

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.4-537

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ МОЛОДОЙ ЗВЕЗДЫ HIP 94235 ИЗ ДВИЖУЩЕЙСЯ ГРУППЫ AB DORADUS

И.С.САВАНОВ

Поступила 14 сентября 2022

Принята к печати 11 ноября 2022

На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности блеска HIP 94235 – яркой звезды, входящей в движущуюся группу AB Doradus с возрастом 120 млн лет. Мы получили оценку периода вращения звезды и амплитуды переменности блеска, а также по стандартной методике оценили величину параметра запятненности A в абсолютной мере, которая составляет 31750 м.д.п. и существенно превосходит площадь пятен на Солнце. За интервал наблюдений с космической миссией TESS проявления вспышечной активности у HIP 94235 отсутствовали. Для каждого сектора наблюдений, последовательно охватывающего один период вращения звезды, из решения обратной задачи восстановления температурных неоднородностей звезды по кривой блеска получены карты поверхностных температурных неоднородностей, определены положения активных областей и изучена их эволюция со временем. По относительному различию в смещениях активных областей оценена величина параметра дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega = 0.038 \pm 0.07$ рад/сут. Полученные результаты сопоставлены с данными о другой, изученной нами ранее, молодой звезде солнечного типа с экзопланетой TOI 837, члене южного скопления IC 2602 с возрастом 35 млн лет.

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

1. *Введение.* В настоящее время группа исследователей THYME (TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets), проводит 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) (см. в [1]). Эта программа является естественным продолжением обзора ZEIT – поиск "зодиакальных экзопланет во времени". Статья [1] является уже восьмой по счету в серии публикаций THYME, в ней выполнено исследование двух систем KOI-3876 и Kepler-970 из молодой ассоциации MELANGE-3 с возрастом 105 ± 10 Myr.

Ряд примеров наших исследований активности звезд из объектов программ ZEIT и THYME можно найти в предыдущих работах (см. их краткое описание в [2]). Были изучены проявления пятенной и вспышечной активности объектов. На основании изучения диаграмм, связывающих площадь холодных пятен с возрастом, периодом вращения и числами Россби, нами был сделан

вывод о наличии общего характера зависимостей, установленных ранее для М карликов и звезд солнечного типа.

В настоящей работе представлены результаты анализа переменности блеска звезды HIP 94235, входящей в хорошо известную движущуюся группу AB Doradus с возрастом 120 млн лет [3], и сопоставления с данными исследования TOI 837 - молодой G0/F9 V звезды с экзопланетой из южного скопления IC 2602 с возрастом 35 млн лет.

2. HIP 94235 - молодая звезда - член группы AB Doradus.

Авторы [3] опубликовали результаты открытия планеты размером с мини-нептун у яркой звезды HIP 94235 ($V=8^m.3$), входящей в движущуюся группу AB Doradus с возрастом 120 млн лет, одну из самых молодых и близких звездных ассоциаций. Молодость звезды подтверждается авторами [3] по ее спектральным и фотометрическим характеристикам, таким как быстрое вращение и значительная фотометрическая модуляция, эквивалентная ширина линии лития и рентгеновское излучение. Неглубокие транзиты HIP 94235b (их глубина составляет 600 мд) были выявлены в единственном секторе наблюдений, полученных миссией TESS. Последующие наблюдения были выполнены с помощью космического телескопа CHEOPS и позволили подтвердить существование транзитов и улучшить способность прогнозировать будущее время транзитов для последующих исследований. Планета HIP 94235b имеет радиус около 3 радиусов Земли, период ее обращения равен 7.7 сут.

HIP 94235 является молодым аналогом нашего Солнца, ее масса составляет $M=1.08 \pm 0.11$ масс Солнца. Звезда принадлежит к карликам спектрального класса G1V, блеск в фильтрах B и V составляет $8^m.90$ и $8^m.347$, соответственно. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 6632318361397624960, его параллакс составляет π (mas) = 17.0609 ± 0.0365 . На основе анализа кинематических свойств, содержания лития и оценок периода вращения в [3] подтверждено, что HIP 94235 является членом движущейся группы AB Doradus, возраст которой составляет 120 млн лет.

