АСТРОФИЗИКА

ТОМ 62 ФЕВРАЛЬ, 2019 ВЫПУСК 1

ПЕРЕМЕННОСТЬ БЛЕСКА 12 ROTD A-ЗВЕЗД

И.С.САВАНОВ[1], Е.С.ДМИТРИЕНКО[2]

Поступила 16 июля 2018
Принята к печати 12 декабря 2018

Приведены результаты анализа переменности блеска 12 звезд спектрального класса A, принадлежащих к объектам типа ROTD. Спектры мощности этих объектов содержат характерные особенности, включающие доминирующий по амплитуде узкий пик на частоте F1(phot), а также на меньших частотах - широкий пик, как правило, состоящий из многочисленных деталей. На спектрах мощности, построенных по каждому из сетов наблюдений длительностью около 90 сут, пик, соответствующий значению F1(phot), присутствует на большинстве диаграмм, но не всегда он максимален по амплитуде. Сделано заключение о том, что пик на частоте F1(phot) является доминирующим, поскольку он присутствует на периодограммах для каждого сета наблюдений, а положения и амплитуды остальных пиков претерпевают изменения и, как следствие, на результирующей периодограмме они образуют набор пиков меньшей амплитуды. Получены указания на достаточно быструю эволюцию образований на поверхности звезд типа ROTD - порядка продолжительности сета наблюдений в 90 сут. Это могут быть как волны Россби, так и пятна, если придерживаться традиционной интерпретации. В рамках предположения о присутствии у исследуемых звезд дифференциального вращения, для 12 исследуемых звезд типа ROTD найдены значения параметра $\Delta\Omega$ и сопоставлены с имеющимися данными из литературных источников. Наши измерения подтверждают заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 K. Средняя величина параметра $\Delta\Omega$ по измерениям для 12 исследуемых нами звезд типа ROTD составляет 0.61 ± 0.10 рад/сут. и находится в хорошем согласии со средними величинами параметра дифференциального вращения по данным литературных источников. Теоретические исследования допускают присутствие у звезд спектральных классов A-F значительной величины параметра $\Delta\Omega$. Вероятность того, что причина появления пиков в спектре мощности обусловлена дифференциальным вращением звезды с пятнами, не может быть исключена.

Ключевые слова: *химически-пекулярные звезды: фотометрия: переменность: дифференциальное вращение*

1. *Ведение*. Высокоточные фотометрические наблюдения космического телескопа Кеплер, открыли беспрецедентные возможности исследования переменности звезд, в том числе, вызванной их вращательной модуляцией вследствие присутствия пятен на поверхности. В серии статей Балона (см. ссылки в [1]) были представлены результаты, свидетельствующие о том, что переменность блеска большого количества звезд ранних спектральных классов по своему характеру подобна переменности блеска звезд спектральных классов G-M, обладающих пятнами и локальными магнитными полями на своей поверхности. В [1] также можно найти ссылки на теоретические работы, в

которых даны оценки применимости теории динамо для горячих звезд с радиативными оболочками и возможности существования пятен на поверхности звезд с температурами выше $\sim 7000 \div 8000$ K.

Анализ наблюдательных данных позволил автору [1] выделить среди A-звезд два новых для этого спектрального класса типа объектов - ROT и ROTD. Эти объекты обладают переменностью блеска, обусловленной вращательной модуляцией пятен на поверхности. Их основное отличие от других звезд, изученных в [1], состоит в том, что спектры мощности этих объектов содержат характерные особенности, включающие узкий пик, а также на меньших частотах - широкий пик, как правило, состоящий из многочисленных деталей.

Примеры спектров мощности звезд типа ROTD можно найти в [1] и на рис.1 настоящей работы. Природа появления такого набора пиков на спектрах мощности изучаемых объектов остается до конца не понятой [1]. В принципе, согласно общепринятым представлениям, группы пиков могли бы соответствовать пятнам, расположенным на различных широтах звезды, обладающей дифференциальным вращением. Не в пользу такого предположения свидетельствует обстоятельство, что такая конфигурация пиков никогда не наблюдалась в спектрах мощности холодных, активных, дифференциально вращаю-

