

Определение характерного времени для звезды Т Ориона и природа звезд типа RW Возничего

Н. Е. Курочкин

При помощи автокорреляционных функций определяется понятие о характерном времени для звезд с неправильными изменениями блеска (типа RW Aur). Характерное время выражает степень "связности" неправильной кривой блеска. Автокорреляционный анализ применен к звезде типа Т Ori, для которой П. П. Паренaго [1], дал сводную кривую блеска для некоторых хорошо пронаблюдаемых интервалов времени. Характерное время для Т Ori составляет $7^d.5 \pm 1^d.4$. Если считать, что это время—время распространения изменений в состоянии конвективной зоны, то протяженность конвективной зоны должна быть около 65000 км (при скорости конвекции ~ 100 м/сек). Многообразные формы кривых блеска звезд типа RW Aur могут качественно объясняться с единой точки зрения, предполагающей соответствующие изменения в состоянии конвективной зоны и перенос энергии во внешние слои звезды при помощи конвекции. Внешним агентом, изменяющим прозрачность внешних слоев звезды и вызывающим изменения в состоянии конвекции, может быть взаимодействие с пылевыми туманностями.

Determination of Characteristic Time for T Ori and the Nature of RW Aur Type Stars

by

N. E. Kurochkin

The concept about the characteristic time for stars with irregular brightness variation (of RW Aur type) is determined with the help of autocorrelation functions. The characteristic time expresses the degree of "connectedness" of the irregular light curve. The autocorrelation analysis is used for T Ori type star for which P. P. Parenago [1] gave a summary light curve for some well observed intervals of time. The characteristic time for T Ori is $7^d.5 \pm 1^d.4$. If this time is considered to be the time of the spreading of changes in the state of the convective zone then the convective zone should extend to 65000 km (with the convection velocity ~ 100 m/sec). Varied forms of light curves of RW Aur type stars may be explained qualitatively from the unified point of view which supposes both suitable changes in the state of the convective zone and transfer of the energy into the outer layers of a star with the help of convection. The contact with dust nebulae may be an outer agent which changes the transparency of the outer layers of a star and provokes changes in the state of convection.

Для изучения звезд типа RW Aur важно иметь новые методы обработки кривых блеска неправильных переменных, основанные на приемах статистического анализа. Понятие о характерном времени для случайных колебаний возникает при рассмотрении автокорреляционных функций.

Сдвинем кривую, представляющую изменения блеска неправильной переменной, вдоль оси времени на отрезок ΔT_1 . Определим коэффициент корреляции (r_1) сдвинутой кривой по отношению к ее исходному положению. Значения коэффициента корреляции r_1 будут зависеть от величины сдвига. Для неправильных колебаний существует некоторое максимальное значение $\Delta T_{\max}$, после которого коэффициент корреляции остается достаточно малым и связь между сдвинутой и несдвинутой кривой практически отсутствует. Если имеется такое $\Delta T_{\max}$, после которого r_1 всегда меньше 0.34, то $\Delta T_{\max}$ мы назовем характерным временем (по определению). Характерное время отражает "связность" неправильного процесса, характер его детерминированности. В том случае, если в процессе имеется скрытая периодичность, на автокорреляционной функции $[\Delta T_1, r_1]$ должны наблюдаться более или менее заметные пики. На этом основан известный метод периодограммного анализа и выявления слабых сигналов на фоне шумов. Нас будет интересовать только начальная часть корреляционной функции, так как ожидать в изменениях блеска звезд типа RW Aur скрытых периодичностей нецелесообразно.

