

# ПОИСК НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРОФИЛЕЙ ЯРКОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ШУМА КА SPITZER

А. А. Федотов, Р. В. Балуюев

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет*

Построена модель коррелированного шума в полосе 3.6 мкм космического телескопа Spitzer/IRAC, используемая для цели поиска неоднородностей инфракрасного профиля яркости экзопланеты HD209458b. Учет шума выполнялся при помощи метода максимального правдоподобия в модели гауссового процесса. Выявлена сложная природа красного шума, содержащего две компоненты с характерным временем затухания порядка 10 с и 5 мин. Получена глубина вторичного затмения  $0.094 \pm 0.013$  % и отклонение центра затмения на  $3.1 \pm 3.4$  мин.

## SEARCH FOR INHOMOGENEITIES OF BRIGHTNESS PROFILES OF SECONDARY ECLIPSES IN THE INFRARED RANGE USING CORRELATION NOISE SA SPITZER MODELING

A. A. Fedotov, R. V. Baluev

*Saint Petersburg State University*

A correlated noise model in the 3.6  $\mu\text{m}$  band of the Spitzer/IRAC space telescope is constructed for the purpose of searching for inhomogeneities in the infrared brightness profile of the exoplanet HD209458b. The noise was treated using the maximum likelihood method in the Gaussian process model. The complex nature of red noise, which contains two components with characteristic decay times of the order of 10 seconds and 5 minutes, is revealed. We obtained a secondary eclipse depth of  $0.094 \pm 0.013$  % and an eclipse center deviation of  $3.1 \pm 3.4$  minutes.

## Введение

Целью работы является разработка метода исследований вторичных затмений горячих юпитеров. Экзопланеты данного класса близки к своим родительским звездам и обладают значительными размерами, что облегчает обнаружение их собственного излучения, когда планета за относительно короткое время заходит за звезду. Подобные затмения планет звездой и называются вторичными, при этом они куда менее глубокие, чем транзиты.

Изучение вторичных затмений позволяет уточнить форму орбиты и температуру планеты. Нашей целью исследования являлся поиск более тонкого эффекта, а именно отклонения профиля вторичного затмения, которое может быть вызвано неоднородностями яркости или отличием формы планеты от шара. Неоднородность яркости горячих юпитеров ожидается по сочетанию причин. Из-за близости к звезде они должны находиться в приливном захвате. При этом наиболее нагретая область смещается относительно подзвездной точки [1]. Для наблюдения этого эффекта оптимально подходит инфракрасный диапазон излучения, так как на него приходится максимум собственного излучения планеты. Именно поэтому для анализа были выбраны наблюдения инфракрасного телескопа Spitzer.

Работа является развитием представленной ранее [2]. Похожий вопрос поиска неоднородностей яркости поднимался ранее другими авторами [3–5]. Стоит упомянуть также работу [6], в которой часть наблюдений, применяемых в этой работе, и их обработка производится похожим методом, но ведется измерение других характеристик планеты.

## Описание методики

В работе проанализированы архивные данные космического телескопа Spitzer, снятые в промежутках с 2011 по 2015 г. в полосе 3.6 мкм. В открытом доступе находятся предобработанные (BCD; Basic Calibrated Data) fits-файлы (<https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>). Всего в работе использовались наблюдения 13 вторичных затмений экзопланеты HD209458b, для каждого из которых имелось примерно от 2 500 до 3 500 файлов. Каждый файл представлял из себя куб данных 32 на 32 пикселя по двум измерениям и 64 кадра по третьему. Выбор планеты был обусловлен тем, что у нее круговая орбита, что облегчило последующее моделирование, и при этом имелось наибольшее количество наблюдений вторичных затмений.

Для обработки наблюдений была проведена апертурная фотометрия. Для нее использовался радиус апертуры в 4 пикселя, кольцо фона шириной 12 пикселей и зазором между ними в 8 пикселей. Радиус апертуры был обусловлен примерным расстоянием, на котором яркость объекта становится неотличимой от фона. Также было проведено усреднение результатов обработки для снимков из одного файла (64 последовательных кадра в пределах 9 с) с целью уменьшения количества данных из-за ограничений вычислительных затрат при последующей обработке.

Из данных были удалены 20 кадров с выбросами, следуя методике из работы [7]. Выбросы определялись по результатам сравнения эмпирического распределения невязок с гауссовым. Те фотометрические измерения, которые попали в сильно отклоняющиеся хвосты распределения, были удалены.

