

О ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА А

И.С.САВАНОВ¹, Е.С.КАЛИНИЧЕВА¹, Е.С.ДМИТРИЕНКО²

Поступила 23 апреля 2020

Принята к печати 26 августа 2020

Литературные данные указывают на значительный рост параметра дифференциального вращения $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 К. Из анализа формы кривых блеска и наличия специфического набора пиков на спектрах мощности мы установили, что 47 из 57 исследованных объектов с $T_{\text{эфф}}$ выше 7500 К могут быть отнесены к пульсирующим звездам, и лишь 10 - к звездам с переменностью блеска вследствие вращательной модуляции. После исключения пульсирующих переменных, для звезд с $T_{\text{эфф}}$ выше 7500 К средняя величина $\Delta\Omega = 0.051 \pm 0.01$ рад/сут. Этот вывод не позволяет считать правомерным сделанное нами ранее предположение об интерпретации пиков на спектрах мощности для ROTD звезд, как обусловленных проявлениями возможного дифференциального вращения. Еще одно независимое свидетельство о низком значении параметра $\Delta\Omega$ для звезд спектрального класса А было получено при построении зееман-доплеровских карт для звезды γ Gem - оценка параметра дифференциального вращения звезды составила величину 0.0073 ± 0.0023 рад/сут.

Ключевые слова: *звезды: активность: пятна: фотометрия: переменность: дифференциальное вращение*

1. Введение. Фотометрические наблюдения высокой точности, полученные с космическим телескопом Кеплер, открыли возможность исследования различного рода переменности звезд, в том числе, вызванной их вращательной модуляцией вследствие присутствия пятен на поверхности. Наблюдательные проявления дифференциального вращения (ДВ) звезд могут быть исследованы несколькими методами, их описание и обсуждение полученных результатов можно найти, например, в [1]. В настоящее время широкое применение получил один из них, основанный на анализе различия периодов, установленных по расщеплению пиков в спектрах мощности переменности блеска запятненных звезд. При использовании этого метода в [2,3] были установлены параметры ДВ для представительных выборок с числом звезд в несколько десятков тысяч. Авторы [2,3] по наблюдениям с телескопом Кеплер выполнили анализ кривых блеска 18616 и 12300 объектов, соответственно, и установили величины параметров их дифференциального вращения α и $\Delta\Omega$. Закон дифференциального вращения описывается уравнением вида $\Omega(\theta) = \Omega(\text{eq})(1 - \alpha \sin^2 \theta)$, где θ - широта, $\Delta\Omega = \alpha\Omega(\text{eq})$.

В [2] анализ был проведен на основе данных наблюдений ограниченного временного интервала Q3. Данные [3] были получены по более обширной выборке Q1-Q14. Это наиболее многочисленные однородные данные определений α и $\Delta\Omega$, позволяющие проводить их статистический анализ. Они характеризуют изменения параметров ДВ для объектов в широком диапазоне эффективных температур - от 3200 К до 12000 К. На основании данных, представленных в [3], можно сделать заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд горячее 6700 К, для которых величина параметра $\Delta\Omega$ может достигать 0.6 рад/сут. и выше.

Результаты ряда других исследований также указывают на возможное наличие значительного увеличения величины параметра $\Delta\Omega$ у ряда звезд спектральных классов - А и более ранних. Метод определения параметра ДВ, основанный на спектральных наблюдениях и связанный с анализом фурье-преобразования профилей линий в спектрах быстровращающихся звезд, был развит в исследовании [4] и представлен в серии статей (см. в [5]). Результаты этих исследований находятся в хорошем согласии с данными из [3] для объектов с температурами выше 8000 К.

Кроме того, авторы [6] выполнили оценки параметров ДВ для 2562 звезд спектральных классов К-А. Методика применяемого анализа была основана на частотном анализе и схожа с используемой в [3]. К сожалению, авторы [6] не опубликовали результаты определений параметров ДВ для индивидуальных объектов.