Звезда HIP 94235 отождествлена с X-гау источником J191057.9 - 601611 из каталога 2nd ROSAT PSPC Catalog. Рентгеновская светимость HIP 94235 составляет $\log(L_x/L_{bol}) = -3.93 \pm 0.13$. Эффективная температура звезды равна 5991 ± 50 K, а логарифм ускорения силы тяжести составляет 4.46 ± 0.05 . Отметим, что перечисленные нами свойства звезды HIP 94235 приводятся согласно данным, указанным в [3] (табл.3) и в астрономической базе данных *Simbad*. HIP 94235 входит в двойную систему - второй компонент является звездой спектрального класса M с массой $0.26 \pm 0.04 M_{\odot}$. Расстояние между компонентами составляет около 60 а.е. Это одна из наиболее тесных систем с экзопланетой вокруг одной из компонент.

Для HIP 94235 в архиве TESS имеются данные 27-го сектора наблюдений. 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, [2]). На рис.1 представлены:

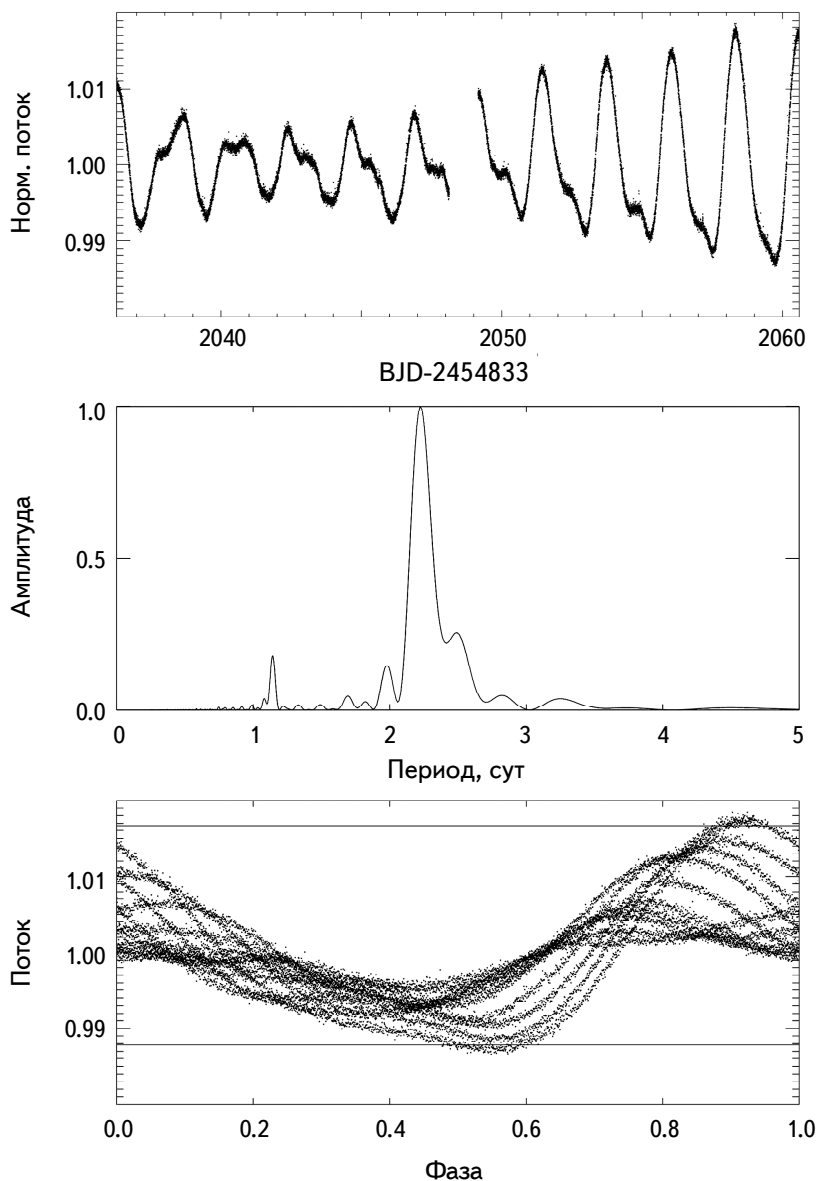


Рис.1. Сверху вниз: кривая блеска для HIP 94235, спектр мощности переменности блеска, фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторе 27.

кривая блеска HIP 94235, соответствующий спектр мощности и фазовая диаграмма. Хорошо заметна периодическая модуляция блеска, обладающая заметной переменностью амплитуды. К концу сектора наблюдений звезда увеличила свою активность. На шкале времени порядка длительности наблюдений в одном секторе (около 30 суток) форма фазовой кривой и положения максимумов и минимумов претерпевали значительные изменения.

На построенных нами спектрах мощности имеется характерный пик, соответствующий величине периода вращения звезды $P = 2.223 \pm 0.065$ сут (погрешность оценена по полуширине пика). Авторами [3] была приведена, совпадающая с полученной нами, величина периода вращения HIP 94235 - 2.24 ± 0.11 сут.

Рассчитанные спектры мощности указывают на достаточно сложный характер изменений блеска изучаемой звезды. На спектре мощности центральный пик $P = 2.223$ сут имеет несимметричную форму, помимо него имеется пик меньшей амплитуды, соответствующий величине 2.500 сут, происхождение которого может быть связано (см. в [4]) с наличием у звезды, обладающей дифференциальным вращением, пятен (или групп пятен), расположенных