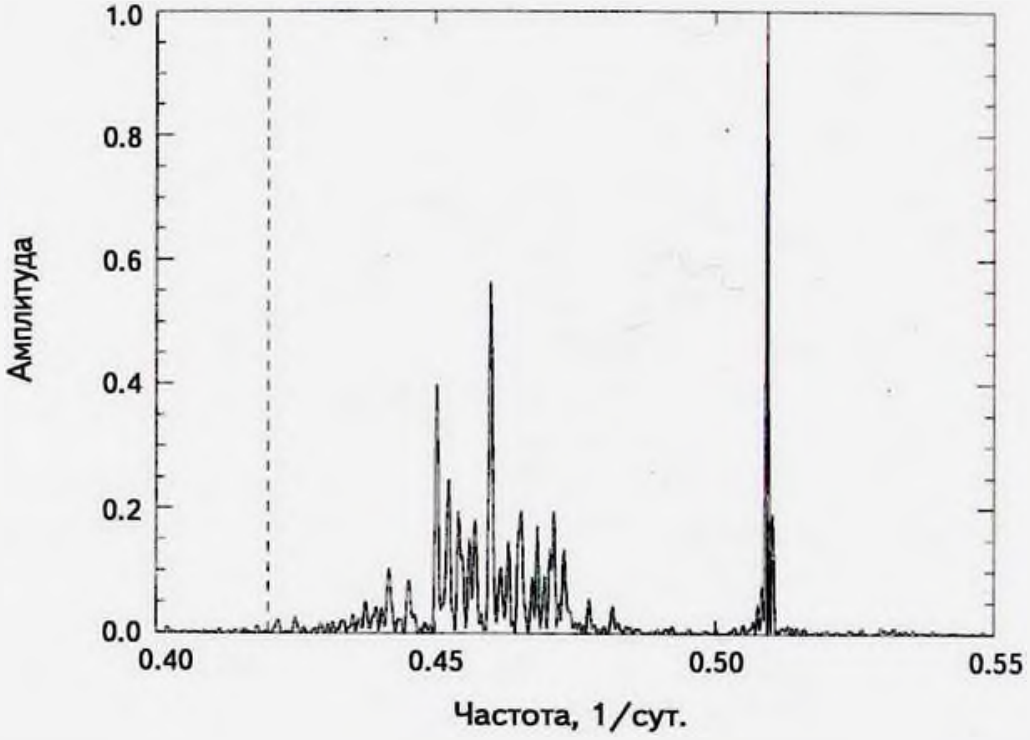

Рис.1. Спектр мощности переменности блеска ROTD звезды KIC 5730714 (амплитуда нормирована на максимальное значение). Сплошная вертикальная прямая соответствует значению F1(phot) = 0.51, штриховая вертикальная прямая - F2(phot) = 0.42.

щихся звезд. В [1] (см. также ссылки в ней) 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 т.д.. Принципиально новое объяснение особенностей спектра мощности звезд ROTD было дано в [2]. Авторы [2] связали присутствие групп пиков с колебаниями набора мод волн Россби. Эти моды были обнаружены авторами [2] у звезд спектральных классов B, A и F Главной последовательности, у запятненных звезд, у объектов типа γ Dor и др. Цель нашего исследования состоит в проведении детального анализа переменности блеска набора звезд спектрального класса A, принадлежащих к объектам типа ROTD.

2. *Спектры мощности блеска ROTD звезд*. Для выбора объектов дальнейшего анализа мы использовали данные табл.1 и 3 из [1], содержащие сведения о 639 звездах, в том числе 66 объектах типа ROTD. Нами было отобрано 12 звезд с хорошо известными: температурой атмосферы, периодом вращения и достаточно большой величиной амплитуды переменности узкого пика (табл.1). Для каждой звезды наш анализ был выполнен на основе наиболее полного доступного набора наблюдательных данных архива MAST (www.archive.stsci.edu.kepler). Обработка данных была аналогична представленной нами ранее при исследовании звезд солнечного типа и холодных карликов (например, [3,4]).