Полученная фотометрическая кривая содержала значительные шумы, учет которых и является основной трудностью для получения неоднородностей вторичного затмения. Основным их источником в используемом диапазоне является неодинаковая чувствительность пикселей [6]. Эта ошибка не устраняется предобработкой и приводит к тому, что по мере смещения звезды по матрице детектора (из-за погрешностей гидирования) считываемый сигнал меняется синхронно со смещением, из-за чего возникает коррелированный шум.

На текущем этапе рассматривалось только два параметра, связанные с моделью затмения. Один из них отвечал за отношение яркости планеты и звезды, а второй — за смещения центра затмения относительно расчетного по орбитальным параметрам. Использовались параметры звездной системы из работы [8]. Модель предполагала равномерно яркий диск планеты, который равномерно заходит за диск звезды по прямой с некоторым прицельным параметром. Фактически она является реализацией простейшей модели из статьи [9].

Подбор наиболее подходящих параметров производился при помощи метода максимального правдоподобия. К модели основного сигнала (кривой затмения) добавлялся полиномиальный тренд третьей степени. Набор коэффициентов подбирался отдельно для каждого наблюдения, а параметры затмения подбирались одинаковые для всех затмений сразу.

Шум в каждом затмении моделировался в виде стационарного гауссового процесса (ГП-метод). То есть предполагалось, что весь набор (то есть вектор) измерений одного затмения следует многомерному гауссовому распределению, чья ковариационная матрица задается с помощью корреляционной функции шума. Функция правдоподобия для ГП-метода при-

нимает вид:

$$p(\mathbf{d} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\eta}) = \mathcal{N}[\boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\alpha}), \mathbf{V}(\boldsymbol{\eta})] = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} \sqrt{\det \mathbf{V}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{d} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{d} - \boldsymbol{\mu})\right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{d}$  — ряд наблюдений;  $\boldsymbol{\mu}$  — модель кривой блеска, зависящая от параметров  $\boldsymbol{\alpha}$ ;  $\mathbf{V}$  — ковариационная матрица, зависящая от параметров  $\boldsymbol{\eta}$ .

Этот метод позволяет описать более широкий спектр моделей, чем классический МНК с некоррелированным (белым) шумом. Необходимо только понимание структуры корреляционной функции шума, заполняющей внедиагональные элементы матрицы  $\mathbf{V}$ . Реализация этого метода в работе была сделана на основе алгоритма, использованного в статье [10].

Наша текущая модель корреляционной функции имеет вид:

$$k(\Delta t_{ij} | \boldsymbol{\eta}) = \sigma_0^2 \delta_{ij} + \sigma_1^2 \exp\left(-\frac{\Delta t_{ij}^2}{2\tau_1^2}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(-\frac{\Delta t_{ij}^2}{2\tau_2^2}\right) + \sigma_3^2 \exp\left(-\frac{\Delta t_{ij}^2}{2\tau_3^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi \Delta t_{ij}}{P}\right),$$

$$\boldsymbol{\eta} = \{\sigma_0, \sigma_1, \tau_1, \sigma_2, \tau_2, \sigma_3, \tau_3, P\}, \quad (2)$$

где первое слагаемое отвечает за белый шум, второе и третье — за двухкомпонентный красный шум (его физическая природа пока не до конца ясна), а четвертое — за квазипериодический шум (это эффект неравномерной чувствительности пикселей). Стоит отметить, что такая модель функции явилась результатом длительной итеративной работы.

## Результаты

Результат работы программы показал следующие значения параметров модели (амплитуда нормирована на среднее значение сигнала вне затмения):  $\sigma_0$  — от 0.0008 до 0.0014;  $\sigma_1$  — от 0.0011 до 0.0027;  $\sigma_2$  — от 0.0005 до 0.0018;  $\sigma_3$  — от 0.0008 до 0.0026;  $\tau_1$  — от 10 до 12 с;  $\tau_2$  — от 2 до 6 мин;  $P$  — от 36 до 55 мин. Параметр  $\tau_3$  для шести затмения находится в пределах от 1.5 до 6 ч, а в остальных 7 статистически согласуется с бесконечностью, что указывает на отсутствие затухания квазипериодического шума в половине случаев.

На раннем этапе этой работы (простейший МНК с белым шумом) получалась глубина вторичного затмения  $0.101 \pm 0.009$  %, а отклонение центра затмения в  $1.64 \pm 1.29$  мин [11]. ГП-метод в текущей модели дает значение параметров  $0.092 \pm 0.014$  % и  $3.13 \pm 3.39$  мин соответственно. Отклонение центра соответствует  $0.28 \pm 0.30$  радиусов планеты. Стоит отметить, что погрешности превышают полученные на первом этапе, поскольку коррелированный шум позволяет описать погрешность более надежно (то есть погрешности МНК занижены из-за неадекватной модели шума). Также важно то, что полученная оценка глубины затмения согласуется с результатами [6].