на различных широтах. При этом изменения периодов переменности блеска могут соответствовать не только изменениям положений пятен по широте, но и эволюции (появлению и исчезновению) активных областей, лежащих на различных широтах на поверхности звезды. По методике, опубликованной в [4] для определения параметров дифференциального вращения 12300 звезд по наблюдениям с телескопом Кеплер, с найденными нами периодами мы вычислили возможное значение параметра дифференциального вращения звезды - $\Delta\Omega$.

Для HIP 94235 указанный подход привел к оценке параметра $\Delta\Omega = 0.31 \pm 0.14$ рад/сут, которая существенно выше солнечной величины, теоретических предсказаний из [5] и эмпирической зависимости из [6], но в пределах погрешности определений все еще сопоставима с максимальными оценками для звезд температурного диапазона 5800 - 6000 К из [4]. Тем не менее, с учетом того, что оценка параметра получена всего по одному сектору наблюдений продолжительностью 24 сут, а также, поскольку независимо найденная из анализа эволюции положений пятен на поверхности звезды (см. ниже) величина параметра $\Delta\Omega$ имеет отличающееся значение, мы не рассматриваем полученную оценку, как достоверную. Причина происхождения пика, соответствующего периоду в 2.500 сут, требует дальнейшего изучения.

Кроме того, на спектре мощности имеются пики в диапазоне, соответствующем половинному фотометрическому периоду вращения звезды, что свидетельствует о присутствии на поверхности звезды двух активных областей,

отстоящих друг от друга примерно на 180 градусов (см. ниже - поверхностные карты).

Амплитуда переменности блеска составляет около 2.5% от уровня среднего блеска звезды. По стандартной методике (см. в [2]) нами были оценены величины параметра запятненности HIP 94235, которые достигают 3.6% от площади поверхности звезды. Принимая оценку радиуса звезды $R = 1.08 \pm 0.11$ радиусов Солнца из [3], можно получить величину площади поверхности пятен 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 [7]). Площадь пятен на поверхности HIP 94235 многократно превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и составляет величину порядка 31750 м.д.п.

