

УДК 524.3-327

ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ А–М

© 2019 И. С. Саванов^{1*}¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 1 марта 2019 года; после доработки 23 июля 2019 года; принята к публикации 23 июля 2019 года

Изучены диаграммы зависимости параметра R_{var} (амплитуда переменности блеска, индикатор активности) от эффективной температуры и периода вращения звезд спектральных классов А–М. Общий набор данных дает представление об изменениях этого параметра у звезд, обладающих конвекцией. Подтверждено, что предел применимости гирохронологического соотношения PtM соответствует не предельной величине $(B - V)_0 > 0.47$, а связь между периодом вращения и цветом также видна вплоть до групп звезд с $(B - V)_0 = 0.2$. Показано, что величина параметра R_{var} для звезд с эффективными температурами 6500–7500 К ниже примерно на порядок, чем для звезд типа А, что указывает на немонотонный характер изменений параметра и не позволяет сделать вывод о наличии единой зависимости этого параметра во всем температурном диапазоне. На диаграмме $R_{\text{var}}-P$ (период вращения) звезды спектрального класса А попадают на последовательность быстровращающихся активных объектов, а близкие к ним по температурам звезды спектрального класса F (и объекты из скопления NGC 6866) лежат на другой последовательности — быстровращающихся объектов с малой амплитудой переменности блеска.

Обсуждаются наличие единой связи между свойствами вращательной активности у звезд спектральных классов А, F и более поздних, а также возможные физические процессы, ведущие к реализации стандартного гирохронологического соотношения и активности у А-звезд.

Ключевые слова: *звезды: вращение*

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы достигнут значительный успех в исследованиях, посвященных анализу вращения звезд. Четыре года непрерывных фотометрических наблюдений космического телескопа миссии Кеплер со сверхвысоким уровнем точности позволили получить данные о периодах вращения P десятков тысяч звезд, в том числе с малоамплитудной модуляцией блеска. С использованием сета наблюдений Q3 Reinhold с коллегами в [1] определили периоды вращения у более 24 000 звезд и оценили параметры дифференциального вращения более чем у 18 000 из них, а затем в [2] опубликовали результаты измерений 12 000 периодов по данным Q2–Q9. В работе [3] были проанализированы данные для 133 030 звезд главной последовательности с T_{eff} ниже 6500 К и в результате у 34 030 объектов были определены периоды вращения с величинами от 0.2 до 70 дней. Кроме того, авторы [3] представили результаты определения амплитуд периодических изменений блеска объектов R_{var} (в дальнейшем, просто амплитуд), которые можно рассматривать как индикатор звездной активности

для звезд с установленными периодами вращения. Было найдено, что типичный диапазон изменений R_{var} — от 950 ppm (5%) до 22 700 ppm (95%), с медианным значением в 5600 ppm и что, как правило, более высокие амплитуды характерны для холодных звезд с более короткими периодами. В итоге в [3] было исследовано распределение амплитуды фотометрической переменности блеска в зависимости от периода и эффективной температуры.

Согласно [3], в каждом диапазоне изменений T_{eff} существует отрицательная корреляция между P и R_{var} , для самых горячих звезд зависимость носит сложный характер. Холодные звезды образуют последовательность, идущую от короткопериодических звезд с высокой амплитудой до звезд с низкой амплитудой и большим периодом. Было обнаружено, что амплитуды коротко- и долгопериодических групп для самых холодных звезд имеют одинаковые значения, в то время как у ранних G–K звезд более медленные ротаторы имеют более низкие амплитуды переменности.