Определение характерного времени было произведено для звезды T Ori, для которой П. П. Паренаго [1] дал достаточно полные сводные кривые блеска, построенные по средним наблюдениям за день. Были использованы два интервала, представленные на рис. 1: J.D. 2425850–26025 и 2428450–28625. Первый интервал имеет кривую блеска с ясно выраженным затменным характером, во втором интервале кривая блеска носит более неправильный характер. В работе П. П. Паренаго приводится кривая распределения наблюдений по интервалам звездных величин для 4840 наблюдений. Распределение наблюдений средних за день для выбранных двух интервалов было сравнено с общим распределением, данным в работе [1] (см. рис. 2). Использовался λ -критерий Колмогорова [2]. Оказалось, что поведение звезды во втором интервале J.D. 2428450–28625 было нетипичным, так как согласно критерию λ выборка наблюдений из общей совокупности (из всех 4840 наблюдений) является неслучайной. В первом интервале поведение звезды было типичным. Различие в поведении звезды хорошо заметно при рассмотрении рис. 1. Повидимому, мы имеем дело здесь с наиболее типичной и наиболее нетипичной для этой звезды кривыми блеска.

Отметим, что сравнение распределений наблюдений по корреляции кривых распределений, как это делает Ф. И. Лукацкая [3], является неправильным. Случайность или неслучайность выборки из общей совокупности или случайность сходства независимых распределений может быть доказана только на основе λ -критерия. Когда строятся кривые распределений частот наблюдений относительно среднего значения звездной величины в данном интервале наблюдений, вероятность большого значения коэффициента корреляции между такими кривыми распределений значительно возрастет. Действительно, даже у физически