Данные анализа [7] привели к установлению в спектре мощности А-В звезд специфического набора частот, включающего отдельный изолированный пик и массив меньших по амплитуде частично-разрешаемых пиков. В [8] была сделана попытка интерпретировать происхождение пиков на спектрах мощности наличием групп пятен, расположенных на различных широтах звезды, которая обладает ДВ. Найденные в [8] значения $\Delta\Omega$ для 12 звезд типа ROTD лежат в интервале величин 0.45-0.7 рад/сут. Выполненный анализ позволил заключить, что, в принципе, причина появления пиков может быть обусловлена ДВ звезды с пятнами, и в [8] мы не отвергли эту гипотезу.

Новые высокоточные спектрополяриметрические наблюдения звезд спектрального класса А (см., например, [9]) позволяют при исследовании магнитных полей и построении магнитных карт поверхностей этих объектов получить оценки периода вращения P и параметра ДВ $\Delta\Omega$. В случае, если для звезд спектрального класса А величина параметра $\Delta\Omega$ действительно в несколько раз превышает солнечное значение, то его учет, несомненно, необходим при исследовании магнитной активности и при проведении доплер-зеemanовского картирования. Можно заключить, что изучение результатов определений $\Delta\Omega$ для звезд спектральных классов - А и более ранних - до настоящего времени

остается актуальным и продолжает привлекать внимание исследователей.

2. *Анализ дифференциального вращения объектов с температурой фотосферы более 7500 К.* Цель нашего исследования состоит в детальном анализе параметра $\Delta\Omega$ для звезд с температурой фотосферы более 7500 К. Для этого мы рассмотрели данные определений параметров ДВ из [3]. Объектов с $T_{эфф}$ более 7500 К в списке [3] оказалось 57. Для каждого из них по данным архива Кеплер для сета наблюдений Q3 мы построили спектры мощности и проанализировали фазовые диаграммы, соответствующие доминирующему периоду. Примеры рассмотренных диаграмм представлены на рис.1.