3. Температурные карты поверхности HIP 94235. Дальнейший анализ фотометрической переменности звезды был выполнен нами с фотометрическим периодом, составляющим 2.223 сут. Весь наблюдательный материал был разделен на 10 секторов, каждый из которых последовательно охватывает один период вращения звезды. Неполные секторы (а также сектор 5 с искаженными данными) не рассматривались, поскольку они не давали возможности оценить положения активных долгот (см. ниже).

Как и в наших предыдущих исследованиях карликов поздних спектральных классов мы выполнили анализ каждой индивидуальной кривой блеска с помощью программы iPH [8]. Программа решает обратную задачу восстановления температурных неоднородностей на поверхности звезды по кривой блеска в двухтемпературном приближении (интенсивность излучения от каждой элементарной площадки на поверхности звезды складывается из двух компонентов: фотосферы и холодного пятна). Описание программы и ее тесты представлены в [8]. Как указывалось выше, мы приняли температуру звезды равной 5991 K [3], а величину $\log g = 4.46$. Поскольку исследуемую нами звезду можно рассматривать как молодой аналог Солнца, температуру запятненной поверхности мы считаем равной температуре солнечного пятна - ниже температуры фотосферы на 1500 K.

Согласно нашей методике, для каждой элементарной площадки размером $6^\circ \times 6^\circ$ на поверхности звезды был определен фактор заполнения f (доля поверхности элементарной площадки, занимаемая пятнами). На рис.2 представлены результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности HIP 94235 для 10-ти секторов наблюдений (сектор 5 не рассматривается). На рисунке также приведены наблюдаемые и теоретические (построенные по восстановленной модели) кривые блеска. Если на поверхностных картах имеются концентрации пятен на двух долготах - их

значения регистрировались нами как две независимые активные долготы. Погрешность определений положений активных долгот составляет величину порядка около 0.06-0.08 в единицах фазы.