Долговременные систематические изменения блеска звезды были учтены как линейные тренды, а также были устранены дефекты. Поиск периодов вращения проводился с применением программы LNP-TEST из библиотек

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИССЛЕДУЕМЫХ ROTD A-ЗВЕЗД

KIC	Kepler mag	Teff, K	log g	F1, 1/сут.	Amp., mmag	F2, 1/сут.	ΔΩ, рад/сут.
4059089	10.534	9820	3.873	2.6201	50	2.54	0.503
5524045	9.458	9500	4.000	1.8152	22	1.70	0.724
5730714	10.596	9621	3.660	0.5093	20	0.42	0.560
5978118	12.024	9201	3.981	2.5704	40	2.48	0.568
6222381	9.983	8453	3.719	1.2290	23	1.11	0.748
7667560	9.739	8446	4.073	1.5437	11	1.45	0.589
8037519	8.006	11089	3.776	1.6699	22	1.59	0.502
8460081	10.037	8515	3.710	1.2706	31	1.20	0.446
9222948	10.217	8631	3.808	0.7745	255	0.70	0.468
10405887	11.133	9138	3.928	1.0574	25	0.96	0.612
10816270	11.398	9201	4.068	1.1422	80	1.03	0.705
10974769	11.840	8537	3.974	1.7615	27	1.62	0.889

IDL. Для каждого объекта были рассчитаны спектры мощности, на которых были измерены положения частот F1(phot) узкого пика (пятый столбец табл.1). Было установлено, что полученные значения полностью совпадают с результатами, приводимыми в [1].

На меньших частотах хорошо заметен набор пиков, состоящий из многочисленных деталей. Для каждого спектра мощности нами была измерена частота, соответствующая минимальному (крайнему левому) F2(phot) значению в наборе пиков (седьмой столбец табл.1). На рис.1 в качестве примера представлен спектр мощности для звезды KIC 5730714, полученный по всему набору данных с длительностью порядка 4-х лет. На рис.2, 3 приведены спектры мощности, построенные для KIC 5524045 и KIC 5730714 по каждому из сетов наблюдений (Q). Длительность каждого сета составляет около 90сут. (сеты Q0 и Q17 имеют меньшую продолжительность). Вертикальная прямая соответствует значению F1(phot). Ширина пиков на каждой из диаграмм

