

ПОИСК БЫСТРЫХ ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК В ДАННЫХ THE ZWICKY TRANSIENT FACILITY DR8

А. Д. Лаврухина¹, К. Л. Маланчев^{2,3}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ

³Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign

Вспышки красных карликов играют важную роль в изучении обитаемости экзопланет. Выборка, состоящая из достаточного количества объектов такого типа, не только бы внесла вклад в поиск потенциально обитаемых планет, но и помогла бы лучше изучить физическую природу вспышек красных карликов. В данной работе представлены методы обнаружения вспышек красных карликов и результаты их применения к данным 8-го релиза фотометрического обзора The Zwicky Transient Facility. При помощи описанных методов были найдены 20 кандидатов во вспыхивающие объекты с амплитудой вспышки более 1.5 магнитуды.

SEARCH FOR FAST STELLAR FLARES IN THE ZWICKY TRANSIENT FACILITY DR8

А. Д. Lavrukhina¹, К. L. Malanchev^{2,3}

¹Lomonosov Moscow State University, ²Sternberg astronomical institute,

³Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign

Red dwarf flares are essential for the studying of the exoplanet's habitability. The data sample, consisting of a sufficient number of objects, will not only help to find habitable planets candidates but also help to sort better through the physical nature of the red dwarf flares. In this work, we present the detection methods for the red dwarf flare candidates and apply them to the 8th data release of The Zwicky Transient Facility survey. The results consist of 20 candidates for the flaring objects having an amplitude larger than 1.5 magnitudes.

Введение

Современные высокоточные фотометрические обзоры, такие как Kepler или TESS, находят большое количество звездных вспышек [1–3]. Предельная звездная величина TESS ограничена малым диаметром его телескопов (10 см). Программа наблюдений Kepler охватывает лишь небольшую часть небесной сфере. По этим причинам данные обзоры не способны находить достаточно тусклые вспышки. Несмотря на то, что The Zwicky Transient Facility (ZTF) [4] является наземным телескопом и не обладает такой точной фотометрии, он обладает большей предельной величиной наблюдений, которая достигает 21.5 mag в полосе r . Кроме того, ZTF, в отличие от космических обзоров, не дает наблюдений с постоянно высокой скважностью. Тем не менее часть обзора посвящена наблюдениям с временным разрешением 20–30 мин, что позволяет наблюдать даже достаточно короткие вспышки. Это позволяет использовать данные ZTF для поиска быстрых вспышек тусклых объектов, какими являются, например, вспышки красных карликов.

Изучение вспышек красных карликов важно для экзопланетных наук, так как во время звездных вспышек происходит большое выделение энергии в ультрафиолетовом диапазоне, что влияет на обитаемость соседних планет [5]. Кроме того, составление выборки статистически значимых размеров может помочь в дальнейшем изучении популяции объектов такого типа.

Данные

Использовались данные восьмого релиза данных The Zwicky Transient Facility (ZTF DR8), которые насчитывают 3 736 031 325 кривых блеска. Для дальнейшего анализа использовались кривые блеска в фильтре r . В рамках обзора ZTF проводится несколько различных компаний наблюдений, в том числе наблюдения с высокой скважностью. После отбора объектов с временным разрешением не более 30 мин. и с выраженной переменностью, в выборке осталось 4 027 686 кривых блеска.

Поиск и анализ вспышек

Мы предполагаем, что большинство вспышек описываются быстрым ростом и следующим за ним квазиэкспоненциальным спадом потока. Для поиска такого рода вспышек используются две математические модели. Первая модель основывается на детектировании линейного роста или спада звездной величины, которые наблюдаются во вспышках. Вторая модель использует функцию с экспоненциальными асимптотиками как для роста, так и для спада.

