

АКТИВНОСТЬ ДВУХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА С ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ ИЗ ДВИЖУЩЕЙСЯ ГРУППЫ ЗВЕЗД URSA MAJOR И ПОТОКА PSC-ERI

И.С.САВАНОВ

Поступила 18 февраля 2021

Принята к печати 3 мая 2021

На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности двух молодых аналогов Солнца, обладающих планетными системами - звезд HD 63433 (TOI 1726), члена движущейся группы звезд Ursa Major с возрастом 414 млн. лет, и TOI 451 (CD-38 1467) из звездного потока Рыбы-Эридан (Psc-Eri) с возрастом 120 млн. лет. Изучены проявления активности этих звезд с планетными системами. По всем доступным наблюдениям мы выполнили оценку периодов вращения звезд и амплитуд переменности блеска, а также по стандартной методике оценили величины параметра запятанности A в абсолютной мере. Площадь пятен на поверхности HD 63433 и TOI 451 существенно превосходит площадь пятен на Солнце и составляет 24500 м.д.п. и 12600-33200 м.д.п., соответственно. Оценки величин циклов активности TOI 451 были проведены по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey и указали на возможные циклы активности в 125 и 1280 суток. Данные для HD 63433 свидетельствуют о наличии долговременных изменений блеска, но они недостаточны для количественных оценок.

Ключевые слова: *звезды: активность: пятна: фотометрия: переменность: планетные системы*

1. *Введение.* При анализе наблюдательного материала из архива наблюдений космической миссии Кеплер и ее продолжения K2 стали возможны высокоточные фотометрические исследования активности звезд с планетными системами в молодых скоплениях (с возрастом до 1 млрд. лет) (см. в [1]). В таких молодых системах на физические и химические свойства формирующихся планет в значительной мере могут влиять как продолжающийся процесс выпадения планетоземалей, так и магнитная активность центральной молодой звезды (выражающаяся в ее избыточном УФ и рентгеновском излучении, а также в корональных выбросах), которая может изменять физические свойства атмосфер близких планет и даже приводить к разрушению этих атмосфер. В нашем современном понимании демографии экзопланет сильно преобладают более старые планетные системы (>1 млрд. лет), в то время как механизмы формирования и эволюции, ответственные за создание

планет, переживают свои самые быстрые изменения в первые несколько сотен миллионов лет после образования планетных систем. Обзор результатов программы поиска молодых планетных систем был опубликован в [1]. Для того, чтобы в полной мере использовать набор данных миссии K2, авторы [1] провели исследование, названное ими поиск "зодиакальных экзопланет во времени (ZEIT)", с целью выявления, характеристики и изучения статистических свойств близлежащих молодых скоплений, областей звездообразования и ассоциаций ОВ. К настоящему времени в этой серии было опубликовано 10 статей. В ходе анализа были рассмотрены объекты из скоплений Плеяды, Гиады, Ясли и ассоциации Sco-Cen (подгруппа Upper Scorpius). Применение специально разработанной методики позволило в [1] выявить новые планетные системы, принадлежащие членам указанных скоплений. Данные табл.3 из [1] послужили основой для формирования списка объектов исследования.

По мере доступности данных архива наблюдений миссии TESS список пополняется дополнительными объектами. Чтобы исследовать раннюю эволюцию планетных систем, команда TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets (ТНУМЕ) проводит совместный поиск и дальнейший анализ характеристик транзитных планет в молодых звездных ассоциациях (~10-20 млн. лет) и в близлежащих молодых движущихся группах (YMG) (возраст < 200 млн. лет) [2]. Эта программа является естественным продолжением ZEIT.