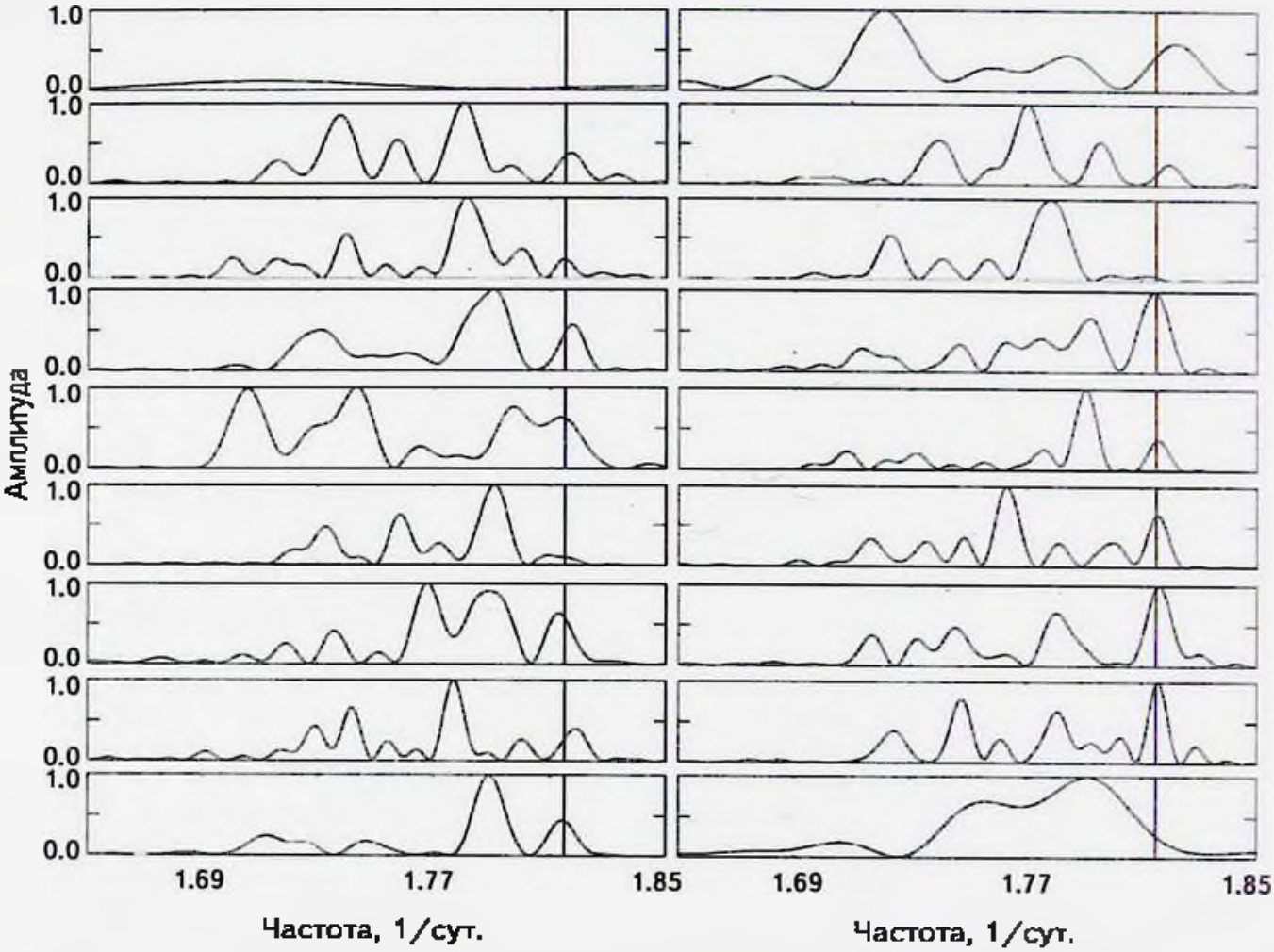

Рис.2. Результаты периодограммного анализа переменности блеска KIC 5524045 для 18 сетов. Вертикальная прямая соответствует значению F1(phot).