*E-mail: issesd@rambler.ru

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРА ЗАПЯТНЕННОСТИ S

Более детальные исследования аналогичного характера представлены нами, например, в [4] и [5]. Отличительная особенность этих работ состояла в том, что в них были использованы не амплитуды переменности, а параметр запятненности S (доля поверхности звезды, покрытая пятнами). В [4] на основании фотометрических наблюдений, полученных с помощью телескопа Кеплер, мы исследовали свойства активных областей (холодных пятен) на поверхности 737 звезд с планетными системами (экзопланетами). Никаких доказательств того, что магнитная активность звезды с экзопланетами имеет какие-либо особенности, отличающие ее от активности звезд более широкой выборки, обнаружено не было. В дополнение к выводам, сделанным в [3], мы получили, что для звезд с эффективными температурами менее 5750 К наблюдается монотонное уменьшение запятненности с увеличением периода вращения звезды. Мы установили отсутствие звезд с малыми значениями S (менее 0.002) среди звезд с эффективными температурами менее 5750 К и периодами вращения менее 10 суток. Звезды с эффективной температурой более 5750 К имеют небольшую запятненность в случае быстрого вращения, но S увеличивается для объектов с периодами вращения 20–25 суток. В [5] были выполнены оценки параметра запятненности S для 2846 звезд солнечного типа с эффективными температурами от 5700 К до 5800 К. Анализ был проведен на основе каталога MAST (Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes), содержащего данные о фотометрических измерениях, полученных космическим телескопом Кеплер в течение интервала Q9. Установлено наличие двух групп звезд солнечного типа, характеризующихся значениями S от 0.001 до 0.007 и S более 0.007. Число звезд во второй группе (активные звезды) составляет 279 (порядка 10% от общего числа рассматриваемых объектов). Среднее значение параметра S для всей выборки звезд равно 0.004, что сопоставимо со средним значением запятненности Солнца. Особенности характера зависимости параметра S от периода вращения для звезд солнечного типа в целом схожи с особенностями, выявленными нами ранее у звезд с экзопланетами. Запятненность для подавляющего большинства объектов из нашей выборки является постоянной и не зависит от их возраста. Для малочисленной группы активных звезд с величиной S более 0.007 активность уменьшается по мере их старения.

Общепринятым является сценарий, по которому с возрастом молодые аналоги Солнца замедляют свое вращение, а уровень их активности уменьшается. Однако наше исследование выявило присутствие многочисленной группы объектов с ши-

роким диапазоном изменений значений периодов вращения и возраста, но примерно с одинаковым средним уровнем активности, который к тому же соответствует солнечному уровню. В [5] нами был поставлен вопрос о характере эволюции активности объектов в зависимости от периодов их вращения для двух групп — активных и малоактивных объектов (см. ниже в [3]). Обратим внимание, что в [3] периоды вращения были обнаружены лишь для 34 030 объектов из 133 030 изученных ими звезд в полной выборке.

3. ДАННЫЕ GAIA

Появившиеся недавно данные наблюдений Gaia Data Release 2¹ позволили по-новому взглянуть на рассматриваемый вопрос. Первый шаг был сделан авторами [6], которые сопоставили астрометрические данные из Gaia с выборкой звезд, периоды вращения которых были измерены по наблюдениям телескопа Кеплер. Из 30 305 звезд с надежными оценками расстояний в [6] были выбраны 16 248 одиночных звезд главной последовательности в пределах области 0.5 зв.величин по отношению к изохроне в 1 Гуг. Было найдено, что бимодальность периода вращения, первоначально полученная в [3], отчетливо проявляется для звезд до 525 пк, но не обнаруживается на больших расстояниях. Также бимодальность в распределении периодов вращения, установленных в [3], имеет ограничения по шкале галактической высоты (доля быстро вращающихся молодых звезд сильно уменьшается для звезд выше $Z > 90$ пк). Кроме того, второй выпуск данных Gaia содержит идентификацию 147 535 переменных класса BY Dra (звезды с пятнами на поверхности), а также их периоды вращения и амплитуды модуляции блеска. Высокая фотометрическая точность данных позволила в [7] на диаграмме “переменность амплитуды блеска—период” впервые выделить структуры, которые могут быть связаны с проявлением различных режимов магнитной активности. Распределение амплитуд переменности блеска, найденное в [6], показало бимодальность с пробелом для периодов P более 2 суток. Объекты, блеск которых меняется с низкой амплитудой, в свою очередь, распределяются на две группы: относительно медленно вращающиеся звезды с периодами $P = 5–10$ суток и сверхбыстрые ротаторы с $P > 0.5$ суток. Мультибимодальность распределения амплитуд переменности в зависимости от периода вращения сочетается с различиями в положении на диаграмме “абсолютная величина—период” (или период—цвет), где звезды с низкой и высокой амплитудой занимают разные области. Авторы [7]

¹<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>

предположили, что такая мультимодальность указывает на существование различных конфигураций поверхностного магнитного поля у молодых и средних по возрасту звезд малой массы. Эти группировки проявляют себя на диаграмме “амплитуда переменности—период вращения” (три основных группы-кластера): объекты с высокой амплитудой переменности; низкоамплитудные медленные ротаторы; низкоамплитудные быстрые ротаторы.