Ряд примеров наших исследований активности звезд из данного списка можно найти в следующих работах. В [3] нами были представлены результаты изучения М карлика EPIC 210490365 (K2-25, 2MASS J04130560+1514520), расположенного в скоплении Гиады (650-800 млн. лет). С целью дальнейшего исследования молодых звезд с планетными системами были выбраны звезды EPIC 211901114 из скопления Ясли и EPIC 205117205 (K2-33) из подгруппы Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen [4]. В результате анализа мы зарегистрировали 32 и 7 вспышек для EPIC 211901114 и K2-33, соответственно, а также оценили частоты и амплитуды этих вспышек, времена их возгорания и угасания. Получены оценки энергии вспышек: $1.3 \cdot 10^{32} \div 2.5 \cdot 10^{33}$ и $1.6 \cdot 10^{32} \div 2.0 \cdot 10^{33}$ эрг для EPIC 211901114 и K2-33, соответственно. В дальнейшем было проведено исследование активности пяти молодых звезд, обладающих планетными системами: K2-231, EPIC 219388192, K2-136, Kepler-66 и Kepler-67 [5]. Возраст этих объектов был определен по их принадлежности к скоплениям. Было изучено положение объектов на диаграммах S -возраст, S -период вращения и S -числа Россби (S - доля запятненной поверхности звезды), сделан вывод о его соответствии общему характеру зависимостей, установленных нами ранее для 1570 М карликов [6], а затем для 18000 звезд из [7].

В настоящей работе представлены результаты анализа переменности блеска

HD 63433 (TOI 1726, TIC 130181866), яркого молодого аналога Солнца - члена движущейся группы звезд Ursa Major с возрастом 414 млн. лет [8], и карлика солнечного типа TOI 451 (CD-38 1467) из звездного потока Psc-Eri с возрастом 120 млн. лет [9]. Полученные результаты сопоставлены с данными об изученных нами ранее звезд солнечного типа с планетными системами из молодой ассоциации Tuc-Hor - DS Tuc и AB Pic [10,11].

2. Звезды с планетными системами в молодых движущихся группах. Космическая миссия TESS предоставляет уникальную возможность для исследования фотометрической переменности блеска звезд (в том числе с планетными системами) в молодых движущихся группах YMG (см., например [8]). YMG являются динамически несвязанными ассоциациями звезд, которые идентифицированы на основе их общего движения. Возраст YMG достигает 300 млн. лет, что позволяет изучать объекты в непрерывном диапазоне возрастов, в отличие от анализа молодых звездных скоплений. По плотности звезд YMG также отличаются от высокоплотных звездных скоплений, таких как Ясли или Плеяды. Кластеры YMG менее компактны, и поэтому звездные динамические взаимодействия в них встречаются реже. Как следствие, их свойства могут быть более характерными для предшественников экзопланетных систем, которые вращаются вокруг типичных звезд поля. Динамические исследования показывают, что звездные взаимодействия в открытых скоплениях вряд ли разрушают планетные системы, но более мягкие воздействия, такие как изменения эксцентриситета планетных орбит, вполне возможны. Большинство известных YMG значительно менее отдалены, чем звездные скопления, что обеспечивает дополнительные преимущества для нахождения детальных характеристик экзопланетных систем в YMG с помощью таких методов, как транзитная спектроскопия и измерения лучевой скорости.

В [10] мы исследовали звезду DS Tuc, члена Tuc-Hor YMG с близкой экзопланетой с радиусом между радиусами Нептуна и Сатурна. По нашей оценке период вращения звезды равен 2.85 суток. Методом решения обратной задачи восстановления карт поверхностных температурных неоднородностей проведен детальный анализ кривой блеска. На поверхностных картах имеются концентрации пятен на двух долготах. Положения и размеры пятен претерпевают изменения и временами нестабильны. Доля запятненной поверхности звезды S составляет величину порядка 3.3%. Впервые получена оценка возможного цикла активности DS Tuc в 1610 сут (4.4 года) по наблюдениям All Sky Automated Survey.

В [11] нами были представлены результаты анализа активности карлика спектрального класса K1 AB Pic (HD 44627) - члена Tuc-Hor ассоциации, обладающего удаленной планетой. За интервал наблюдений с миссией TESS

на звезде было зарегистрировано 48 вспышек с энергией до $3.4 \cdot 10^{35}$ эрг. Мы получили оценки периода вращения звезды (3.86 сут) и величин параметра запятненности A , меняющихся в пределах от 54000 до 95000 м.д.п. Возможно, площадь пятен на поверхности звезды циклически менялась с характерным временем 233 сут, аналогом которых может быть периодичность Ригера на Солнце. Оценки более длительных циклов активности AB Pic указали на возможные циклы активности в 258 сут, 1120 сут (3.1 года) и 2640 сут (7.2 года). Наконец, были выполнены оценки диапазона возможных изменений величины массы корональных выбросов (CME) для этой звезды.