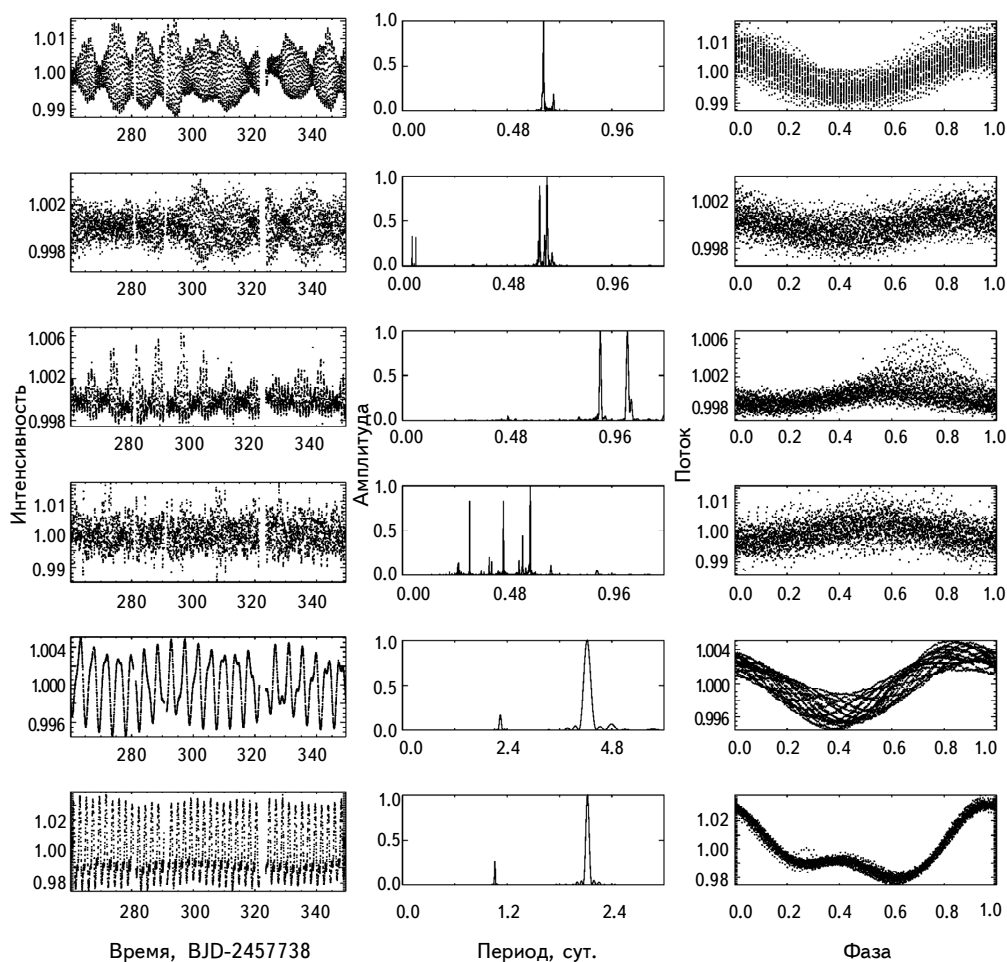


Рис.1. Примеры кривых блеска, спектров мощности и фазовых диаграмм для 6 объектов из [3] с $T_{эфф}$ более 7500 К (пояснения см. в тексте).

Главный результат нашего анализа состоит в том, что значительное количество кривых блеска по своей форме, а спектр мощности по наличию специфического набора пиков, могут быть интерпретированы, как принадлежащие пульсирующим звездам, а не звездам с вращательной модуляцией блеска (ROT). В дополнение к этому, периоды многих таких объектов составляют менее 0.5-0.8 сут. Примеры кривых блеска, спектров мощности и фазовых диаграмм для пульсирующих звезд представлены на диаграммах в верхних 4-х рядах на рис.1. Всего объектов, которые по нашему мнению могут быть отнесены к пульсирующим, оказалось 47 из 57. Три звезды (KIC 3865742, KIC 8177087 и KIC 10558302) могли бы быть отнесены к ROT объектам условно, однако формы их кривых блеска показывают отличия от типичной для звезды с вращательной модуляцией блеска, эти звезды имеют на спектре мощности пики с большей полушириной. Лишь остальные 10 могут рассматриваться как объекты с вращательной модуляцией блеска (в качестве примеров см. 2 нижних ряда на рис.1).