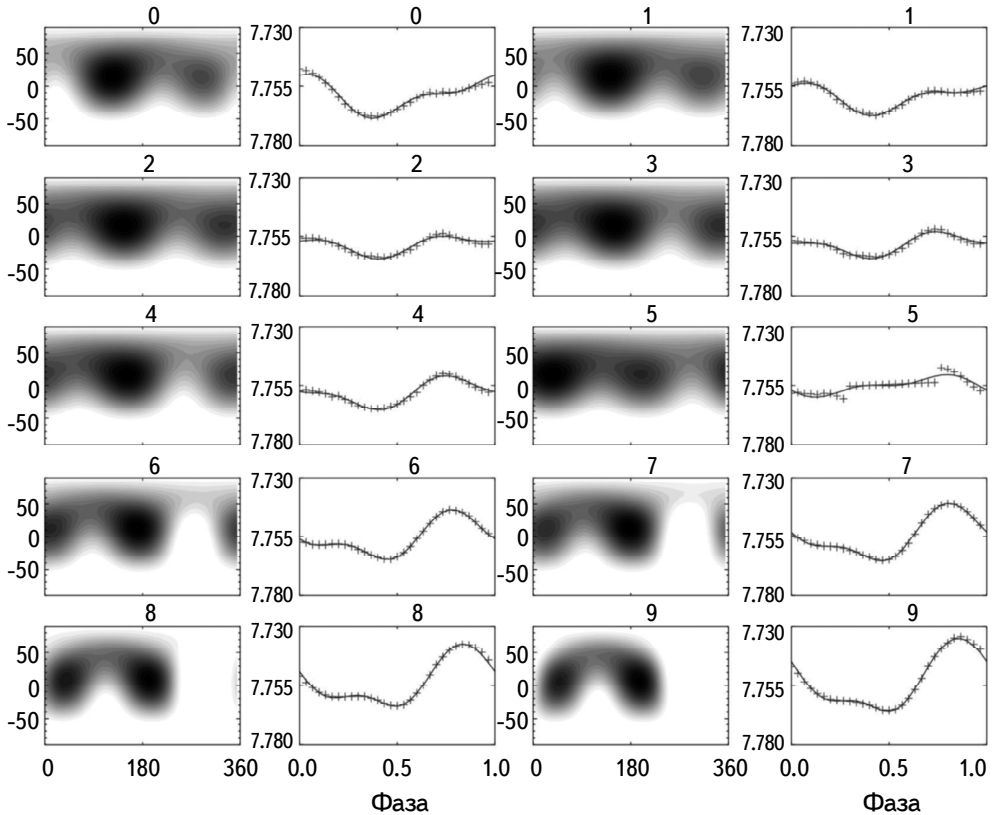


Рис.2. Результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности HIP 94235 для 10-ти секторов наблюдений. Карты поверхности представлены в единой шкале, более темные области на рисунках соответствуют более высоким значениям факторов заполнения f . На этом же рисунке также приводятся наблюдаемые кривые блеска и теоретические кривые блеска - построенные по восстановленной модели.

Поскольку согласно [3], величина угла i наклона оси вращения звезды к лучу зрения превосходит 70° , мы первоначально выполнили вычисления с $i = 70^\circ$. Затем, восстановление карт температурных неоднородностей было проведено нами еще для двух значений i (80° и 87°), которые могут рассматриваться как предельные значения. Как оказалось, в случае всех трех указанных величин i различия в картах не изменяют сделанных нами заключений (см. ниже) о положении и эволюции активных областей на поверхности HIP 94235. Мы проанализировали распределения факторов заполнения f в зависимости от времени и от долготы на поверхности звезды

(см. рис.3). На рис.3 хорошо прослеживаются положения двух активных долгот, отстоящих друг от друга примерно на 180° . Положения более активной (большей по площади) области отмечены кружками с величинами характерных погрешностей измерений, а менее активной - символами плюс. Согласно нашим вычислениям, обе области не остаются неподвижными, а обладают постоянным смещением, как правило, против направления вращения звезды. По относительному различию в смещениях активных областей мы нашли независимую оценку величины параметра дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega = 0.038 \pm 0.070$ рад/сут. Эта оценка примерно в два раза меньше, чем величина $\Delta\Omega$ для Солнца, но сопоставима с другими определениями этого параметра для звезд температурного диапазона 5800 - 6000 К [4]. На наш взгляд, полученное значение параметра $\Delta\Omega$ является более достоверным, чем было найдено выше по расщеплению пика на спектре мощности.

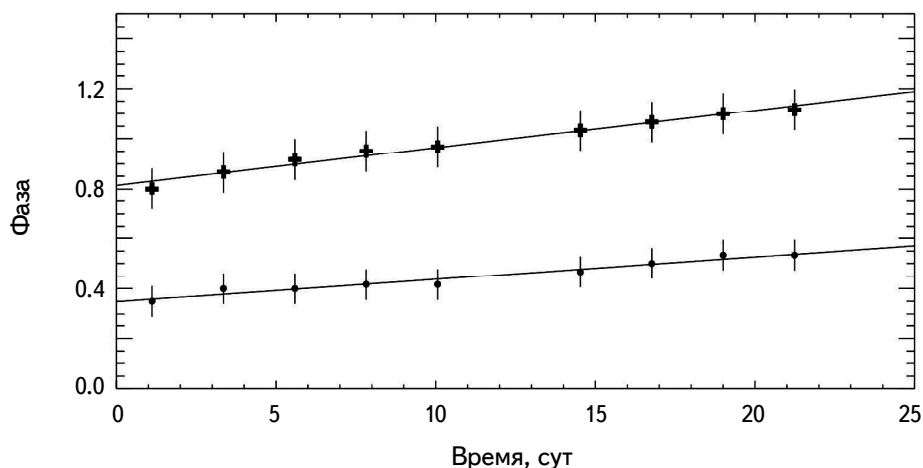


Рис.3. Положения двух систем активных областей на поверхности HIP 94235. Положения более активной области представлены кружками, менее активной - символами плюс. Представлены погрешности определений положений активных областей.