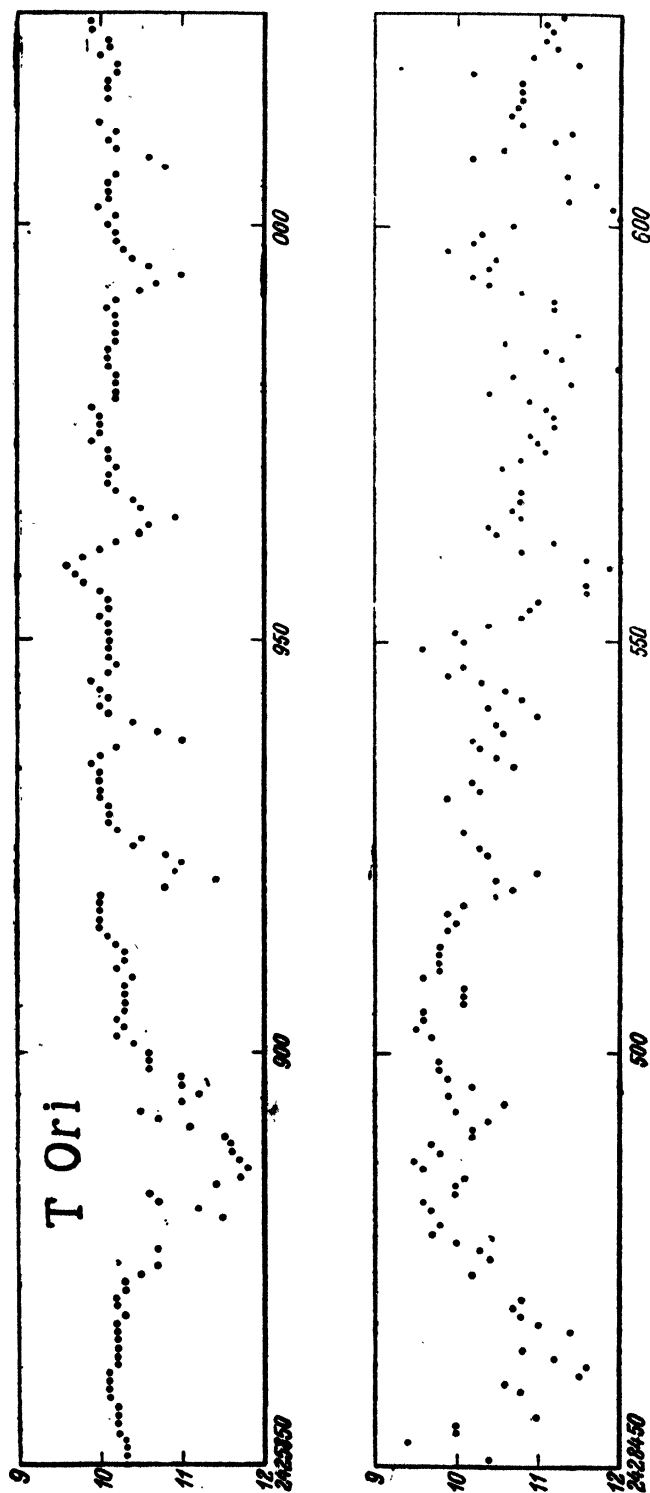


Рис. 1

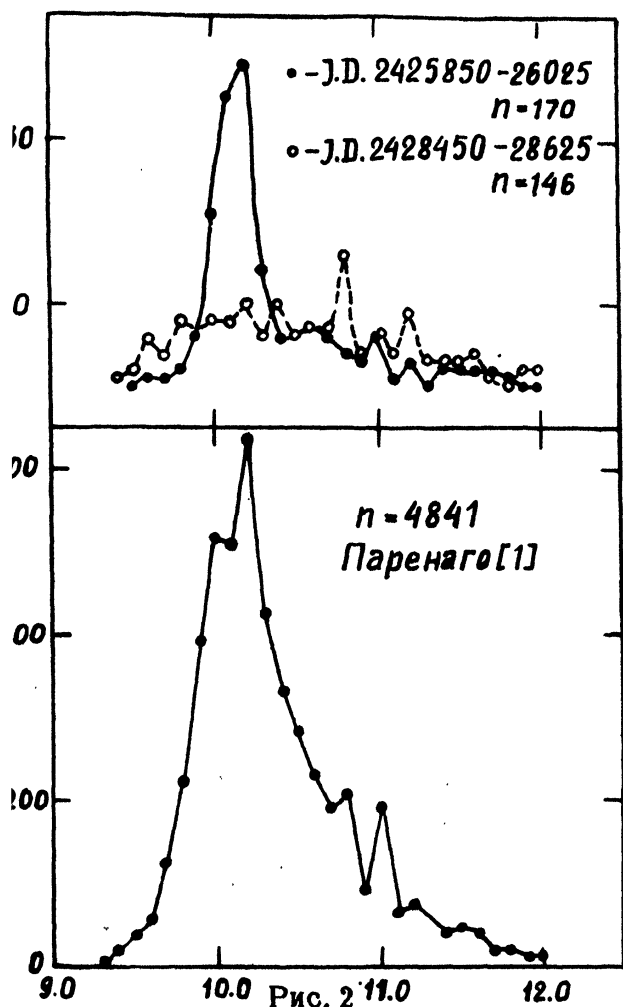


Рис. 2

различающихся типов звезд кривые распределений могут оказаться существенно сходными, иметь, например, значительный максимум вблизи среднего значения. Коэффициент будет в этом случае большим. Тем более это может случиться у одной и той же звезды в разных интервалах наблюдений, если кривые распределений строятся относительно среднего значения. Существование высокого максимума на каждой из кривой приблизительно в одном месте распределения может оказаться решающим при суждении о существовании корреляционной связи. Поэтому вывод Ф. И. Лукацкого о стационарности колебаний у звезд типа RW Aur представляется нам недостаточно обоснованным.