Важным результатом работы является обнаружение двух компонентов красного шума. На начальном этапе рассматривалась модель с одним компонентом, показывающим затухание на масштабе около 10 с, однако в этой модели получалось быстрое затухание квазипериодической части шума, что не согласовалось с коррелограммой. Введение второго компонента, затухающего на масштабе 5 мин., улучшило картину. Подобные временные масштабы затухания красного шума присутствуют в работе [6], однако так как у этого автора в модели имеется только один компонент, то наиболее подходящая модель в разных наблюдениях сходится то к одному, то к другому из этих значений для времени затухания.

Таким образом, была продолжена работа по улучшению модели шума для анализа наблюдений космического телескопа Spitzer. Наша текущая модель состоит из трех основных частей: белого, двухкомпонентного красного и квазипериодического шума. По текущим результатам не для всех затмений наблюдается хорошее согласие коррелограммы с моделью,

поэтому продолжается работа над совершенствованием модели. Наибольшие отклонения наблюдаются для эффекта неравномерной чувствительности пикселей (то есть для квази-периодической части шума). По всей видимости, ее лучше моделировать путем добавления в корреляционную функцию зависимости не только от разности времени между кадрами, но и разности координат между центроидами яркости.

На данном этапе работы не обнаружено статистически значимых отклонений от модели равномерно яркого диска (так как смещение центра затмения согласуется с нулем), но заложена основа для единообразной обработки большого массива наблюдений сразу многих экзопланет.

## Библиографические ссылки

- [1] *Showman A. P., Guillot T.* Atmospheric circulation and tides of “51 Pegasus b-like” planets // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 385. — P. 166–180. [astro-ph/0202236](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0202236).
- [2] *Федотов А. А., Балуев Р. В.* Поиск асимметрии инфракрасного профиля яркости экзопланеты HD209458b // *Астрономия и исследование космического пространства: тр. Всеросс. с междунаро. участ. науч. конф. студентов и молод. ученых, Екатеринбург, 31 янв. — 4 февр. 2022 г / ред. Э. Д. Кузнецов.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. — С. 177. <https://elar.urfu.ru/handle/10995/115905>.
- [3] *Knutson H. A., Charbonneau D., Allen L. E. et al.* A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b // *Nature.* — 2007. — Vol. 447, № 7141. — P. 183–186. 0705.0993.
- [4] *Majeau C., Agol E., Cowan N. B.* A Two-dimensional Infrared Map of the Extrasolar Planet HD 189733b // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 747, № 2. — P. L20. 1202.1883.
- [5] *de Wit J., Gillon M., Demory B. O., Seager S.* Towards consistent mapping of distant worlds: secondary-eclipse scanning of the exoplanet HD 189733b // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 548. — P. A128. 1202.3829.
- [6] *Evans T. M., Aigrain S., Gibson N. et al.* A uniform analysis of HD 209458b Spitzer/IRAC light curves with Gaussian process models // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 451, № 1. — P. 680–694. 1504.05942.
- [7] *Baluev Roman V., Sokov Evgenii N., Shaidulin Vakhit Sh. et al.* Benchmarking the power of amateur observatories for TTV exoplanets detection // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 450, № 3. — P. 3101–3113. 1501.06748.
- [8] *Bonomo A. S., Desidera S., Benatti 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 // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 602. — P. A107. 1704.00373.
- [9] *Baluev R. V., Shaidulin V. Sh.* Analytic models of the Rossiter-McLaughlin effect for arbitrary eclipser/star size ratios and arbitrary multiline stellar spectra // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 454, № 4. — P. 4379–4399. 1506.01874.
- [10] *Baluev R. V.* PlanetPack3: A radial-velocity and transit analysis tool for exoplanets // *Astronomy and Computing.* — 2018. — Vol. 25. — P. 221–229. 1809.07052.
- [11] *Федотов А. А., Карелин Г. М.* Первые шаги к картированию экзопланет: моделирование вторичных затмений и поиск неоднородностей инфракрасных профилей яркости // *Астрономия и исследование космического пространства: тр. Всеросс. с междунаро. участ. науч. конф. студентов и молод. ученых, Екатеринбург, 31 янв. — 4 февр. 2022 г / ред. Э. Д. Кузнецов.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — С. 204–207. <https://elar.urfu.ru/handle/10995/98233>.