4. ВРАЩЕНИЕ ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ F И A

Основная задача нашего исследования состоит в углубленном рассмотрении диаграмм вида $R_{\text{var}}-T_{\text{eff}}$ и $R_{\text{var}}-P$ с привлечением новых данных о вращении звезд, в том числе и более горячих объектов спектральных классов A и F. Значимым результатом работы [8] является обнаружение корреляции периода вращения с индексом цвета звезд поля Кеплера до $(B - V)_0 = 0.2$ (звезды спектрального класса A) или даже ниже. Эта корреляция основана на измерении периодов вращения 513 звезд (также по данным из архива космического телескопа Кеплер), блеск которых обладает переменностью вследствие наличия пятен на их поверхности. Для звезд поздних спектральных классов найденная в [8] корреляция между периодом вращения и индексом цвета, как правило, ранее объяснялась магнитным торможением и обычно находила применение в случае звезд с $(B - V)_0 > 0.47$. Указанная методика известна как “гирохронология” (соотношение PtM (см. работы С. Барнеса (например, [9]) и обсуждения в [1, 2])). Согласно gyroхронологическому соотношению период вращения P связан с цветом $(B - V)$ и возрастом t звезды отношением вида $P = t^n a [(B - V)_0 - c]^b$, где a , b , c и n называются параметрами gyroхронологии (см. в [2, 9]). Заслуга авторов [8] состоит в том, что они обнаружили дополнительную корреляцию вида PtM для более горячих звезд, в некоторой степени имитирующую установленную связь для холодных объектов. Считается, что у звезд горячее F4–F5 вращательное торможение незначительно (предполагалось, что предел применимости отношения PtM соответствует $(B - V)_0 > 0.47$). Если причиной появления зависимости PtM является вращательное торможение из-за потери массы, в результате конвекции, то можно было бы сделать вывод, что потеря массы и конвекция важны также для звезд A и ранних звезд F-типа. Тем не менее, конвективные зоны в оболочках этих горячих звезд, как принято считать, или очень тонкие, или отсутствуют. Следовательно, напрашивается вывод о том, что либо роль конвекции при генерации локальных магнитных полей в A-звездах не до конца понятна,

либо что другие физические процессы приводят к реализации стандартного соотношения PtM в случае более горячих звезд. Интересно отметить, что даже в [1, 2] четкая связь между периодом вращения и показателем цвета также видна для группы звезд с $(B - V)_0 < 0.4$ — в [1] эта группа распространяется на $(B - V)_0 = 0.3$, а в [2] — на $(B - V)_0 = 0.2$. Ярко выраженное наличие корреляции между периодом вращения и показателем цвета до $(B - V)_0 = 0.17$ является гораздо более сильным подтверждением тенденции, уже отмеченной в [10, 11] для горячих звезд из скопления NGC 6866 и NGC 6819. Ранее в [10] были высказаны предположения о том, что требуется переоценка физической причины существования отношения PtM или переоценка наличия процессов типа конвекции у звезд A-типа.

На Рисунке показана диаграмма зависимости параметра R_{var} от эффективной температуры и периода вращения звезд. Большую часть данных представляют 34 030 звезд из [3] (маленькие серые кружки). Результаты исследования [8] дополняют их для звезд с более высокими эффективными температурами и демонстрируют общий характер изменений R_{var} в диапазоне температур от 3200 K до 7500 K (при этом имеются отдельные измерения вращательной модуляции блеска и в случае звезд с более высокими температурами вплоть до 9000 K). Данные для звезд упомянутого выше скопления NGC 6866 находятся с ними в полном согласии. Общий набор данных [3] и [8] дает представление об изменениях параметра амплитуды переменности блеска звезд, обладающих конвекцией. При исчезновении конвективной области у объектов спектральных классов F5 параметр R_{var} уменьшается, и далее на уровне переменности в 100 ppm он не регистрируется. В серии статей L. Valona [12–16] (см. также ссылки в них) на основе анализа высокоточных фотометрических наблюдений с космическим телескопом Кеплер было высказано предположение о том, что переменность блеска большого количества звезд ранних спектральных классов по своему характеру подобна переменности блеска более холодных звезд, обладающих пятнами и локальными магнитными полями на своей поверхности и проявляющих вспышечную активность. Обнаружение вращательной модуляции блеска звезд спектрального класса A прямо указало на наличие пятен на их поверхности. В принципе, природа появления этих пятен может различаться — это могут быть либо пятна химического состава (см. [17]), либо температурные неоднородности (в литературе обсуждаются как горячие пятна [18], так и пятна солнечного типа, вызванные локальным понижением температуры). Первая из рассматриваемых возможностей приводит к традиционному решению —