Вернемся к определению характерного времени для T Ori. При определении коэффициентов корреляции нужно разделить восходящую и нисходящую ветви. Точка считается находящейся на восходящей (нисходящей) ветви, если непосредственно следующая за ней точка находится выше (ниже) на кривой блеска. (см. рис. 1). Если следующая точка находится на том же уровне (остановка в блеске), наблюдение не учитывается. Знак первой производной, определенный таким путем, не зависел от величины сдвига ΔT_1 , знак точек сдвинутой кривой блеска не учиты-

сходящую ветви. Точка считается находящейся на восходящей (нисходящей) ветви, если непосредственно следующая за ней точка находится выше (ниже) на кривой блеска. (см. рис. 1). Если следующая точка находится на том же уровне (остановка в блеске), наблюдение не учитывается. Знак первой производной, определенный таким путем, не зависел от величины сдвига ΔT_1 , знак точек сдвинутой кривой блеска не учиты-

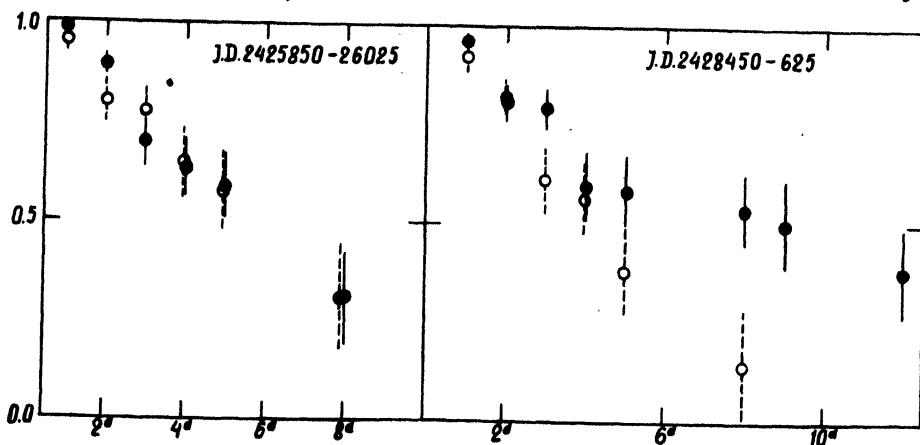


Рис. 3

вался. Сдвиг производился на $\Delta T_i = 1^d, 2^d, 3^d, 4^d, 5^d, 8^d, 9^d, 12^d$. В табл.1 и на рис.3 представлены значения корреляционной функции ($\Delta T_i, r_i$). Точки на графике относятся к восходящей ветви, кружки – к нисходящей.

Таблица 1.

Интервал J.D. 2425850– 2426025.

Восходящая ветвь.					Нисходящая ветвь.			
ΔT_i	n	r_i	σ_r	$ r \sqrt{n-1}$ *	n	r_i	σ_r	$ r \sqrt{n-1}$
1 ^d	64	0.985	0.004	7.78	47	0.950	0.015	6.45
2	60	0.896	0.025	6.90	47	0.800	0.052	5.45
3	59	0.700	0.066	5.32	46	0.775	0.059	5.20
4	58	0.637	0.077	4.78	43	0.647	0.088	4.20
5	59	0.590	0.085	4.50	46	0.575	0.098	3.86
8	58	0.308	0.118	2.31	45	0.312	0.134	2.06

Интервал J.D. 2428450– 2428625.

Восходящая ветвь.					Нисходящая ветвь.			
ΔT_i	n	r_i	σ_r	$ r \sqrt{n-1}$	n	r_i	σ_r	$ r \sqrt{n-1}$
1 ^d	61	0.960	0.010	7.40	59	0.920	0.019	6.98
2	66	0.800	0.044	6.48	61	0.820	0.042	6.35
3	59	0.790	0.050	6.00	58	0.608	0.083	4.60
4	54	0.595	0.089	4.35	60	0.563	0.088	4.34
5	56	0.586	0.088	4.34	61	0.383	0.109	2.96
8	61	0.540	0.091	4.15	51	0.144	0.137	1.02
9	55	0.505	0.111	3.71				
12	58	0.381	0.113	2.12				

Мы видим, что коэффициент корреляции почти линейно убывает со временем, что позволяет определить линейную функцию по способу наименьших квадратов. При этом учитывались веса каждой точки, обратно пропорциональные ошибкам в определении коэффициентов корреляции: $\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}$. Первая точка $r_0 = 1$ при $\Delta T_0 = 0$ была выкинута (вблизи нуля заметен нелинейный ход кривой). Характерное время (ΔT_{max} при $r = 0.34$ и при $r = 0.0$), определенной по аналитической зависимости, дано в табл.1.