Таким образом, можно заключить, что изучение молодых планетных систем, возраст которых определяется по их принадлежности к скоплениям, молодым ассоциациям, потокам, может дать представление об эволюции планетарных атмосфер и их состава, а также об изменениях архитектуры планетных систем.

3. Система HD 63433 из движущейся группы звезд Ursa Major. Авторы [8] опубликовали результаты открытия двух планет у звезды HD 63433 (TOI 1726, TIC 130181866), молодого аналога Солнца с массой $0.99 \pm 0.03 M_{\odot}$. Звезда принадлежит к карликам спектрального класса G5IV, ее блеск в фильтрах В и V составляет $7^m.59$ и $6^m.91$, соответственно. Объект отождествлен с рентгеновским источником IRSX J074955.3+272152, согласно [8] его рентгеновская светимость равна $L_x/L_{bol} = 9.1 \cdot 10^{-5}$. На основе анализа кинематических свойств, содержания лития и оценок периода вращения в [8] подтверждено, что HD 63433 является членом движущейся группы звезд Ursa Major, возраст которых составляет 414 ± 23 млн. лет. Основываясь на кривой блеска из архива миссии TESS и обновленных данных о звездных параметрах, в [8] были получены оценки радиусов планет, которые составили 2.15 и 2.67 радиусов Земли и орбитальные периоды 7.11 и 20.55 сут. Согласно [8], эффективная температура звезды равна 5640 K, а $\log g = 4.59$.

Для HD 63433 в архиве TESS имеются данные одного сета наблюдений с временным разрешением в 2 мин. Наша обработка была аналогична проводимой ранее в случае измерений для других объектов из архива космического телескопа Кеплер и из архива наблюдений миссии TESS (см., например, [12,13]). На рис.1 представлены: кривая блеска HD 63433 по наблюдениям в секторе 20, соответствующий спектр мощности и фазовая диаграмма. Хорошо заметна периодическая модуляция блеска, обладающая заметной переменностью амплитуды.

На построенном нами по всему набору данных спектре мощности имеется широкий пик, соответствующий величине периода вращения звезды $P = 6.47 \pm 0.15$ сут. Возможно присутствие неразрешенного пика с величиной

P_1 порядка 8.5 сут, природа которого не ясна. Значительная разница между P и P_1 не позволяет рассматривать дифференциальное вращение в качестве причины появления P_1 , хотя по форме изменения блеска звезды (рис.1, слева), можно предположить, что звезда обладает дифференциальным вращением (оценка величины его параметров не представляется возможной). В [8] была приведена величина периода вращения HD 63433 – 6.45 ± 0.05 сут, совпадающая с полученной нами.

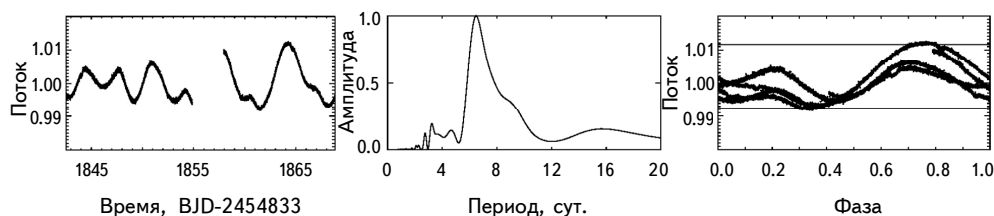


Рис.1. Слева - кривая блеска для HD 63433, в центре - спектр мощности переменности блеска, справа - фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторе 20.

Амплитуда переменности блеска лежит в пределах 1-2% от уровня среднего блеска звезды. По стандартной методике нами были оценены величины параметра запятненности HD 63433, которые достигают 3% от площади поверхности звезды. Принимая оценку радиуса звезды $R = 0.912 \pm 0.034$ радиусов Солнца из [8], можно получить величину площади поверхности A звезды в абсолютной мере (в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.). На Солнце средние по размерам пятна имеют площадь 10-200 м.д.п. (детали см. в [14]). Площадь пятен на поверхности HD 63433 многократно превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и составляет величину порядка 24500 м.д.п.

