АСТРОФИЗИКА

ТОМ 55 ФЕВРАЛЬ, 2012 ВЫПУСК 1

МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДЫ В ГАЗОПЫЛЕВЫХ ДИСКАХ. I. ФОМАЛЬГАУТ

Е.В.РУБАН, А.А.АРХАРОВ

Поступила 28 сентября 2011
Принята к печати 23 ноября 2011

Проведен однофакторный дисперсионный анализ средних квазимонохроматических величин Фомальгаута, α PsA, полученных в спектральном диапазоне 325-1080 нм в разные сезоны наблюдений и хранящихся в Пулковской базе спектрофотометрических данных (ПБСД). Общая дисперсия результатов, объединенных по нескольким сезонам, разложена на составляющие, характеризующие фактор случайности и фактор переменности в отдельности. Показано, что влияние фактора переменности на дисперсию средних величин значимо с доверительной вероятностью больше 95%. Оценена амплитуда переменности - 0".02-0".03. Сделано предположение, что основными причинами, вызывающими переменность, являлись пульсации фотосферы (изменение температуры на ~40 K и радиуса на ~0.5%) и вариации рассеяния излучения пылью околозвездного диска в результате его крупномасштабной неоднородности. По данным каталога Hipparcos обнаружена переменность звезды в полосе *Hp* с амплитудой ~0".017 и периодом 20.6 d. Сделано предположение, что в диске, окружающем звезду, существует область с повышенной концентрацией частиц, которая, участвуя в кеплеровском вращении, периодически затмевает звезду. Предложено также другое объяснение - прохождение неизвестной планеты по диску звезды. Существование планеты на расстоянии ~0.2 а.е. от звезды требует подтверждения.

Ключевые слова: *спектрофотометрия:фотометрия:микропеременность - объект:α PsA*

1. *Введение*. Работа посвящена исследованию результатов спектрофотометрических и фотометрических наблюдений молодых звезд, окруженных протяженными газопылевыми дисками: Фомальгаута (α PsA, HD 216956, BS=HR 8728 [1]), Веги (α Lyr, HD 172167, BS 7001) и β Pic (HD 39060, BS 2020). Звезды являются нормальными, лежат на Главной последовательности и относятся к спектральным классам A3 V, A0 V и A6 V, соответственно. Часто, особенно Вега и Фомальгаут, используются как стандартные. Знание и, по возможности, учет влияния протяженных областей газа и пыли вокруг стандартных звезд на результаты наблюдений этих звезд очень важны.

В последние годы в газопылевых дисках многих звезд, в том числе в дисках Фомальгаута и β Pic, были обнаружены планеты [2,3]. В диске Веги планета пока не найдена, однако обнаружены большие, размером более 1 мм, твердые частицы, нагретые до температуры 85 K и ответственные за большой ИК-избыток в излучении звезды на 25, 60 и 100 мкм [4]. Такие большие частицы не могли быть выброшены звездой (значительного истечения материи из Веги нет) и, предположительно, образовались из

окружающего звезду облака газа и пыли.

Учитывая относительно молодой возраст звезд, ~290 млн лет (α PsA) [5], ~455 млн лет (α Lyr) [6] и ~20 млн лет (β Pic) [5], предполагается, что их газопылевые диски являются протопланетными системами, в которых продолжается образование планет.

Исследование протопланетных систем актуально для изучения условий происхождения и существования больших массивных тел в окрестностях звезд. Особенно оно актуально по отношению к близким соседям Солнца, к которым относятся исследуемые звезды (расстояние до Фомальгаута и Веги ~8 пк [5,7], до β Pic ~19 пк [5]).

Статистически значимых различий в эмиссиях пылевых дисков звезд с планетами и без планет не выявлено [8]. Обнаруженные различия дисков исследуемых звезд относятся к их ориентации. У Фомальгаута ось диска отклонена от луча зрения на ~20° [9], у быстровращающейся Веги, ориентированной к наблюдателю полюсом [10], диск лежит практически в картинной плоскости, у β Pic - повернут ребром [11].

В первой части настоящей работы исследуются результаты наблюдений Фомальгаута. О планете Fomalhaut b (Fom b) известно следующее: обнаружена она в 2008г. в пылевом поясе на расстоянии около 119 а.е. от звезды, имеет массу не больше 3-х масс Юпитера [12-14], обращается вокруг звезды за ~320000 дней [15]. В каталоге экзопланет она называется HD 216956 b [15].