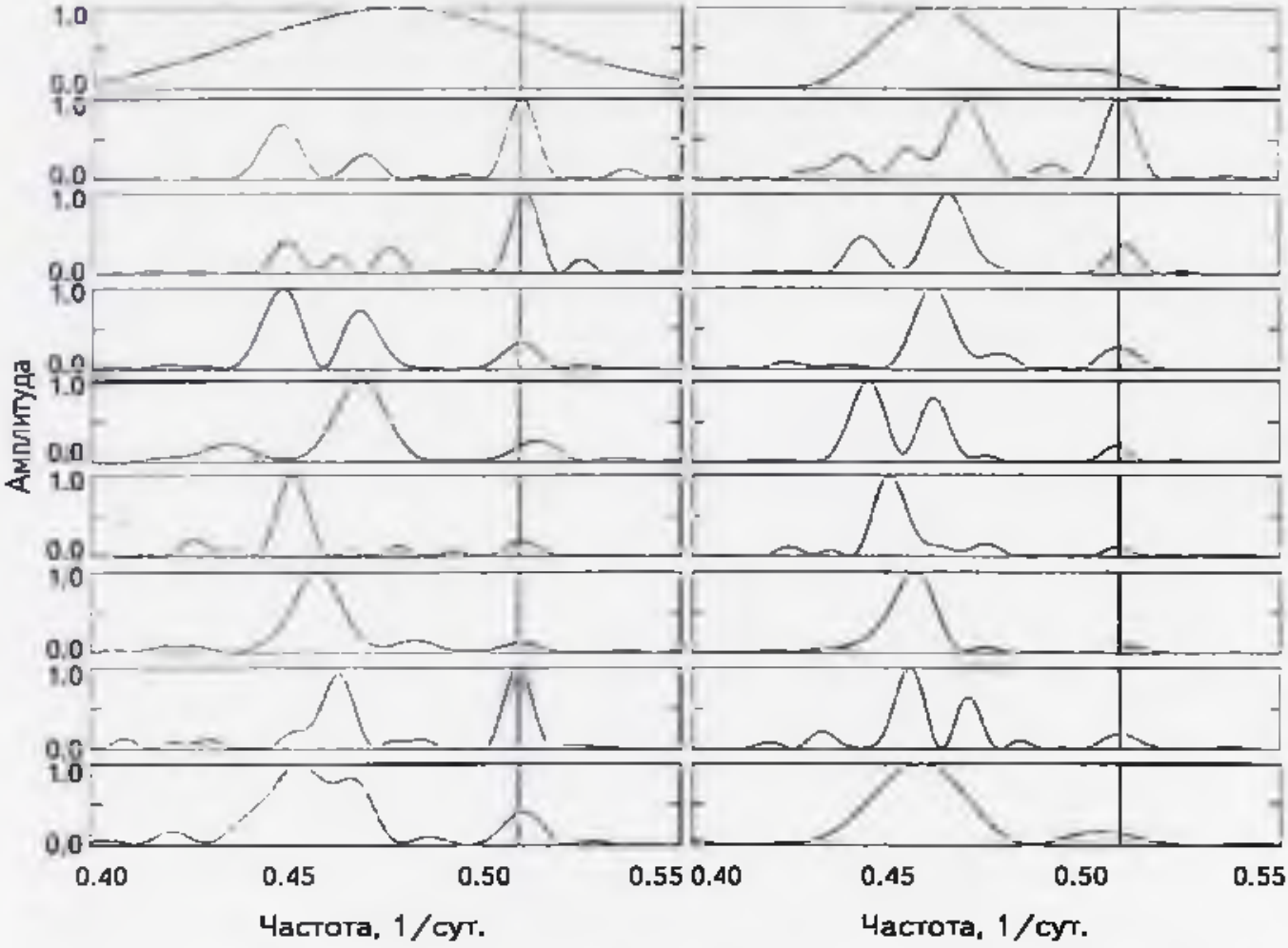

Рис.3. То же для KIC 5730714.

превышает ширину пиков на рис.1 вследствие меньшей продолжительности рассматриваемого временного ряда (всего один сет в 90 суток). Обращает на себя внимание то обстоятельство, что пик, соответствующий значению F1(phot), ярко выражен на большинстве диаграмм, но часто его амплитуда не является максимальной. Многочисленные пики на меньших частотах претерпевали эволюцию, они появлялись и исчезали на характерных временах, сопоставимых с продолжительностью сета. Во многих случаях часть пиков имела большую амплитуду по отношению к пику на F1(phot).

Можно заключить, что пик, соответствующий значению F1(phot), является доминирующим, поскольку он присутствует на периодограммах для каждого сета наблюдений. При этом положения и амплитуды остальных пиков претерпевают изменения и, как следствие, на результирующей периодограмме они образуют набор пиков меньшей амплитуды, чем пик на F1(phot). Продолжительность процессов (например, времени жизни пятен), связанных с короткоживущими пиками, сопоставима со временем продолжительности

сета наблюдений (порядка 90 сут.). Подобный вывод о продолжительности может быть сделан и в случае, если природа пиков связана с какими-либо другими процессами, например, волнами Россби.

3. *Оценка параметра дифференциального вращения*. Ранее мы указали, что объяснение особенностей спектра мощности звезд ROTD может быть связано с проявлением колебаний набора мод волн Россби [2]. В принципе, можно вернуться к традиционному подходу и попытаться интерпретировать происхождение пиков на этой диаграмме наличием групп пятен, расположенных на различных широтах звезды, которая обладает дифференциальным вращением. Такое объяснение использовалось нами в предыдущих исследованиях довольно часто. При этом изменения периодов переменности блеска могут соответствовать изменениям и эволюции (появлению и исчезновению) активных областей, лежащих на разных широтах на поверхности звезды.

Напомним, что закон дифференциального вращения принято описывать уравнением вида $\Omega(\theta)=\Omega(eq)(1-\alpha\sin^2(\theta))$, где θ - широта, $\Delta\Omega=\Omega(eq)-\Omega(pole)$ (см., например, [5,6]). Если взять значения частот, соответствующих двум доминирующим пикам на периодограммах - F1(phot) и F2(phot), то в таком случае, согласно [6], можно выполнить оценку параметра дифференциального вращения звезды - величины $\Delta\Omega$ ($\Delta\Omega=2\pi(F1(plot)-F2(plot))$). Поскольку мы не знаем широтных положений пятен, ответственных за появления пиков на периодограммах, мы можем получить лишь нижнюю оценку величины параметра $\Delta\Omega$. Считаем целесообразным взять в качестве F2(phot) не частоту одного из пиков в массиве, а, как указывалось выше, - величину F2(phot), соответствующую минимальному (крайнему левому) значению в наборе пиков. Найденные нами значения $\Delta\Omega$ для 12 звезд типа ROTD лежат в интервале величин 0.45 - 0.9 рад/сут. и приведены в последнем столбце табл.1. Величина F1(phot) измеряется с высокой точностью (пик на спектре мощности достаточно узкий, его полуширина не более 0.0031/сут.). Положение F2(phot) измеряется с большей погрешностью, в самых неблагоприятных случаях эта погрешность может составлять 0.01-0.02 рад/сут. Таким образом, погрешность величины $\Delta\Omega$ по нашей оценке составляет в среднем около 0.06-0.12 рад/сут.