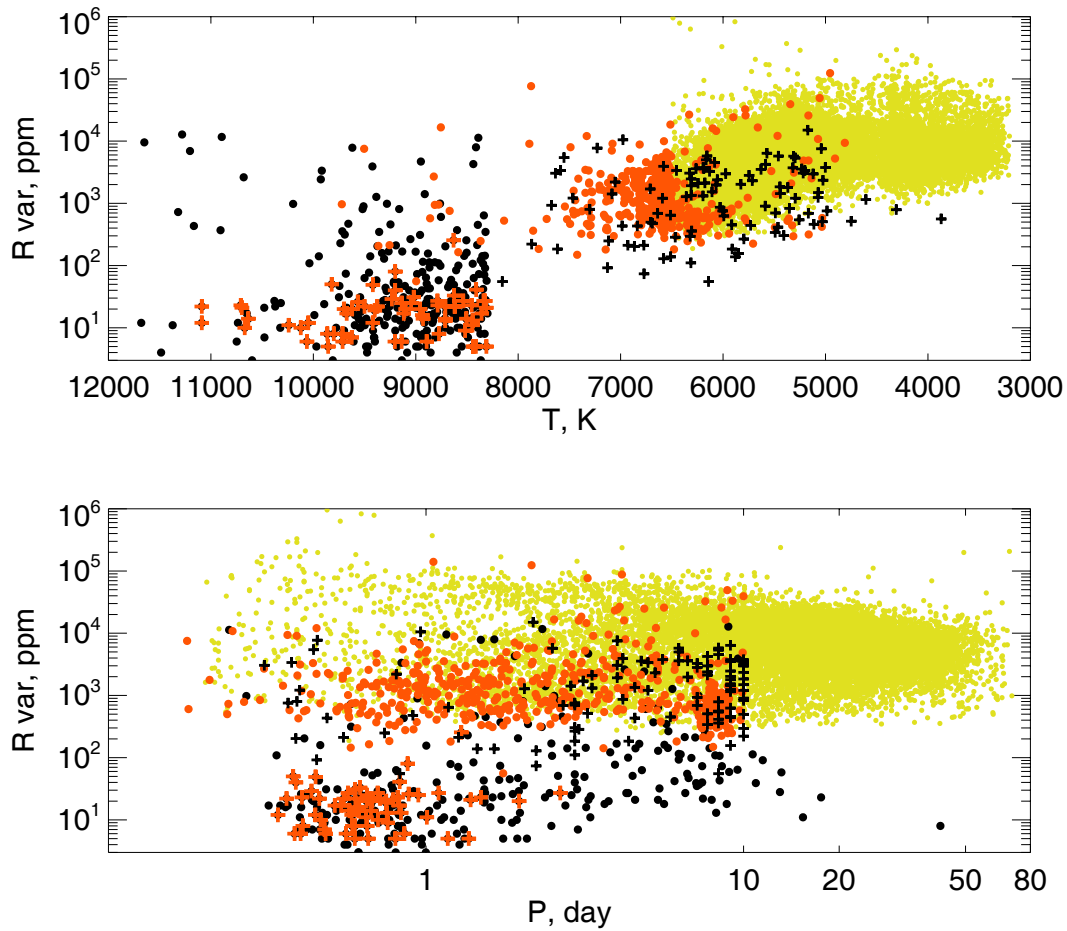


Рисунок. Зависимость параметра R_{var} от эффективной температуры (а) и периода звезд (б). Данные для 34 030 звезд из [3] представлены маленькими желтоватыми кружками. Результаты исследования [8] — крупные оранжевые кружки, темные символы “плюс” — данные для скопления NGC 6866 [10]. Темные кружки — данные [12] для объектов ROT, оранжевые символы “плюс” — для объектов ROTD.