4. *Циклы активности.* Оценка возможных циклов активности HIP 94235 была проведена по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey - www.astrouw.edu.pl/asas. Всего было рассмотрено 956 оценок блеска звезды в фильтре V. Представленные на рис.4 (вверху) данные несомненно свидетельствуют о присутствии цикличности в изменении блеска звезды. Вероятно, величина цикла превосходит длительность наблюдений обзора. На основе построенного спектра мощности для HIP 94235 можно предположить существование возможных циклов активности более 4000 - 4200 сут (11 - 11.5 лет) и менее значимых циклов в 400 сут и 1600 сут (рис.4, нижняя диаграмма). Цикл продолжительностью 400 сут отличается от годового

цикла (штриховая линия), который обычно имеет происхождение наблюдательного характера.

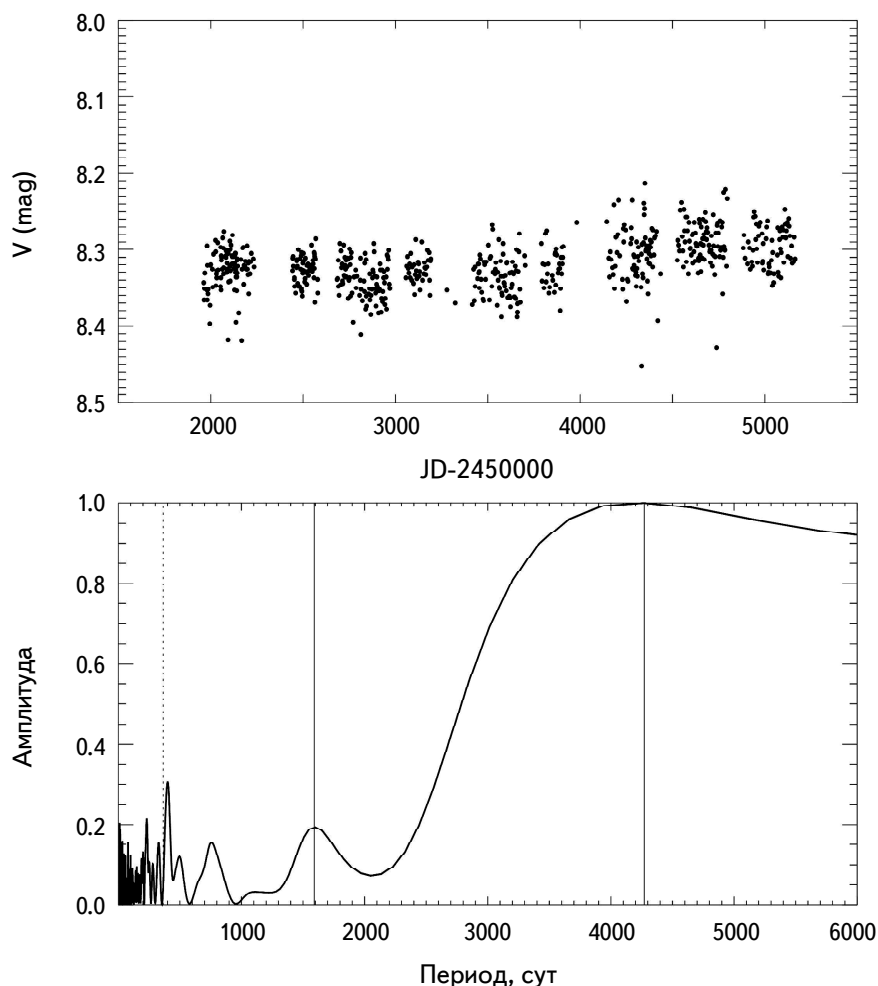


Рис.4. Вверху - кривая блеска HIP 94235 по данным из архива наблюдений All Sky Automated Survey. Внизу - спектр мощности для диапазонов периодов 1-6000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 4200 и 1600 сут. Годовой цикл продолжительностью 365 сут отмечен штриховой линией.