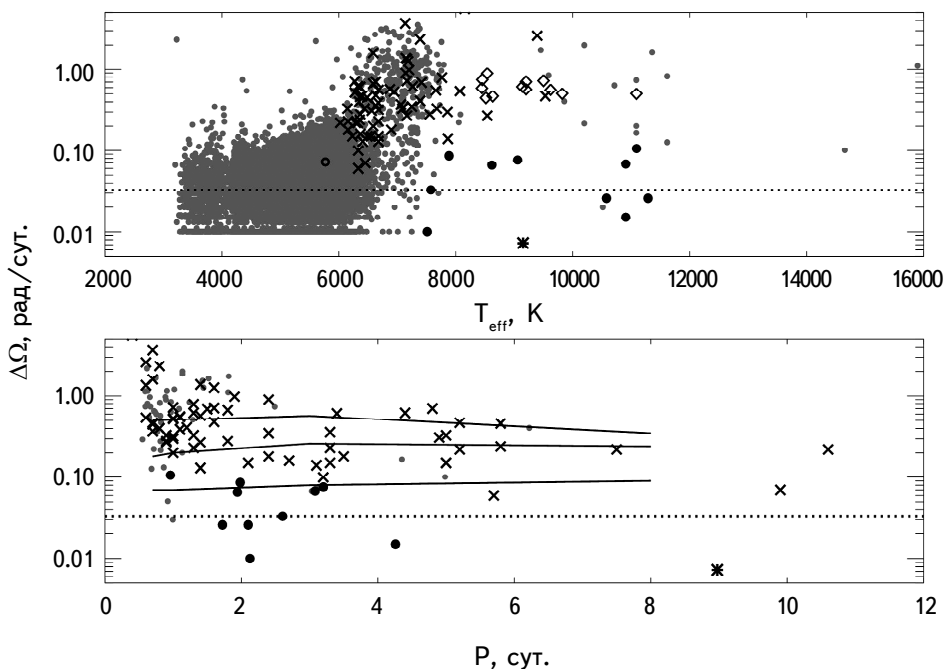


Рис.2. Вверху: Диаграмма зависимости параметра $\Delta\Omega$ от эффективной температуры. Внизу: Диаграмма изменений параметра $\Delta\Omega$ от периода вращения P . Темные крупные кружки - измерения для 10 звезд из [3] с вращательной модуляцией блеска, мелкие серые кружки - данные [3], крестики - данные из [5], ромбы - данные [8]. Звездочка - данные для звезды γ Gem. Штриховая линия - среднее значение $\Delta\Omega$ для 10 звезд из [3]. Открытый кружок на верхней диаграмме - данные для Солнца. Три линии на нижней диаграмме (снизу-вверх) - изменения параметра $\Delta\Omega$ для 3 значений масс звезд - 1, 1.2 и $1.275 M_{\odot}$ из [12]. На нижней диаграмме серыми кружками приведены данные [3] только для звезд с $T_{\text{эфф}}$ более 7500 К.

Таким образом, для окончательного анализа нами было отобрано 10 звезд. У многих из них на спектре мощности имеются пики для половинного значения величины периода вращения, которые принято объяснять наличием пятен на противоположных частях поверхности. Это обстоятельство могло бы служить дополнительным аргументом в пользу вращательного характера изменений их кривых блеска.

На рис.2 представлена диаграмма зависимости параметра $\Delta\Omega$ от эффективной температуры, на которой крупными темными кружками выделено положение 10 рассмотренных нами объектов. После исключения данных для звезд, переменность блеска которых обусловлена пульсациями, было найдено, что для звезд с $T_{\text{эфф}}$ выше 7500 К средняя величина $\Delta\Omega$ составляет 0.051 ± 0.01 рад/сут. (пунктирная линия). Отметим, что отбор указанных 10 объектов проводился только на основе анализа формы их кривых блеска и пиков на спектре мощности, без рассмотрения соответствующих величин параметра $\Delta\Omega$. Таким образом, детальное исследование свойств дифференциального вращения для звезд с $T_{\text{эфф}}$ более 7500 из [3] приводит к выводу о более низком значении параметра $\Delta\Omega$ для них, чем было получено в [3,5].

3. Обсуждение результатов. Анализ наблюдательных данных архива космического телескопа Кеплер позволил автору [10] выделить среди А звезд новый тип объектов ROTD. Они обладают переменностью блеска, обусловленной вращательной модуляцией пятен на поверхности, а кроме того спектры мощности этих объектов содержат характерные особенности, включающие узкий пик, а также на меньших частотах - широкий пик, состоящий из многочисленных деталей. Такие группы пиков могли бы соответствовать пятнам, расположенным на различных широтах звезды, обладающей дифференциальным вращением. Однако такая конфигурация пиков никогда не наблюдалась в спектрах мощности холодных, активных дифференциально вращающихся звезд. В [10] (см. также ссылки в статье) были рассмотрены альтернативные объяснения, которые состояли в предположениях либо о наличии планеты или тел на синхронной орбите, либо о существовании эффекта отражения в системах без затмения и прочее.

Принципиально новое объяснение особенностей спектра мощности звезд ROTD было дано в [11]. Авторы [11] связали присутствие групп пиков с колебаниями набора мод волн Россби. Эти моды были обнаружены авторами [11] у звезд спектральных классов В, А и F Главной последовательности, у запятенных звезд, у объектов типа γ Dor и др. В рамках предположения о присутствии у 12 исследуемых в [8] звезд типа ROTD дифференциального вращения, для них были найдены значения параметра $\Delta\Omega$. Установлено, что эти значения лежат в интервале величин 0.45-0.7 рад/сут. Полученные

результаты были сопоставлены с уже рассмотренными выше данными из литературных источников, содержащих сведения о параметрах ДВ звезд.