мы имеем дело с пятнами элементов на поверхности химически-пекулярной звезды. Зарегистрированная вспышечная активность горячих звезд (например, спектрального класса A [12, 19]) существенно усложнит проблему, если будет подтверждена достоверность найденных вспышек. Наличие вспышек должно указывать на присутствие локальных магнитных полей у A-звезд, подобных полям звезд поздних спектральных классов. Согласно современным представлениям у звезд спектрального класса A отсутствует приповерхностная конвективная область. Рентгеновские наблюдения указывают на отсутствие корон у A-звезд. Но, в принципе, появление слабых магнитных полей на поверхности A-звезд теоретически допустимо в приближении, когда конвекция может быть заменена турбулентностью в условиях сильного дифференциального вращения. Обсуждение теоретических работ, посвященных локальным магнитным полям у A-звезд, можно найти в вышеуказанных статьях L. Valona [12–16] и [20, 21].

Постараемся ответить на вопрос о том, что может дать сопоставление периодов вращения и амплитуды переменности блеска A-звезд с соответствующими данными для более холодных объектов с известными свойствами магнитной активности. Как и в [8], в настоящей работе мы будем пользоваться фотометрическими данными, полученными с космическим телескопом Кеплер. Согласно [12], вращательная модуляция блеска изучаемых B- и A-звезд вызвана наличием пятен на их поверхности. Звезды с вращательной модуляцией блеска автор [12] отнес к типу ROT и ввел новый тип — ROTD — для звезд со специфической переменностью (об их свойствах см. ниже). Согласно [12], число объектов ROTD составляет порядка 20% от числа ROT. В этой же работе [12] Балона выполнил сравнение температур каталога MAST с опубликованными в литературе данными спектральных исследований и показал, что различия для выборки из 107 объектов составляют величину 144 ± 24 K, систематических отклонений нет.

Для выбора объектов дальнейшего анализа мы использовали данные таблицы 1 из [12], содержащей сведения о 639 звездах. Первоначально мы отобрали только звезды, обладающие вращением: тип ROT (341 звезда) и тип ROTD (66 звезд). В окончательный список были включены только объекты с хорошо известными температурой атмосферы и периодом вращения — всего 312 звезд: 247 — ROT и 65 — ROTD. Как уже упоминалось, тип ROTD был введен в работе [12] для звезд со специфической переменностью. Спектры мощности этих объектов содержат характерные особенности, включающие узкий пик, а также на меньших частотах — широкий пик (состоящий из многочисленных деталей меньшей амплитуды). Как отмечено в [12], природа появления такого набора пиков на спектрах мощности изучаемых объектов осталась не до конца понята. Согласно одной интерпретации, группы пиков могли бы соответствовать пятнам, расположенным на различных широтах звезд, обладающих дифференциальным вращением. Несмотря на то, что такая конфигурация пиков никогда не наблюдалась в спектрах мощности холодных, активных, дифференциально-вращающихся звезд, наше исследование [22], основанное на анализе переменности блеска 12 звезд спектрального класса A, принадлежащих к объектам типа ROTD, показало, что на спектрах мощности, построенных по каждому из сетов наблюдений длительностью около 90 суток, пик, соответствующий значению F1 (phot), присутствует на большинстве диаграмм, но не всегда он максимален по амплитуде. Этот пик 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 суток. Это могут быть как волны Россби (см. ниже), 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 $\Delta\Omega$. Они 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 составляет 0.61 ± 0.10 рад/сут.). Альтернативные объяснения сложной структуры пиков на спектрах мощности состояли в предположениях о наличии планеты или тел на синхронной орбите, о существовании эффекта отражения в системах без затмения и прочее (см. [12]). Объяснение особен-

ностей спектра мощности звезд ROTD было дано в [23], по мнению авторов оно связано с проявлением колебаний набора мод Россби. Сопоставляя теоретические и наблюдаемые с телескопом Кеплер спектры мощности, авторы [23] обнаружили эти моды у звезд спектральных классов B, A и F главной последовательности, у запятанных звезд, у объектов типа γ Dor и др.