Линейный рост или спад звездной величины

Каждая кривая блеска в звездных величинах аппроксимировалась линейной функцией при помощи реализованной в пакете `light-curve` [6] функции `LinearFit`. Ожидается, что аппроксимирующая прямая кандидата на вспышку будет иметь большой модуль наклона и относительно небольшое значение критерия адекватности модели $\text{reduced } \chi^2$, то есть данные будут указывать на значимый рост/спад звездной величины.

Для дальнейшего рассмотрения были отобраны кривые блеска, с наклоном аппроксимирующей прямой $> 12 \text{ mag/сут}$ и со значениями $\text{reduced } \chi^2 < 2$. Получившаяся выборка состоит из 80 кривых блеска.

При детальном рассмотрении выборки при помощи SNAD ZTF viewer были найдены 17 кандидатов во вспыхивающие объекты (см. пример на рис. 1). Кроме того, были найдены 36 артефактов (границы кадра, треки спутников, расфокусировки и блики от соседних ярких объектов), 16 кандидатов в затменные звезды и 1 эллипсоидальная переменная.

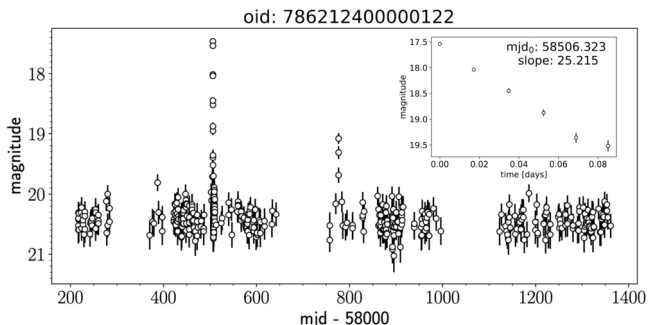


Рис. 1. Кривая блеска кандидата 786 212 400 000 122. Во вставке — найденный при помощи аппроксимации линейной функцией участок вспышки (slope — наклон аппроксимирующей прямой в единицах mag/day , mjd_0 — модифицированная юлианская дата начала вспышки в оригинальной кривой блеска объекта), основной график — полная кривая блеска

Аппроксимация функцией Базина

В данной работе используется модель на основе формулы Базина [7], имеющей экспоненциальную асимптотику как для возрастающей части кривой блеска, так и для убывающей.

Перед аппроксимацией набор кривых блеска был дополнительно отфильтрован по количеству наблюдений и амплитуде — использовались кривые блеска с не менее чем 10 наблюдениями и амплитудой ≥ 2 mag. Рассматриваемая выборка состоит из 3 939 30 кривых блеска. Для аппроксимации использовалась реализованная в пакете `light-curve` [6] функция `BazinFit`.

Были рассмотрены 25 кривых блеска с наименьшим значением $\text{reduced } \chi^2$. Почти во всех отобранных кривых блеска во вспышке имеется только одно наблюдение, что усложняет дальнейшую характеристику кандидатов. Тем не менее нашлись два объекта с достаточным числом наблюдений в максимуме блеска.

Фильтрация кривых блеска с одиночными выбросами

Чтобы отфильтровать объекты с малым количеством наблюдений в максимуме кривой блеска, необходимо определить количество наблюдений во вспышке и вне нее. Одним из методов решения такой задачи является применение к кривой блеска метода Оцу [8, 9].

Для обработки кривых блеска в магнитудах использовался метод `OtsuSplit`, реализованный в пакете `light-curve` [6]. Кривые блеска фильтровались по отношению числа точек во вспышке к общему числу наблюдений. Рассматривались вспышки со значением данного параметра больше 0.2 и $\text{reduced } \chi^2 < 2$. Отфильтрованная выборка состоит из 229 кривых блеска. Для детального рассмотрения были взяты 10 кривых блеска. Пример кандидата изображен на рис. 2.