Полученные нами результаты могут быть сопоставлены с имеющимися данными из литературных источников, содержащих сведения о параметрах дифференциального вращения звезд. Мы рассмотрели только те из них, которые содержат измерения $\Delta\Omega$ для горячих звезд (с $T_{эф}$ выше $7000 \div 8000$ K). Авторы [5,6], используя наблюдения телескопа Кеплер, выполнили анализ кривых блеска 18616 и 12300 объектов, соответственно, и установили параметры их дифференциального вращения. В [5] анализ был проведен на основе

данных наблюдений ограниченного временного интервала Q3. Данные [6] 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 дифференциального вращения для объектов в широком диапазоне эффективных температур - от 3200 K вплоть до 12000 K (рис.4). Отметим, что данные [6] обладают большим разбросом значений (например, параметра $\Delta\Omega$) при фиксированном значении температуры. Особенно этот разброс становится заметным при переходе к объектам с температурами 6700 - 8000 K. На основании данных, представленных в [6], можно сделать заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 K.

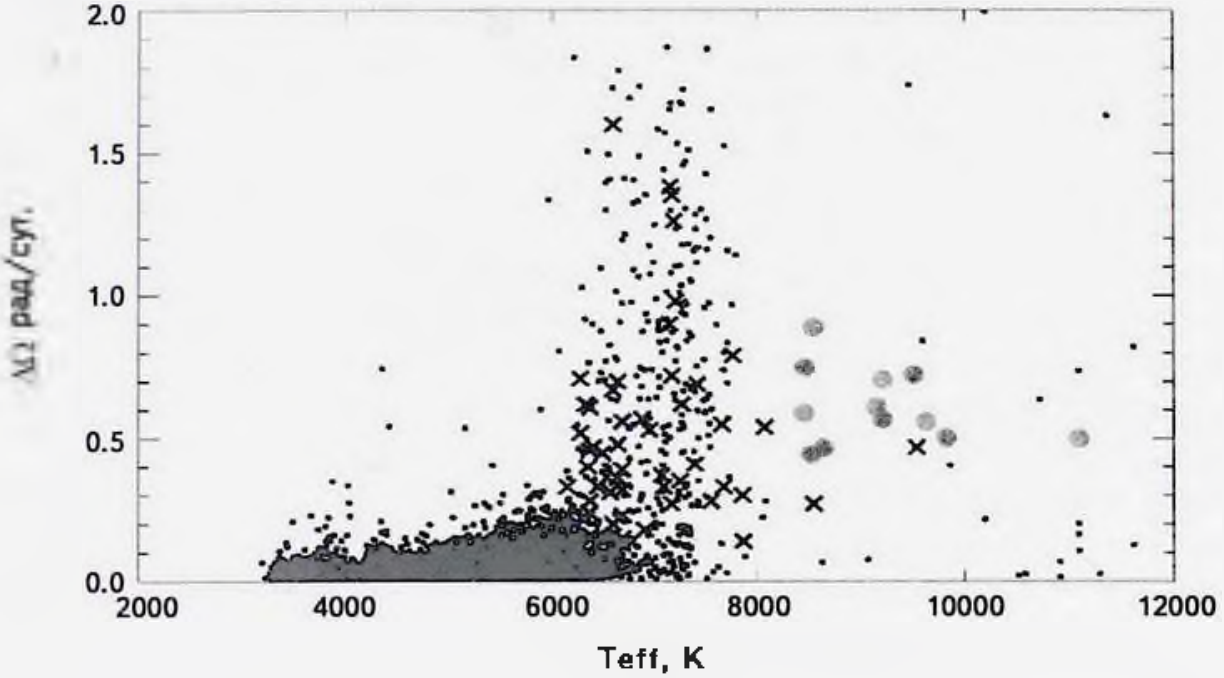

Рис.4. Диаграмма изменений параметра $\Delta\Omega$ от температуры. Светлые крупные кружки - наши измерения, мелкие темные кружки - данные [6], крестики - данные из [8].

Другой метод определения параметра дифференциального вращения основан на спектральных наблюдениях и связан с анализом фурье-преобразования профилей линий в спектрах быстровращающихся звезд. В отличие от методов доплеровского картирования, связанных с исследованием переменности профилей линий, данный метод, привлекающий фурье-анализ, может быть применен лишь к профилям неактивных звезд (не содержащих каких-либо неоднородностей, формирующихся в холодных областях на поверхности звезды). Этот метод был развит в исследовании [7] и представлен в серии статей (см. в [8]). Достоинством метода является то, что параметр $\Delta\Omega$ может быть измерен по единичным экспозициям спектральных наблюдений (в отличие от метода доплеровского

картирования, требующего серии спектральных наблюдений).