5. *Сопоставление активности звезд HIP 94235 и TOI 837.*

Ранее в [9] на основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS нами были представлены результаты исследования фотометрической переменности блеска TOI 837 - молодой G0/F9 V звезды с экзопланетой - члена южного скопления IC 2602 возрастом 35 млн лет [10]. Как и HIP 94235, TOI 837 можно рассматривать как прототип молодого Солнца. Обе звезды обладают экзопланетами. Эффективная температура TOI

837 равна 6047 ± 162 K, а логарифм ускорения силы тяжести $\log g = 4.467 \pm 0.049$. HIP 94235 обладает очень близкими параметрами - ее эффективная температура равна 5991 ± 50 K, а ускорение силы тяжести составляет 4.46 ± 0.05 . TOI 837 принадлежит к карликам спектрального класса G0/F9 V, а HIP 94235 - к карликам спектрального класса G1V. Оба объекта достаточно яркие и перспективны для дальнейших наблюдений - блеск для HIP 94235 и TOI 837 в фильтре V составляет $8^m.347$ и $10^m.64$, соответственно.

Молодые аналоги Солнца вращаются существенно быстрее Солнца, период вращения HIP 94235 равен $P = 2.223 \pm 0.065$ сут, а TOI 837 - 2.99 ± 0.08 сут.

Площади пятен A на поверхности исследуемых звезд сопоставимы между собой, но существенно превосходят площадь пятен на Солнце, для TOI 837 величина A находится в интервале от 21600 м.д.п. до 37700 м.д.п., а для HIP 9423 равна 31750 м.д.п.

Наконец, имеется различие в результатах оценок вспышечной активности рассматриваемых звезд. В [9] нами были исследованы проявления вспышечной активности TOI 837 за интервал наблюдений в четырех секторах с космической миссией TESS и рассмотрены две наиболее достоверные зарегистрированные вспышки. Энергия вспышек составляют $1.2 \cdot 10^{35}$ эрг и $2.1 \cdot 10^{35}$ эрг, а вероятная величина массы сопутствующего явления коронального выброса массы может достигать $2.5 \cdot 10^{21}$ г. Для HIP 94235 за интервал наблюдений в 27-м секторе с космической миссией TESS общей длительностью около 30 сут вспышек не было зарегистрировано.

Оценки величин циклов активности TOI 837 были проведены по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey и указали на наиболее вероятный цикл активности в 1500 сут (4.1 года). На основе построенного спектра мощности для HIP 94235 можно предположить существование возможного цикла активности 4000 - 4200 сут (11 - 11.5 лет) и менее значимых циклов в 400 сут и 1600 сут.

6. Заключение. На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности блеска HIP 94235 - яркой звезды ($V = 8^m.3$), входящей в движущуюся группу AB Doradus возрастом 120 млн лет [3]. Полученные результаты сопоставлены с данными о другой изученной нами ранее молодой звезде солнечного типа с экзопланетой - TOI 837 (G0/F9 V) - члена южного скопления IC 2602 возрастом 35 млн лет.

По наблюдениям TESS мы нашли период вращения и амплитуду переменности блеска HIP 94235, а также по стандартной методике оценили величину параметра запятненности A в абсолютной мере. Площадь пятен на ее поверхности составляет 31750 м.д.п. и существенно превосходит площадь

пятен на Солнце. Установлено, что для HIP 94235 за интервал наблюдений с космической миссией TESS проявления вспышечной активности отсутствовали.

Для каждого сектора наблюдений, последовательно охватывающего один период вращения звезды, из решения обратной задачи восстановления температурных неоднородностей звезды по кривой блеска получены карты поверхностных температурных неоднородностей. По построенным картам мы определили положения активных областей и изучили их эволюцию со временем. По относительному различию в смещениях активных областей мы нашли оценку величины параметра дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega = 0.038 \pm 0.07$ ад/сут.