Таблица 2.

Интервал 1 Интервал 2 Интервал 1 Интервал 2

	$r = 0.34$		$r = 0.0$	
Восходящая ветвь	7 ^d .30	9 ^d .27	10 ^d .63	13 ^d .97
Нисходящая ветвь	7 ^d .50	5 ^d .85	11 ^d .23	8 ^d .76
Средняя по четырем	7 ^d .48 ± 1.40		11 ^d .15 ± 2.16	

Выводы из табл.2 и рис.3: 1) нет систематического различия в ходе корреляционной функции и в характерном времени между восходящей и нисходящими ветвями (кривая блеска симметрична "в среднем"); 2) характерное время для T Ori составляет 7^d.5 или 15^d.0, если брать полный цикл изменений.

*) Критерий реальности корреляционной связи: связь считается реальной при $|r|\sqrt{n-1} > 3$ [2].

Рассмотрим физический смысл характерного времени. Характерное время определяет интервал времени, на котором неправильная кривая блеска в какой-то степени детерминирована. Если за изменения блеска ответственны какие-то физические образования, то характерное время — это среднее время жизни таких образований, время их возникновения и распада. Если сделать некоторые предположения о скорости распространения процессов, сопровождающих возникновение и развитие таких образований, мы приходим к понятию о характерных размерах возмущенных областей.

Предположим, изменения блеска вызываются взаимодействием звезды с темной пылевой материей. Согласно [1] тангенциальная скорость $T\ Ogi$ относительно туманности Ориона составляет 17 км/сек. Тогда при характерном времени 15^d размер пылевых облаков должен составлять $22 \cdot 10^6$ км, что на порядок больше, чем получил П. П. Паренaго и кажется более приемлемым. Чтобы вызвать простую экранизацию и изменения блеска до 3^m , плотность в пределах пылевого облака должна изменяться почти на порядок. П. П. Паренaго считал это невозможным, так как случайные флуктуации плотности пропорциональны $\sqrt{N}$ (N — число частиц в единице объема) и могут составлять только незначительную долю от средней плотности. Однако, плотность может изменяться на порядок и более, если предположить существование гравитационных или электромагнитных сил, которые могут концентрировать материю. Сложная картина изменений, которая наблюдается в спектрах звезд типа $RW\ Aur$ исключает предположение о простой экранизации, как причине изменения их блеска. Мы должны поэтому обратиться к другим предположениям.

Существование весьма хаотических движений газовых масс во внешних областях звезды с несомненностью подтверждается спектральными наблюдениями [4]. Линии в спектре $T\ Ogi$ показывают смещения с разнообразными скоростями, достигающими до десятков км/сек. Эти изменения в спектре, однако, не удалось связать с изменениями блеска. Если изменения блеска вызываются звуковыми волнами, распространяющимися во внешних слоях звезды, то характерная длина этих волн при скорости порядка одного-двух десятков км/сек должна равняться 10–20 млн. км, что составляет несколько радиусов звезды. Даже если звезда имеет гигантские размеры, она должна увеличиваться на 0.5 своего радиуса, чтобы можно было объяснить наблюдаемые изменения блеска. Возможно также существование ударных волн, однако, эти волны быстро диссипируют и могут быть ответственны лишь за кратковременные эмиссионные вспышки. Такие вспышки могут сливаться и давать в общем спектре постоянную эмиссионную картину, но они не могут объяснить больших амплитуд изменения блеска.