4. Система TOI 451 из звездного потока Psc-Eri. Авторы [9] представили результаты открытия и изучения молодой планетной системы TOI 451 (CD-38 1467, TIC 257605131). TOI 451 является членом звездного потока Psc-Eri, по принадлежности к нему определен возраст звезды - 120 млн. лет. В [9] было подтверждено членство звезды в потоке по ее кинематике, содержанию лития, вращению и УФ-избытку. TOI 451 является членом широкой двойной пары с компаньоном (TOI 451 B), вероятно, также двойным М карликом. По наблюдаемым транзитам авторы [9] сделали вывод о наличии около звезды трех планет с периодами обращения 1.9, 9.2 и 16 сут с радиусами 1.9, 3.1 и 4.1 радиусов Земли, соответственно. Звезда имеет почти солнечную массу, близкие к солнечным параметры атмосферы: $T_{эфф} = 5481$ и ускорение силы тяжести $\log g = 4.56$.

Блеск TOI 451 составляет в фильтрах $V=11^m.0$ и $H=9^m.3$, соответственно. Система обладает инфракрасным избытком, указывающим на наличие диска [9].

Для TOI 451 в архиве TESS имеются данные трех сетов наблюдений - 4, 5 и 31.

В течение первых двух сетов наблюдений звезда проявляла меньшую активность по сравнению с последним сетом, отстоящим по времени от первых на 720 сут. За указанный промежуток времени активность звезды претерпела значительные изменения. Переменность блеска в сетах 5 и 4 была менее регулярной, о чем свидетельствуют спектры мощности (средние диаграммы на рис.2). Период вращения звезды ($P=5.2$ сут) наиболее явно проявляется лишь в течение последнего сета, а в сете 4 доминирующим является период $P/2$, составляющий 2.6 сут.

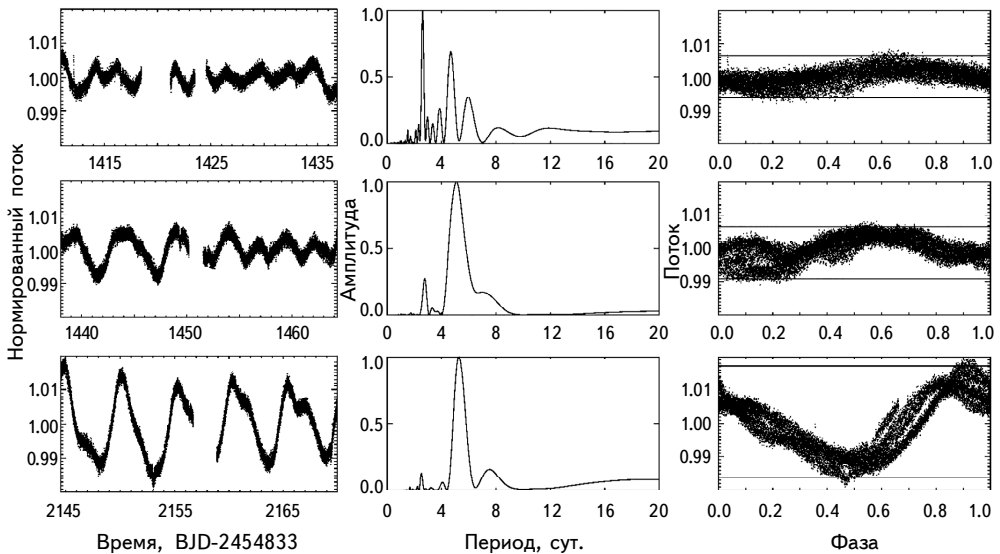


Рис.2. Слева - кривая блеска для TOI 451, в центре - спектр мощности переменности блеска, справа - фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 4, 5 и 31.

Амплитуда переменности блеска звезды изменяется от 0.5 до 1.5% от уровня среднего блеска. Как и в случае HD 63433, мы оценили изменения величины параметра запятненности TOI 451, которые достигают 3% от площади ее поверхности. Принимая оценку радиуса звезды $R=0.912 \pm 0.034$ радиусов Солнца из [8], можно получить величину площади поверхности A звезды в абсолютной мере (в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.). Площадь пятен на поверхности TOI 451 превосходит площадь пятен на Солнце и лежит в пределах 12600-33200 м.д.п.

