты были дополнены исследованием зависимости радиуса планеты от длины волны при ненулевых значениях эксцентриситета. Было подтверждено, что характер самой зависимости сохраняется, если эксцентриситет орбиты не выходит за пределы доверительных интервалов, полученных при исследовании системы доплеровским методом.

Полученное значение для коэффициента непрозрачности в приближении атмосферы, состоящей из молекулярного водорода, соответствует концентрации частиц в $2.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ или около 3.487 моль/м^3 , что примерно соответствует плотности атмосферы в тропопause Юпитера (50–100 км выше уровня облаков) [11]. Это является достаточно прав-

доподобным результатом с учетом высокой температуры рассматриваемой планеты. Также важным результатом является то, что полученные характеристики атмосферы мало зависят от заданной величины эксцентриситета при небольших его значениях ($e \leq 0.02$).

Еще одним результатом можно считать то, что в рассмотренной в данной работе модели характеристическая высота и радиус непрозрачной части планетарного диска были фиксированными для всех длин волн, в то время как коэффициент непрозрачности менялся от длины волны как λ^{-4} , и при этом удалось получить эффективные радиусы планеты, а также их зависимость от длины волны, близкие к тем, что были получены из интерпретации наблюдательных данных (см. рис. 7–9). Это можно рассматривать как свидетельство возможности применения приближенной модели рэлеевской атмосферы при определении характеристик атмосфер экзопланет из многоцветных фотометрических наблюдений.

Таким образом, данные многоцветных спутниковых фотометрических наблюдений становится возможным использовать для получения первичных данных об атмосферах экзопланет. Это актуально

для тех объектов, для которых отсутствуют высокоточные спектрометрические наблюдения. Выявленные таким образом транзиты, в которых из фотометрических наблюдений следует зависимость радиуса экзопланеты от длины волны, могут служить мишенями для более детальных спектральных наблюдений на наиболее крупных телескопах (HST, телескоп Джеймса Вэбба, и т. д.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит академика РАН А. М. Черепашука за ценные обсуждения работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D. Alp and B.-O. Demory*, *Astron. and Astrophys.* 609, id. A90 (2018).
2. *F. Pont, R. L. Gilliland, C. Moutou, D. Charbonneau, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 476(3), 1347 (2007).
3. *F. Pont, H. Knutson, R. L. Gilliland, C. Moutou, and D. Charbonneau*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 385(1), 109 (2008).
4. *E. В. Бекесов, А. А. Белинский, С. Б. Попов*, *Астрон. журн.* 98(12), 1043 (2021).
5. *L. J. Rosenthal, B. J. Fulton, L. A. Hirsch, H. T. Isaacson, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* 255(1), id. 8 (2021).
6. *A. S. Bonomo, S. Desidera, S. Benatti, F. Borsa, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 602, id. A107 (2017).
7. *L. A. Paredes, T. J. Henry, S. N. Quinn, D. R. Gies, R. Hinojosa-Goñi, H.-S. James, W.-Ch. Jao, and R. J. White*, *Astron. J.* 162(5), id. 176 (2021).
8. *B. Addison, D. J. Wright, R. A. Wittenmyer, J. Horner, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 131(1005), 115003 (2019).
9. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук*, *Астрон. журн.* 88(12), 1139 (2011).
10. *J. Eastman, B. S. Gaudi, and E. Agol*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 125(923), 83 (2013).
11. *A. Seiff, D. B. Kirk, T. C. D. Knight, R. E. Young, et al.*, *J. Geophys. Res.* 103(E10), 22857 (1998).

DETERMINING THE STRUCTURE OF THE ATMOSPHERE EXOPLANET HD 189733 B BASED ON MULTICOLOR PHOTOMETRIC TRANSIT OBSERVATIONS

E. V. Bekesov¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

The work carried out an analysis and interpretation of light curves obtained with observing with the HST telescope the transit of the exoplanet HD 189733 b across the disk of the star. Observations were carried out in a wide range of wavelengths 5500–10500 Å, which made it possible to identify the relationship between the wavelength and the data obtained during the interpretation of the radius of the planet. It has also been shown that this dependence can be explained by the presence of a Rayleigh atmosphere on the planet, and an approximate assessment of the possible parameters of this atmosphere was also carried out.

Keywords: transit light curves, binary systems with exoplanets, eccentricity, limb darkening coefficients, planet's radius, star's radius, exoplanet atmosphere, HD 189733 b