Данные [8] представлены на рис.4 крестиками, они находятся в хорошем согласии с результатами [6] для объектов рассматриваемого температурного диапазона.

Отметим, что заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 K, может быть сделано по двум независимым источникам, использующим различные методики определения этого параметра. Кроме того, в [9] были приведены оценки параметра дифференциального вращения для 2562 звезд спектральных классов K-A. Исследование было основано на частотном анализе и по своей методике подобно используемой в [5]. К сожалению, результатов определений параметра $\Delta\Omega$ для индивидуальных объектов авторы [9] не привели, и мы не смогли включить эти данные в наше исследование. Тем не менее данные, представленные на рис.2 в [9], также свидетельствуют о росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд горячее 8000 K.

Средняя величина параметра $\Delta\Omega$ по измерениям для 12 исследуемых нами звезд типа ROTD составляет 0.61 ± 0.10 рад/сут. Она находится в хорошем согласии со средними величинами параметра дифференциального вращения по данным литературных источников [6] - 0.70 ± 0.04 (306 звезд с температурами в интервале $6700 \div 12000$ K) и [8] - 0.63 ± 0.08 (67 звезд). Можно заключить, что если интерпретировать наличие многочисленных пиков на спектрах мощности исследуемых звезд как проявление переменности блеска, вызванное группами пятен, расположенных на различных широтах звезды с дифференциальным вращением, то полученные нами оценки параметра $\Delta\Omega$ достаточно хорошо согласуются с результатами измерений [6] и [8]. Таким образом, выполненное нами исследование позволяет заключить, что, в принципе, причина появления пиков может быть обусловлена дифференциальным вращением звезды с пятнами.

Отметим, что теоретические исследования [10,11] допускают присутствие у звезд спектральных классов A-F значительной величины дифференциального вращения. Например, согласно [10], для звезд с массой 1.275 масс Солнца и периодом вращения менее 3-4 сут. величина параметра $\Delta\Omega$ может достигать 0.5 - 0.6 рад/сут. По расчетам [11] величина параметра $\Delta\Omega$ для звезд с температурой 6700 K оценивается равной 0.7 рад/сут. К сожалению, для более высоких значений T_{eff} такие данные отсутствуют, но авторы [11] приводят результаты, свидетельствующие о быстром росте величины $\Delta\Omega$ с увеличением температуры (формула (5) в [11]).

Скачок в величине параметра $\Delta\Omega$ примерно достигается при температуре, соответствующей переходу от радиативных оболочек звезд к лучистым. Вероятно, данное обстоятельство указывает на смену доминирующего процесса, ответственного за высокие значения параметра $\Delta\Omega$. Например, в теоретической

работе [12] рассматривается возможность того, что дифференциальное вращение на поверхности горячих звезд создается непосредственно в лучистой оболочке имеющейся здесь меридиональной циркуляцией.

4. *Заключение*. Основные результаты и выводы нашего исследования:

1. Выполнен детальный анализ переменности блеска 12 звезд спектрального класса A, принадлежащих к объектам типа ROTD. Рассчитанные по всему доступному набору наблюдательных данных спектры мощности этих объектов содержат характерные особенности, включающие узкий пик на частоте F1(phot), а также на меньших частотах - широкий пик, как правило, состоящий из многочисленных деталей.

2. Найдено, что во всех случаях на спектрах мощности, построенных по каждому из сетов наблюдений длительностью около 90 сут., пик, соответствующий значению F1(phot), присутствует на большинстве диаграмм, но часто не является максимальным по амплитуде. Во многих случаях наибольшей высотой обладал один из многочисленных пиков на меньших частотах, которые претерпевали эволюцию на характерных временах порядка продолжительности сета.

3. Сделано заключение о том, что пик, соответствующий значению F1(phot), является доминирующим, поскольку он присутствует на периодограммах для каждого сета наблюдений, а положения и амплитуды остальных пиков претерпевают изменения и, как следствие, на результирующей периодограмме они образуют набор пиков меньшей амплитуды, чем пик на частоте F1(phot).