Третья возможная причина изменения блеска звезд типа $RW\ Aur$ — это изменения в конвективных слоях. Скорость движения конвективных элементов во внешних слоях Солнца (гранул) составляет, по современным определениям, 0.8 км/сек. Во внутренних областях звезд, где также возможна конвекция, скорость движения конвективных элементов должна быть намного меньше, так как вязкость во внутренних областях возрастает. Мы можем принять 100 м/сек, как оценочную величину. Фронт изменения интенсивности или скорости конвективных

движений (например, прекращение конвекции или ее возникновение) будет двигаться с той же скоростью 100 м/сек. Если изменения блеска связать с изменениями в интенсивности конвективного переноса энергии из внутренних слоев звезды во внешние, то характерное время можно отождествить со временем прохождения конвективной зоны. Размер этой зоны для τ Ori при $\Delta T_{\text{max}} = 7^{\text{d}}.5$ и скорости 100 м/сек должен составлять 65000 км. Это вполне приемлемая величина. Она совпадает с определениями толщины конвективной водородной зоны на Солнце [5].

Перенос энергии из внутренних слоев звезды во внешние в конвективной зоне осуществляется помимо лучистого переноса за счет конвекции. Доля энергии, переносимой конвекцией, может быть значительной в общем излучении звезды. В то же время незначительное изменение внешних условий, например, прозрачности внешних слоев или усиление термоядерных реакций в недрах звезды может существенно изменить как протяженность конвективной зоны, так и интенсивность переноса энергии. Эти изменения вызовут изменения в блеске звезды. Предполагая существование соответствующих изменений в конвективной зоне, можно объяснить многообразные формы поведения блеска звезд типа RW Aur.

Наиболее полную классификацию форм кривых блеска звезд типа RW Aur дал Венцель [6]. Мы отметим следующие формы поведения блеска этих звезд: 1) квазипериодические, цефеидообразные колебания; 2) колебания, имеющие затменный характер; 3) остановки в блеске; 4) волнообразные колебания с длинным периодом; 5) вспышки. Эти основные формы поведения встречаются иногда изолированно, иногда присутствуют в причудливом чередовании, создающим многообразие форм кривых блеска этих звезд. Отметим прежде всего, что роль конвекции в возбуждении колебаний блеска цефеид теперь не вызывает сомнений. Мы укажем на недавнюю работу Бом-Витензе [7], в которой качественно раскрывается механизм, поддерживающий колебания цефеид за счет усиленного переноса энергии в неустойчивой конвективной зоне. Согласно воззрениям Бом-Витензе, цефеиды находятся на границе возбуждения конвекции и небольшое изменение прозрачности внешних слоев, которое возникает при сжатии звезды, увеличивает градиент температуры в конвективной зоне, приводит к нарушению адиабатичности колебаний и возникновению конвекции. В течение нескольких часов существования интенсивной конвекции количество энергии, поступающей во внешние слои звезды резко возрастает и блеск звезды увеличивается (восходящая ветвь). Сопровождающее эти изменения увеличение радиуса звезды вызывает охлаждение и выравнивание температур. Конвекция подавляется после прохождения звездой максимума блеска.

Наличие у звезд типа RW Aur цефеидообразных колебаний указывает на возможное существование в них конвективного механизма, поддерживающего некоторое время квазипериодические колебания блеска. У цефеид конвекция сопровождает автоколебания, которые являются основным фактором изменения блеска. У звезд типа RW Aur вынос энергии за счет конвекции может быть основной причиной изме-

нения блеска, а изменение условий в конвективной зоне может привести к разнообразным формам переменности. Так в условиях существования более или менее устойчивой конвективной зоны временное ослабление конвекции или полное подавление ее приводит к изменениям блеска затменного характера. Временная стабилизация условий в конвективной зоне создает остановки в изменениях блеска на разных уровнях. Если звезда находится на границе возникновения конвекции, то случайное нарушение равновесия может привести к быстрому развитию конвективного процесса, что вызывает вынос энергии во внешние слои звезды и развитие явления вспышки.