На рисунке данные для ROT и ROTD звезд представлены крупными темными кружками и светлыми плюсами соответственно. Во-первых, можно заключить, что данные в случае звезд типа ROTD образуют более компактную группу, для которой величина параметра R_{var} практически не меняется для всего диапазона изменений T_{eff} . Изменения величины параметра R_{var} для звезд типа ROT лежат в более широких пределах. Во-вторых, по уровню переменности блеска эти объекты или сопоставимы с холодными активными карликами, или существенно меньше его. Величина параметра R_{var} для звезд с эффективными температурами 6500–7500 K примерно на полтора порядка выше, чем для звезд типа A. Без данных для объектов температурного диапазона 7500–8300 K не ясно, можно ли сделать вывод о наличии единой зависимости рассматриваемого параметра во всем температурном диапазоне. На Рисунке b приведена диаграмма зависимости параметра R_{var} от периода вращения объектов. Как указывалось, диаграммы подобного вида рассматривались ранее в [6, 7]. Установленные величины R_{var} для A-звезд лежат ниже последовательности быстровращающихся активных объектов. Звезды типа ROT имеют большую активность в случае объектов с периодами вращения порядка 10 суток. Отметим, что звезды спектрального класса F (и объекты из скопления NGC 6866) попадают на другую последовательность — быстровращающихся объектов с малой амплитудой переменности блеска.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения космического телескопа миссии Кеплер на протяжении 4 лет позволили получить непрерывный ряд фотометрических данных сверхвысокого уровня точности для большой выборки звезд. На их основе были выполнены определения периодов вращения P и амплитуд переменности блеска R_{var} десятков тысяч звезд. Рассматривая параметр R_{var} в качестве индикатора активности объектов, мы изучили диаграммы зависимости R_{var} от эффективной температуры и периода вращения звезд. Общий набор данных дает представление об изменениях параметра амплитуды переменности блеска у звезд, обладающих конвекцией. Было установлено, что предел применимости гирохронологического соотношения PtM соответствует

не предельной величине $(B - V)_0 > 0.47$, а связь между периодом вращения и цветом также видна вплоть до групп звезд с $(B - V)_0 = 0.2$. Показано, что величина параметра R_{var} в случае звезд с эффективными температурами 6500–7500 К примерно на полтора порядка выше, чем для звезд типа А. Указания на монотонный характер изменений параметра и вывод о наличии его единой зависимости во всем температурном диапазоне могут быть получены только после установления достоверных данных об изменениях R_{var} для объектов в диапазоне T_{eff} 7500–8300 К. Авторы исследования [8] предполагают, что либо роль конвекции при генерации локальных магнитных полей у горячих звезд не до конца понятна, либо иные физические процессы приводят к реализации стандартного соотношения $R_{\text{var}} - P$. На диаграмме $R_{\text{var}} - P$ звезды спектрального класса А образуют дополнительную последовательность быстровращающихся активных объектов, а близкие к ним по температурам звезды спектрального класса F (и объекты из скопления NGC 6866) попадают на другую (лежащую выше) последовательность быстровращающихся объектов с малой амплитудой переменности блеска.

Следует признать, что анализ диаграмм на Рисунке пока еще прямо не указывает на наличие единой связи между свойствами вращательной активности у звезд спектральных классов А, F и более поздних. Тем не менее нельзя сказать о том, что гипотезу о магнитном происхождении активности, наблюдаемой у А-звезд (вращательная модуляция блеска, пятна, вспышечная активность, дифференциальное вращение), следует считать отвергнутой. В настоящее время мы не можем привести однозначных доказательств того, что переменность блеска звезд спектрального класса А обусловлена вращательной модуляцией температурных пятен, а не пятен химического состава. Нужны новые высокоточные спектральные и спектрополяриметрические наблюдения (мы надеемся в будущем провести их с новым спектрополяриметром телескопа БТА САО РАН), подобные тем, что указывают на присутствие магнитных структур на поверхности горячих А-звезд (см., например, исследования Am-звезд в [24]). В работе [25] для горячей Am-звезды γ Gem по спектрополяриметрическим наблюдениям были найдены период вращения звезды 8.97 суток, магнитное поле около 30 Гс и слабое дифференциальное вращение с величиной порядка 0.008 рад/сут. Каким образом связаны указанные магнитные структуры с пятнами (химического состава или температурными), предстоит установить в будущем. Однако в настоящее время уже можно отметить работу [26], в которой приводятся аргументы в пользу наличия поверхностных температурных неоднородностей на поверхности Веги, самой известной звезды спектрального класса А0,