4. Полученные нами результаты могут рассматриваться как указание на достаточно быструю эволюцию образований на поверхности звезд типа ROTD - порядка продолжительности сета наблюдений в 90 сут. Это могут быть как волны Россби, так и пятна, если придерживаться традиционной интерпретации.

5. В рамках предположения о присутствии у 12 исследуемых звезд типа ROTD дифференциального вращения, для них найдены значения параметра $\Delta\Omega$. Установлено, что эти значения лежат в интервале величин 0.45 - 0.9 рад/сут. Полученные нами результаты сопоставлены с имеющимися данными из литературных источников, содержащих сведения о параметрах дифференциального вращения звезд. Показано, что заключение о значительном росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд, горячее 6700 K, может быть сделано по двум независимым источникам, использующим различные методики определения этого параметра и косвенно, по данным исследования [9].

6. Средняя величина параметра дифференциального вращения $\Delta\Omega$ по измерениям для 12 изученных нами звезд типа ROTD составляет 0.61 ± 0.10 рад/сут. и находится в хорошем согласии со средними величинами $\Delta\Omega$ по

данным литературных источников [6,8]. Теоретические исследования [10-12] допускают присутствие у звезд спектральных классов A-F значительной величины параметра дифференциального вращения. Таким образом, вероятность того, что причина появления пиков в спектре мощности A-звезд типа ROTD обусловлена дифференциальным вращением звезды с пятнами, не может быть исключена.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект N 18-12-00423). Авторы благодарны команде космического телескопа Кеплер и команде архива MAST за возможность использования данных наблюдений и рецензенту за ценные замечания.

[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 e-mail: issesd@rambler.ru

PHOTOMETRICAL VARIATIONS OF 12 ROTD A-STARS

I.S.SAVANOV[1], E.S.DMITRIENKO[2]

We present the results of the analysis of the variability of the brightness of 12 ROTD stars of the spectral class A. The power spectra of these objects contain characteristic features that include a narrow peak dominating in amplitude at the frequency F1(phot), and also a broad peak at lower frequencies, usually consisting of numerous details. On the power spectra plotted for each of observational sets lasting about 90 days, the peak corresponding to F1(phot) is present on most diagrams but not always is maximal in amplitude. We conclude that the peak at the frequency F1(phot) is dominant since it is present on the periodograms for each set of observations but the positions and amplitudes of the remaining peaks undergo changes and, as a result, they form a set of peaks of lower amplitude in the resulting periodogram. Evidence for a fairly rapid evolution of formations on the surface of ROTD-type stars on time scale of the order of the duration of the observation set of 90 days was obtained. This conclusion can be done both for Rossby waves and spots. Under the assumption of the presence of differential rotation in the investigated stars, $\Delta\Omega$ were found for 12 investigated ROTD stars and compared with the available data from the literature sources. Our measure-

ments confirm the conclusion about a significant increase of the parameter $\Delta\Omega$ in stars hotter than 6700 K. The average value of the parameter $\Delta\Omega$ from the measurements for the 12 stars is 0.61 ± 0.10 rad/d and is in good agreement with the average values of the differential rotation parameter according to the literature. Theoretical studies allow for the presence of a significant parameter $\Delta\Omega$ in A-F stars. The probability that the cause of the appearance of peaks in the power spectrum is due to the differential rotation of a star with spots can not be ruled out.

Keywords: *chemically-peculiar stars: photometry: variability: differential rotation*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.A.Balona*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **467**, 1830, 2017.
2. *H.Saio, D.W.Kurtz, S.J.Murphy et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **474**, 2774, 2018.
3. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **56**, 116, 2012.
4. *I.S.Savanov*, Astron. Rep., **54**, 437, 2010.
5. *T.Reinhold, A.Reiners, G.Basri*, Astron. Astrophys., **560**, A4, 2013.
6. *T.Reinhold, L.Gizon*, Astron. Astrophys., **583**, A65, 2015.
7. *A.Reiners*, Astron. Astrophys., **446**, 267, 2006.
8. *M.Ammler-von Eiff, A.Reiners*, Astron. Astrophys., **542**, A116, 2012.
9. *L.A.Balona, M.Svanda, M.Karlicky*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **463**, 1740, 2016.
10. *L.L.Kitchatinov, S.V.Olemskoy*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **423**, 3344, 2012.
11. *M.Kuker, G.Rudiger*, Astron. Nachr., **332**, 933, 2011.
12. *L.F.Espinosa, M.Rieutord*, Astron. Astrophys., **552**, 35, 2013.