Для исследования использовались результаты фотометрических наблюдений, приведенных в каталоге Hipparcos [16], и спектрофотометрических наблюдений, хранящихся в Пулковской базе спектрофотометрических данных (ПБСД), послужившей основой для создания Пулковского спектрофотометрического каталога (ПСК) [17,18].

2. *Результаты наблюдений.*

2.1. *Результаты спектрофотометрических наблюдений.* Как известно, данные ПСК основывались на результатах 20-летних спектрофотометрических наблюдений, сгруппированных в 21-м сезонном каталоге. Полученные в исследуемом спектральном диапазоне, 325-1080 нм, в каждой длине волны, λ, с шагом 2.5 нм значения абсолютизированных квазимонохроматических освещенностей от звезды на внешней границе земной атмосферы, $E(\lambda)$ (в эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ см$^{-1}$), представлялись в виде $m(\lambda) = -2.5 \log E(\lambda)$ и усреднялись по числу наблюдений за сезон. Усредненные величины $m_k(\lambda)$, а также их среднеквадратичные (стандартные) ошибки, $S_k(\lambda)$, заносились в текущий (сезонный) каталог k. В течение сезона звезда, как правило, наблюдалась несколько раз в разные ночи вблизи кульминации. Длительность сезона определялась неизменностью места наблюдений, телескопа, спектрального диапазона и регистрирующей аппаратуры и составляла от нескольких месяцев до нескольких лет.

После завершения работ по созданию ПСК нами был проведен дисперсионный анализ результатов наблюдений всех звезд. В результате анализа было показано, что многие звезды (~30%), в том числе нормальные, имели небольшие ($\Delta m < 0^m.1$) реальные изменения квазимонохроматических величин [19-23]. Эти изменения проявлялись как в различии результатов между сезонами, так и в плавном ходе или скачках величин внутри сезонов. В указанных статьях в качестве численной характеристики переменности были приведены максимальные изменения величин. Так, максимальные изменения величин звезды α PsA составляли $0^m.05$-$0^m.08$.

Предполагая, что влияние окружающего диска, а, тем более, планеты, на наблюдаемые параметры звезды малы, мы в настоящей работе попытались получить средние статистически значимые параметры микропеременности Фомальгаута, опираясь на большое (>300) количество его наблюдений. В качестве исходного материала использовались средние величины сезонных каталогов. Исходя из результатов анализа [20], были отобраны 8 наиболее надежных каталогов. Их условные номера, согласно [24], приведены в табл.1. В ней указаны также годы наблюдений ("*b*" и "*e*" - первая и вторая половины года, соответственно); спектральный диапазон, $\lambda\lambda$; телескоп; количество наблюдений звезды за сезон, N_k; группы каталогов, которые рассматривались совместно при дальнейшем статистическом анализе.

Все вычисления проводились в длинах волн реального континуума, свободных от сильных линий и полос поглощения.

Таблица 1

СЕЗОНЫ НАБЛЮДЕНИЙ

k	Годы	$\lambda\lambda$, нм	Телескоп	N_k	группа
1	1971-1973	325-737.5	АЗТ-7	230	
4	1985-1986	"	"	17	
5	1987	"	"	23	I
7	1989b	"	"	3	
9	1990-1991	"	"	7	
16	1987e	510-1080	Цейс-600	10	
17	1988	"	"	11	II
19	1989	"	"	14	

Характеристикой результатов наблюдений звезды являлась стандартная ошибка $S_{N_k}(\lambda)$, которая вычислялась из ошибки средних величин как

$$S_{N_k}(\lambda) = S_k(\lambda)\sqrt{N_k}\,, \qquad (1)$$

где N_k - количество наблюдений звезды за сезон.

Очевидно, что при наличии микропеременности ошибка наблюдений обусловливалась как случайными факторами, так и фактором переменности излучения. Рассмотрим влияние этих факторов отдельно.

2.2. *Влияние фактора переменности.* Влияние фактора переменности наиболее заметно на различии средних величин разных каталогов, поскольку ошибки средних значений, $S_k(\lambda)$, в $\sqrt{N_k}$ раз меньше ошибок наблюдений, $S_{N_k}(\lambda)$ (1). Различие средних величин иллюстрируется рис.1 в ультрафиолетовой области спектра (325-355 нм). На нем средние за сезон величины, $m_k(\lambda)$, построенные в длинах волн реального континуума, плавно соединены линиями разных типов для разных сезонов. На "усах" показаны ошибки средних величин. (Об остальных обозначениях см. ниже).