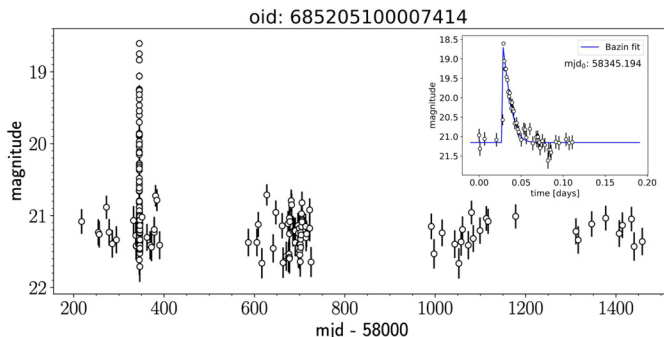


Рис. 2. Кривая блеска кандидата 685 205 100 007 414. Во вставке — найденный при помощи аппроксимации функцией Базина участок вспышки, основной график — полная кривая блеска

Заключение

В рамках работы была создана выборка из данных ZTF DR8 с временным разрешением не более 30 мин., которая подходит для решения задач поиска и изучения быстрых переменных объектов. Были разработаны методы поиска быстрых вспышек в данных фотометрических обзоров, которые могут быть применены и к другим обзорам с высокой скважностью

наблюдений. Вручную было проанализировано 100 объектов, которые были классифицированы как: 38 — артефакты, 20 — кандидаты во вспыхивающие объекты, 16 — кандидаты в затменные звезды, 1 эллипсоидальная переменная звезда. Оставшиеся объекты не удалось идентифицировать из-за недостаточного количества наблюдений во вспышке.

Найденные кандидаты во вспыхивающие красные карлики демонстрируют, что данные ZTF DR8 позволяют обнаруживать объекты такого типа. В дальнейшем планируется усовершенствовать описанные и разработать новые методы для многократного увеличения размеров выборки найденных кандидатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального центра научных исследований Франции в рамках научного проекта №21-52-15024. Анастасия Лаврухина — стипендиат некоммерческого фонда развития науки и образования «Интеллект».

Библиографические ссылки

- [1] *Günther Maximilian N., Zhan Zhuchang, Seager Sara et al.* Stellar Flares from the First TESS Data Release: Exploring a New Sample of M Dwarfs // *The Astronomical Journal*. — 2020. — Vol. 159, № 2. — P. 60.
- [2] *Tu Zuo-Lin, Wu Qin, Wang Wenbo et al.* Convolutional Neural Networks for Searching Superflares from Pixel-level Data of the Transiting Exoplanet Survey Satellite // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 935, № 2. — P. 90. 2204.04019.
- [3] *Van Doorselaere Tom, Shariati Hoda, Debosscher Jonas.* Stellar Flares Observed in Long-cadence Data from the Kepler Mission // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2017. — Vol. 232, № 2. — P. 26. 1711.02587.
- [4] *Bellm Eric C. et al.* The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2019. — Vol. 131, № 995. — P. 018002. 1902.01932.
- [5] *Bogner M., Stelzer B., Raetz Stefanie.* Effects of flares on the habitable zones of M dwarfs accessible to TESS planet detections // *Astronomische Nachrichten*. — 2022. — Vol. 343, № 4. — P. e210079. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/asna.20210079>.
- [6] *Lavrukhina A.D., Malanchev K.L.* Light curve features extraction from astronomical source // *Astronomy at the epoch of multimessenger studies. Proceedings of the VAK-2021 conference*, Aug 23–28, 2021. — 2022. — Crossref.
- [7] *Bazin G. et al.* The core-collapse rate from the Supernova Legacy Survey // *Astronomy and Astrophysics*. — 2009. — Vol. 499, № 3. — P. 653–660.
- [8] *Лаврухина А. Д., Маланчев К. Л.* Метод автоматического поиска плато на кривых блеска переменных звезд // *Астрономия и исследование космического пространства*. — Екатеринбург, 2022. — С. 39–42.
- [9] *Otsu Nobuyuki.* A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. — 1979. — Vol. 9, № 1. — P. 62–66.