В [8] было показано, что заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 К, может быть сделано по двум независимым источникам, использующим различные методики определения этого параметра и косвенно, по данным исследования [6]. Средняя величина параметра дифференциального вращения $\Delta\Omega$ по измерениям для 12 изученных нами звезд типа ROTD составила 0.61 ± 0.10 рад/сут., что согласуется со средними величинами $\Delta\Omega$ по данным литературных источников [8,3]. В этом случае в [8] мы посчитали правомерным вывод о том, что структура пиков на спектрах мощности для ROTD звезд обусловлена возможным наличием у этих объектов дифференциального вращения. Однако, как показал анализ, проведенный в первой части нашей статьи, после исключения данных для звезд, переменность блеска которых обусловлена пульсациями, у звезд с $T_{эфф}$ выше 7500 К средняя величина $\Delta\Omega$ составляет всего 0.051 ± 0.01 рад/сут. (что близко к солнечному значению $\Delta\Omega = 0.07$ рад/сут.). В этом случае нет оснований считать правомерным сделанное нами ранее в [8] предположение об интерпретации наборов пиков на спектрах мощности для ROTD звезд, как обусловленных проявлениями возможного дифференциального вращения.

Теоретические исследования [12,13] допускают присутствие у звезд спектральных классов F значительной величины параметра дифференциального вращения. Согласно [13] величина параметра $\Delta\Omega$ резко увеличивается при переходе к объектам с $T_{эфф}$ выше 7000 К и может достигать 0.7 рад/сут. Поведение этого параметра описывается степенной функцией с большим показателем степени (уравнение 5 в [13]). Расчеты [13] приводятся для звезд с $T_{эфф}$ вплоть до 6700 К. Авторы [12] указывают на сопоставимые величины параметра $\Delta\Omega$ для объектов этого же температурного диапазона, при этом для звезды с 1.275 массой Солнца (максимальной при расчетах) в [12] было приведено значение 0.58 рад/сут. (рис.3 в [12]). На рис.2 представлены зависимости изменений параметра $\Delta\Omega$ для 3 значений масс звезд - 1, 1.2 и $1.275 M_{\odot}$ из [12]. Можно заключить, что теоретические расчеты [12,13] показали, что высокие значения $\Delta\Omega$ достижимы для F звезд. Важно отметить, однако, что они были выполнены для звезд с $T_{эфф}$ ниже 6500-6700 К, а рассматриваемые в нашем исследовании объекты горячее и имеют большие массы. Применимость результатов расчетов [12] для горячих A звезд не очевидна. Требуется новые теоретические исследования подобные [14] для дальнейшего сопоставления с наблюдательными проявлениями дифференциального вращения у звезд спектрального класса A. Согласно [14] поверхностные слабые магнитные поля у горячих звезд могут быть обусловлены

присутствием небольших конвективных зон, связанных с зонами ионизации водорода и гелия (см. рис.2 в [14]).

В последние годы в литературе были опубликованы результаты анализа высокоточных спектрополяриметрических наблюдений ярких звезд спектрального класса А, которые в том числе содержат оценки параметра их дифференциального вращения. Например, отметим работу [9], авторы которой выполнили исследование яркой звезды спектрального класса А γ Gem ($T_{\text{эфф}} = 9150 \pm 310$ K) - металлической (Am) звезды с умеренно выраженными аномалиями химического состава (см. ссылки в [9]). Этот анализ был основан на 25 сетях высокодисперсионных спектрополяриметрических наблюдений. К числу наиболее значимых результатов [9] следует отнести обнаружение магнитного поля у этой Am звезды. До недавнего времени считалось, что звезды только одного из типов химической пекулярности - Ap/Vr звезды - являются магнитными. В принципе, гипотетически возможно, что γ Gem относится к магнитным звездам со сверхслабым реликтовым полем. Авторы [9] из анализа переменности профилей линий установили период ее вращения $P = 8.975$ сут. При построении зееман-доплеровских карт в [9] была получена оценка параметра ДВ γ Gem, которая составила величину 0.0073 ± 0.0023 рад/сут. (символ звездочка на рис.2). Эта величина существенно ниже оценок $\Delta\Omega$, приведенных в [3] для звезд с $T_{\text{эфф}}$ больше 7500 K.