Рассмотренные нами системы HIP 94235 и TOI 837 могут сыграть важную роль в понимании эволюции планетарных систем в течение первой сотни миллионов лет после их образования. Мини-нептун HIP 94235b является планетой радиусом порядка 3 радиусов Земли и периодом обращения 7.7 сут. Планеты, подобные HIP 94235b, лежащие вблизи "пустыни экзопланет - нептонов с короткими орбитальными периодами", могут обеспечить ключевые наблюдательные тесты для изучения механизмов потери массы на молодых планетах. HIP 94235b и другие недавно открытые планеты вокруг молодых звезд подвергаются значительному излучению высокой энергии, которое может быть основной причиной быстрой потери массы планетарной оболочки сразу после образования. Чтобы оценить эволюцию потери массы HIP 94235b, в [3] был использован аналитический подход [11]. Было обнаружено, что текущий радиус HIP 94235b можно воспроизвести с помощью модели, которая имеет высокую начальную массовую долю оболочки и обладает быстрой потерей массы со временем (особенно в первые 100 - 200 млн лет, см. рис.18 в [3]). При этом, в настоящее время скорость потери массы HIP 94235 b по оценке из [3] составляет примерно $5 M_{\oplus}/\text{Gyr}$ ($3 \cdot 10^{19}$ г/год). В итоге массовая доля оболочки может уменьшиться с 10% до 1% от общей массы планеты. Вероятно, такую эволюцию массы и радиуса следует ожидать для многих экзопланет - нептонов и супер-земель, расположенных близко к родительской звезде (в том числе солнечного типа).

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

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

ACTIVITY OF YOUNG STAR HIP 94235 WITH A PLANETARY SYSTEM FROM THE AB DORADUS MOVING GROUP

I.S.SAVANOV

Using high-precision data from archive of the TESS space mission a study of the photometric variability of the brightness of HIP 94235, a bright star belonging to the 120 million years old AB Doradus moving group was done. We estimated the rotation period of the star and the amplitude of the brightness variability, and also estimated the value of the spottedness parameter A in absolute measure which is 31750 MSH, and significantly exceeds the area of spots on the Sun. During the observation interval with the TESS space mission there were no manifestations of the flare activity on HIP 94235. For each set of observations sequentially covering one period of the star's rotation maps of surface temperature inhomogeneities were obtained from solving the inverse problem of restoring the temperature inhomogeneities of the star from the light curve. Positions of the active regions were determined and their evolution over time was studied. The differential rotation parameter of the star $\Delta\Omega = 0.038 \pm 0.07$ rad/d is estimated from the relative difference in the displacements of the active regions. The results obtained are compared with data on another previously studied young solar-type star with the exoplanet TOI 837, a member of the southern cluster IC 2602 with an age of 35 million years.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.G.Barber, A.W.Mann, J.L.Bush et al.*, Astron. J., **164**, 88, 2022.
2. *I.S.Savanov*, Astrofizika, **64**, 178, 2021.
3. *G.Zhou, C.P.Wirth, C.X.Huang et al.*, Astron. J., **163**, 289, 2022.
4. *T.Reinhold, L.Gizon*, Astron. Astrophys., **583**, A65, 2015.
5. *M.Kuker, G.Rudiger*, Astron. Nachr., **332**, 933, 2011.
6. *J.R.Barnes, A.Collier Cameron, J.-F.Donati et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **357**, L1, 2005.
7. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Pevtsov*, Astrophys. J., **906**, id. 27, 2021.
8. *I.S.Savanov, K.G.Strassmeier*, Astron. Nachr., **329**, 364, 2008.
9. *I.S.Savanov*, Astrophys. Bull., **77**, 2022, (в печати).
10. *L.G.Bouma, J.D.Hartman, R.Brahm et al.*, Astron. J., **160**, 239, 2020.
11. *J.E.Owen, Y.Wu*, Astrophys. J., **847**, 29, 2017.