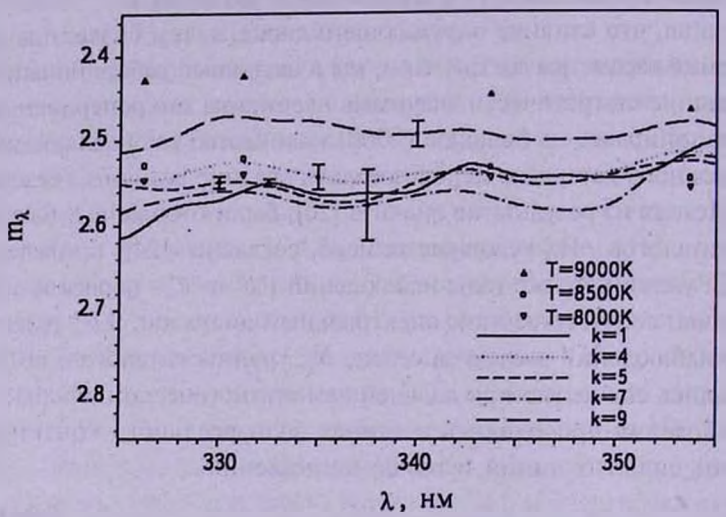

Рис.1. Средние распределения энергии в континууме, $m_\lambda(\lambda)$, полученные в сезоны k в ультрафиолетовом участке спектра Фомальгаута; на "усах" отложены ошибки средних величин; разными символами нанесены теоретические значения m_λ для разных температур T (нормировка в λ555 нм).

На рисунке отчетливо видно отличие результатов каталога 9 от остальных. Проверить значимость этих различий можно по критерию Стьюдента. Согласно критерию, если различие средних значений, $m_\lambda(k_1) - m_\lambda(k_2)$, полученных в сезоны k_1 и k_2, превосходит величину

$$T_{k_1,k_2}(\lambda) = \left[t_{0.95}(f_{k_1})S^2_{k_1}(\lambda) + t_{0.95}(f_{k_2})S^2_{k_2}(\lambda)\right] \Big/ \sqrt{S^2_{k_1}(\lambda) + S^2_{k_2}(\lambda)}, \qquad (2)$$

где $f_{k_1} = N_{k_1} - 1$ и $f_{k_2} = N_{k_2} - 1$ - степени свободы для рядов наблюдений k_1 и k_2, а $t_{0.95}(f_{k_1})$ и $t_{0.95}(f_{k_2})$ - квантили распределения Стьюдента для этих же рядов, то различие значимо с доверительной вероятностью >95%. (Здесь и далее использовались статистические формулы, критерии и таблицы квантилей из книги Пустыльника [25]).

Вычисленные по формуле (2) значения T для сравниваемых каталогов в каждой длине волны континуума в интервале λλ325 – 355 нм, усредненные по интервалу, следующие: $T_{1,9} \approx 0^m.038$, $T_{4,9} \approx 0^m.016$, $T_{5,9} \approx 0^m.015$,

$T_{7,9} \approx 0^m.082$. Различия наблюденных величин сравниваемых каталогов, усредненные в этом же интервале, следующие $m(1)-m(9) \approx 0^m.063$, $m(4)-m(9) \approx 0^m.046$, $m(5)-m(9) \approx 0^m.058$, $m(7)-m(9) \approx 0^m.074$. Как следует из сравнения, $m(k_1)-m(9) > T_{k_1,9}$ для всех значений k_1, кроме $k_1 = 7$ (для этого каталога из-за очень большой ошибки доверительная вероятность значимости результатов <95%).

Очевидно, что фактор переменности, влияя на средние величины, влияет и на дисперсию результатов, объединенных по нескольким сезонам. Приближенную оценку этого влияния можно провести с помощью однофакторного дисперсионного анализа [25]. Основная задача, которую решает анализ - это разложение общей дисперсии на составляющие, которые характеризовали бы фактор случайности и фактор переменности в отдельности.

2.3. *Влияние фактора случайности.* Фактор случайности в равной степени влияет на все звезды данной величины, наблюдавшиеся в одинаковых условиях. Фактор же переменности индивидуален и присущ разным звездам в разной степени.