5. *Циклы активности.* Оценка возможных циклов активности HD 63433 и TOI 451 была проведена по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey www.astrouw.edu.pl/asas. Всего было рассмотрено 120 и 695 оценок блеска звезд в фильтре V. Данные для HD 63433 несомненно указывают на наличие долговременных изменений блеска, но они слишком малочисленны, чтобы на их основе сделать количественные заключения о

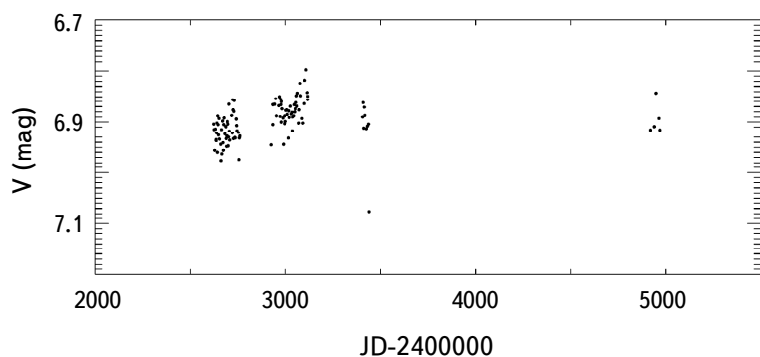


Рис.3. Кривая блеска HD 63433 по данным из архива наблюдений All Sky Automated Survey.

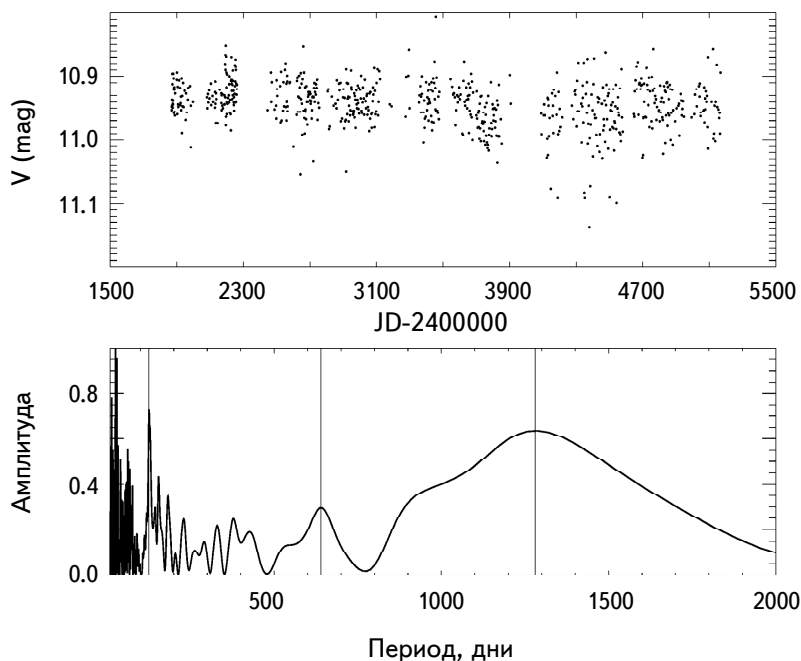


Рис.4. Вверху - кривая блеска TOI 451 по данным из архива наблюдений All Sky Automated Survey. Внизу - спектр мощности для диапазонов периодов 1-2000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 125, 640 и 1280 сут.

величине цикла активности звезды (рис.3). На основе построенного спектра мощности для TOI 451 можно предположить существование возможных циклов активности в 1280 сут, 640 сут (возможно артефакт, половинная величина цикла) и 125 сут (рис.3, нижняя диаграмма).

Необходимы новые фотометрические наблюдения для установления циклов с большей продолжительностью.

Найденные нами циклы активности TOI 451 по своей величине сопоставимы с 1120 сут (3.1 года) и 2640 сут (7.2 года) циклами активности AB Pic [11] и с 4.4-летним циклом активности звезды DS Tuc [10].

6. Заключение. На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности двух молодых аналогов Солнца, обладающих планетными системами - звезд HD 63433 (TOI 1726), члена движущейся группы звезд Ursa Major, и TOI 451, члена звездного потока Psc-Eri. По всем доступным наблюдениям мы выполнили оценку периодов вращения звезд и амплитуды переменности блеска, а также по стандартной методике оценили величины параметра запятненности A в абсолютной мере. Площадь пятен на поверхности HD 63433 и TOI 451 существенно превосходит площадь пятен на Солнце и, соответственно, составляет 24500 м.д.п. и 12600-33200 м.д.п. Установлено, что оба молодых солнечных аналога обладают высокой пятенной активностью.