Во внешних областях звезды движение конвективных элементов может перерасти в гидродинамические или ударные волны. В результате мы будем иметь изменения блеска меньшего масштаба. Энергия, вынесенная на поверхность звезды конвекцией, расходуется не только на излучение, но и на местные возмущения в атмосфере; возникают образования типа солнечных протуберанцев, гранул, эрупций. В спектре звезды эти явления, обычно мало влияющие на общее излучение, создают сложную картину эмиссионных линий, расщепления линий на компоненты с разными скоростями движения, а эрупции в крупных масштабах могут создавать непрерывную эмиссию, которая часто наблюдается у звезд типа RW Aur. Масштаб этих явлений будет зависеть от мощности движений в конвективной зоне.

Изложенные взгляды на природу звезд типа RW Aur позволяют правильно понять характер взаимодействия их с пылевой материей. Звезды этого типа обычно связаны с пылевыми туманностями. Гетц [8] нашел, что интенсивность эмиссий H_{α} в спектре звезды тем больше, чем более непрозрачно темное облако, в котором звезда находится. Многие звезды типа RW Aur связаны физически с отражательными кометообразными туманностями. В этих условиях пылевая материя несомненно попадает в атмосферу звезды. Такие звезды должны иметь в атмосферах избыток металлов, что увеличивает коэффициент поглощения по сравнению с обычными звездами. Процесс, повидимому, является динамическим, так что прозрачность внешних слоев то увеличивается, то уменьшается в зависимости от плотности взаимодействующей со звездой среды и скорости перемешивания. Увеличение непрозрачности во внешних слоях приводит к росту температуры во внутренних областях и увеличивает градиент температуры. При определенных условиях это может вызвать усиление конвекции. Когда звезда попадает в более прозрачную область, избыток металлов в ее атмосфере рассасывается, что приводит к частичному или полному подавлению конвекции. Временное равновесие наступает при прохождении слоев постоянной плотности. Все эти изменения сопровождаются колебаниями блеска. При этом колебания плотности пылевой среды совсем не должны быть значительны, особенно, если звезда находится на границе устойчивости конвективной зоны. Пылевая среда, таким образом, выступает как катализатор внутренних процессов, приводящих к значительным изменениям в состоянии звезды.

Качественная гипотеза, которая здесь изложена для объяснения основных свойств звезд типа RW Aur, требует дальнейшей конкретиза-

ции и теоретической разработки. Нам кажется, что предложенный нами метод позволит, после получения необходимого материала, правильно анализировать поведение неправильных звезд и получать из кривой блеска важные физические характеристики. Однако, для успешного применения метода требуются почти непрерывные наблюдения звезд типа RW Aur в течение месяцев, желательно фотозлектрические. Мы сможем тогда получать столь же надежные характеристики изменений блеска этих звезд, как и у периодических переменных. Если удастся построить теорию конвективных движений в звездах типа RW Aur, то кривая блеска будет давать картину состояния внутренних слоев звезды и, возможно, даст важные сведения о свойствах пылевых туманностей, которые связаны с этими звездами.

Л и т е р а т у р а

1. П. П. Паренаго, Труды ГАИШ, XXV, 214, 1954.
2. В. И. Романовский, Применения математической статистики в опытном деле, Гостехиздат, 1947.
3. Ф. И. Лукацкая, АЦ № 223, 1961.
4. G. H. Herbig, ApJ Suppl. S. IV № 43, 337, 1960.
5. E. Vitense, Zs.f.Ap. 32, 135, 1953.
6. W. Wenzel, VSS 5, H.1, 1961.
7. E. Bohm-Vitense, Zs.f.Ap, 56, № 1, 53, 1962.
8. W. Gotz, VSS 5, H.2, 1961.

Москва, ГАИШ
ноябрь, 1962 г.