4. *Заключение.* Для изучения характера изменений параметров ДВ звезд спектральных классов - А и более ранних, требуются новые наблюдательные и теоретические исследования. В [1] было показано, что заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 K, может быть сделано по двум независимым источникам [3,5], использующим различные методики определения этого параметра и косвенно, по данным исследования [6]. Главный результат нашей работы состоит в том, что из анализа формы кривых блеска и наличия специфического набора пиков на спектрах мощности было найдено, что 47 из 57 объектов из [3], с $T_{\text{эфф}}$ выше 7500 K, могут быть отнесены к пульсирующим звездам, и лишь 10 - к звездам с переменностью блеска вследствие вращательной модуляции. После исключения данных для звезд с пульсационной переменностью, для оставшихся 10 объектов средняя величина $\Delta\Omega$ составила 0.051 ± 0.01 рад/сут., что сопоставимо с солнечным значением $\Delta\Omega = 0.07$ рад/сут. В этом случае нет оснований считать правомерным наше предположение [8] об интерпретации пиков на спектрах мощности для ROTD звезд, как обусловленных проявлениями возможного ДВ.

При построении зееман-доплеровских карт для γ Gem в [9] была получена оценка параметра ДВ звезды, которая составила величину 0.0073 ± 0.0023 рад/сут., в случае если для звезд спектрального класса А величина параметра $\Delta\Omega$

действительно в несколько раз превысит солнечное значение, то несомненно, что учет ДВ будет необходим при исследовании магнитной активности и проведении доплер-зеemanовского картирования этих звезд.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00423).

¹ Учреждение Российской академии наук Институт астрономии РАН, Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

² Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Москва, Россия

ON THE DIFFERENTIAL ROTATION OF A STARS

I.S.SAVANOV¹, E.S.KALINICHEVA¹, E.S.DMITRIENKO²

Literature data indicate a significant increase of the differential rotation parameter $\Delta\Omega$ for stars hotter than 6700 K. From the analysis of the light curves and the presence of a specific set of peaks on the power spectra we found that 47 of the 57 investigated objects with T_{eff} above 7500 K can be attributed to pulsating stars and only 10 - to stars with brightness variability due to rotational modulation. After excluding pulsating variables for stars with a T_{eff} above 7500 K the average value of $\Delta\Omega = 0.051 \pm 0.01$ rad/day. This conclusion does not allow us to consider assumption about the interpretation of peaks in the power spectra for ROTD stars as a possible manifestation of differential rotation valid. Another independent evidence of the low value of the parameter $\Delta\Omega$ for stars of spectral class A was obtained from the Zeeman-Doppler imaging for the star γ Gem - the estimation of the parameter of the differential rotation of the star was 0.0073 ± 0.0023 rad/day.

Keywords: *stars: activity: spots: photometry: variability: differential rotation*

ЛИТЕРАТУРА

1. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko, D.S.Pandei et al.*, *Astrophys. Bull.*, **73**, 454, 2018.
2. *T.Reinhold, A.Reiners, G.Basri*, *Astron. Astrophys.*, **560**, A4, 2013.
3. *T.Reinhold, L.Gizon*, *Astron. Astrophys.*, **583**, A65, 2015.
4. *A.Reiners*, *Astron. Astrophys.*, **446**, 267, 2006.
5. *M.Ammler-von Eiff, A.Reiners*, *Astron. Astrophys.*, **542**, A116, 2012.
6. *L.A.Balona, M.Svanda, M.Karlicky*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **463**, 1740, 2016.
7. *L.A.Balona*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **431**, 2240, 2013.
8. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, *Astrophysics*, **62**, 48 2019.
9. *A.Blazere, P.Petit, C.Neiner et al.*, *arXiv:1912.08688*, 2020.
10. *L.A.Balona*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **467**, 1830, 2017.
11. *H.Saio, D.W.Kurtz, S.J.Murphy et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **474**, 2774, 2018.
12. *L.L.Kitchatinov, S.V.Olemskoy*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **423**, 3344, 2012.
13. *M.Kuker, G.Rudiger*, *Astron. Nachr.*, **332**, 933, 2011.
14. *M.Cantiello, J.Braithwaite*, *Astrophys. J.*, **883**, 106, 2019.