В табл.1 приведены основные сведения о свойствах исследуемых нами звезд, данные для DS Tuc взяты из [10], а для AB Pic - из [11]. Однако согласно результатам табл.1 можно заключить, что активность двух более молодых объектов DS Tuc и AB Pic выше (они вращаются быстрее и имеют большие значения параметра запятненности A), чем у рассматриваемых звезд HD 63433 и TOI 451.

Несомненно, обе изученные нами планетные системы (в особенности, HD 63433 вследствие своей яркости) открывают прекрасные перспективы для транзитной спектроскопии как с помощью Космического телескопа Хаббла и Космического телескопа Джеймса Уэбба, так и, в перспективе, космической миссии Спектр-УФ. Предполагаемые исследования предоставят возможность изучения атмосфер планет, которые, вероятно, все еще находятся в процессе

Таблица 1

	HD 63433	TOI 451	DS Tuc	AB Pic
$T_{эфф}$, К	5640	5481	5428	5027
P , сут.	6.47	5.20	2.85	3.86
A , м.д.п.	24500	12600-33200	66700	54000-95000
P цикл., сут.	-	125, 640, 1280	1610	258, 1120, 2640
Возраст, млн. лет	414	120	45	45

своей эволюции. Таким образом, рассмотренные системы могут сыграть важную роль в нашем понимании эволюции планетарных систем в течение первого миллиарда (и даже нескольких сотен миллионов) лет после их образования.

Автор признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039) (Разделы статьи 2, 3 и 5).

Учреждение Российской академии наук Институт астрономии РАН,
Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

ACTIVITY OF TWO YOUNG SOLAR-TYPE STARS WITH PLANETARY SYSTEMS FROM URSA MAJOR MOVING GROUP AND PSC-ERI STREAM

I.S.SAVANOV

Using high-precision data from archive of the TESS space mission the photometric variability of two young Solar analogues with planetary systems - stars HD 63433 (TOI 1726), a member of the Ursa Major moving group of stars with an age of 414 million years, and TOI 451 (CD-38 1467) from the Pisces-Eridani star stream (Psc-Eri) with an age of 120 million years, was studied. The manifestations of the activity of these stars with planetary systems are studied. From available observations we estimated the rotation periods of the stars and the amplitude of the brightness variability. Using the standard method, we estimated the values of the spot parameter A in absolute measure. The area of spots on the surface of HD 63433 and TOI 451 significantly exceeds the area of spots on the Sun and is 24500 m.s.h. and 12600-33200 m.s.h., respectively. Estimates of TOI 451 activity cycle were done from data from the All Sky Automated Survey observation archive and indicated possible activity cycles of 125 and 1280 days. The data for HD 63433 possess long-term changes in brightness but they are insufficient for quantitative estimates.

Keywords: *stars: activity: spots: photometry: variability: planetary systems*

ЛИТЕРАТУРА

1. *A.C.Rizzuto, A.W.Mann, A.Vanderburg et al.*, Astron. J., 154, **22**, 2017.
2. *E.R.Newton, A.W.Mann, B.M.Tofflemire et al.*, Astrophys. J. Lett., **880**, L17, 2019.
3. *E.S.Dmitrienko, I.S.Savanov*, Astron. Rep., **61**, 871, 2017.
4. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko, S.Karmakar et al.*, Astron. Rep., **62**, 532, 2018.
5. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **63**, 595, 2019.
6. *E.S.Dmitrienko, I.S.Savanov*, Astron. Rep., **61**, 122, 2017.
7. *T.Reinhold, L.Gison*, Astron. Astrophys., **583**, A65, 2015.
8. *A.W.Mann, M.C.Johnson, A.Vanderburg et al.*, Astron. J., **160**, 179, 2020.
9. *E.R.Newton, A.W.Mann, A.L.Kraus et al.*, Astron. J., **161**, 65, 2021.
10. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Lett., **46**, 177, 2020.
11. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Lett., **47**, 2021 (в печати).
12. *I.S.Savanov, N.G.Gladilina, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **60**, 1006, 2016.
13. *I.S.Savanov*, Astrophysics, **62**, 513, 2019.
14. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Pevtsov*, Astrophys. J., **833**, 94, 2016.