а именно, присутствия примерно в равной доле смеси горячих и холодных пятен. Согласно классическим представлениям ранние А–В звезды имеют радиативные атмосферы, однако последние наблюдательные и теоретические исследования стали указывать на возможность генерации локальных магнитных полей у звезд этого типа — см., в частности, [27]. Это позволяет по-новому рассматривать проявления активности в широком диапазоне эффективных температур и спектральных классов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Reinhold, A. Reiners, and G. Basri, *Astron. and Astrophys.* **560**, A4 (2013).
2. T. Reinhold and L. Gizon, *Astron. and Astrophys.* **583**, A65 (2015).
3. A. McQuillan, T. Mazeh, and S. Aigrain, *Astrophys. J. Suppl.* **211**, 24 (2014).
4. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 83 (2015).
5. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **61**, 461 (2017).
6. J. R. A. Davenport and K. R. Covey, *Astrophys. J.* **868**, 151 (2018).
7. A. C. Lanzafame, E. Disteferano, S. Messina, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A16 (2018).
8. S. Chowdhury, S. Joshi, C. A. Engelbrecht, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **363**, 260 (2018).
9. S. A. Barnes, *Astrophys. J.* **586**, 464 (2003).
10. L. A. Balona, S. Joshi, Y. C. Joshi, and R. Sagar, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 1466 (2013).
11. L. A. Balona, T. Medupe, O. P. Abedigamba, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430**, 3472 (2013).
12. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 1830 (2017).
13. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431**, 2240 (2013).
14. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 2714 (2015).
15. L. A. Balona, M. Švanda, and M. Karlický, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 1740 (2016).
16. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 3420 (2012).
17. J. Krtička, L. Huang, M. Jagełka, et al., *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 170 (2018).
18. T. A. Ryabchikova, *IAU Symposium* **145**, 149 (1991).

19. T. Van Doorsselaere, H. Shariati, and J. Debosscher, *Astrophys. J. Suppl.* **232**, 26 (2017).
20. R. Arlt and G. Rüdiger, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 107 (2011).
21. R. Arlt, *Astronomische Nachrichten* **334**, 109 (2013).
22. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astrophysics* **62**, 48 (2019).
23. H. Saio, D. W. Kurtz, S. J. Murphy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, 2774 (2018).
24. A. Blazère, P. Petit, and C. Neiner, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 48 (2018).
25. A. Blazère, P. Petit, and C. Neiner, in *SF2A-2017: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics* (2017), pp. 73–77.
26. P. Petit, E. M. Hébrard, T. Böhm, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472**, L30 (2017).
27. M. Cantiello and J. Braithwaite, *Astrophys. J.* **883**, 106 (2019).

Variations in the Brightness Variability Amplitude of A–M Stars

I. S. Savanov

We study relations of the parameter R_{var} (amplitude of the brightness variability, stellar activity indicator) with respect to the effective temperature and the period of rotation of stars belonging to the A–M spectral types. A common dataset gives an idea of variations in this parameter for stars with convection. It was confirmed that the limit of applicability for the gyrochronological relation PtM does not correspond to the limiting value $(B - V)_0 > 0.47$, and the relationship between a rotation period and color is likewise visible up to groups of stars with $(B - V)_0 = 0.2$. It is shown that the value of the parameter R_{var} for stars with effective temperatures of 6500–7500 K are about an order of magnitude lower than that for stars, which indicates a nonmonotonic change of the parameter and, therefore, does not allow us to conclude that there is a single dependence of this parameter in the entire temperature range. In the diagram $R_{\text{var}}-P$ (the rotation period), A-type stars fall in the sequence of fast-rotating active objects, whereas stars with similar temperatures and belonging to the F spectral type (including objects from the cluster NGC 6866) lie in a different sequence corresponding to fast-rotating objects with a small amplitude in the brightness variability. The existence of a unified relationship between the properties of rotational activity in stars of spectral types A, F, and later, as well as possible physical processes leading to the implementation of a standard gyrochronological ratio and activity in A stars are discussed.

Keywords: *stars: rotation*