Очевидно, что случайная составляющая равна наименьшей ошибке результатов наблюдений в заданном сезоне в рассматриваемом диапазоне звездных величин. Если наблюдения какой-то звезды не подверглись действию других, кроме случайных, факторов, то ошибка ее наблюдений и будет равна случайной ошибке. Если таких звезд несколько и дисперсии их различаются незначимо, то дисперсии этих звезд являются выборочными оценками одной и той же генеральной дисперсии.

Значимость различия дисперсий, $S^2_{N_{1,k}}$ и $S^2_{N_{2,k}}$, двух звезд можно проверить по критерию Фишера:

$$S^2_{N_{1,k}} / S^2_{N_{2,k}} \le F_{0.95}(f_1, f_2), \qquad (3)$$

где $F_{0.95}(f_1, f_2)$ - квантиль Фишера для доверительной вероятности 95% и степеней свободы $f_1 = N_{1,k}-1$ и $f_2 = N_{2,k}-1$ ($N_{1,k}$ и $N_{2,k}$ - количества наблюдений первой и второй звезд соответственно). Если неравенство (3) выполняется, то различие между дисперсиями считается незначимым.

Выполнимость критерия (3) проверялась нами по двум звездам с малыми ошибками в каждом сезоне, указанном в табл.1. По критерию Фишера проверялись также между собой наименьшие дисперсии разных сезонов. При выполнении критерия можно считать, что дисперсии, участвующие в проверке, являлись оценками дисперсии случайности. Достоверность этой оценки тем выше, чем больше число степеней свободы (больше количество наблюдений). Для повышения достоверности нами были вычислены средневзвешенные дисперсии отобранных звезд каждой группы:

$$S_0^2(\lambda) = \frac{1}{\sum_i (N_{i,k}-1)} \sum_i (N_{i,k}-1) S^2_{N_{i,k}}(\lambda). \qquad (4)$$

Здесь суммирование проводилось по всем отобранным звездам, i, данной группы; $N_{i,k}$ и $S_{N_{i,k}}$ - количество наблюдений и стандартная ошибка наблюдений i-той звезды в k-м сезоне.

Количество наблюдений, $N_{i,k}$, используемое для вычисления средневзвешенной случайной дисперсии (4), приведено в табл.2. В ней i - номер звезды по каталогу BS [1], k - номер сезона. В последнем столбце приведены номера групп, объединяющих соответствующие сезоны.

Числа степеней свободы, $f = \sum_i (N_{i,k} - 1)$, для случайной дисперсии $S_0^2(\lambda)$ (4) в указанных группах следующие: $f_I = 275$ (группа I) и $f_{II} = 143$ (Группа II).

Определив случайную составляющую дисперсии, можно найти и дисперсию фактора переменности.

Таблица 2

КОЛИЧЕСТВО НАБЛЮДЕНИЙ, $N_{i,k}$, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОЙ СЛУЧАЙНОЙ ДИСПЕРСИИ; i, k - НОМЕРА ЗВЕЗД И СЕЗОНОВ

k \ i	BS 1791	BS 3982	BS 7001	BS 7557	BS 8781	Группа
1		7		3		
4	61	26				
5				32	74	I
7	32				21	
9	11	18				
16		5		5		
17	60		47			II
19	30			2		

2.4. ***Микропеременность***. Чтобы оценить дисперсию фактора переменности, необходимо определить дисперсию средних величин нескольких сезонов. Оценку дисперсии, $S_A^2(\lambda)$, средних каталожных величин Фомальгаута в каждой группе каталогов мы провели по следующей формуле [25]:

$$S_A^2(\lambda) = \frac{1}{K-1}\left[\sum_k m_k^2(\lambda) N_k - \frac{1}{\sum_k N_k}\left(\sum_k m_k(\lambda) N_k\right)^2\right]. \qquad (5)$$

Параметр K - количество каталогов в группе I и II, результаты которых использовались при усреднении: $K=5$ и $K=3$, соответственно. Вычисленная по формуле (5) дисперсия, $S_A^2(\lambda)$, имела степени свободы: $f_I = 4$ (I) и $f_{II} = 2$ (II).

После вычислений по формулам (4) и (5) надо было убедиться, что полученные дисперсии различаются значимо. Значимость отношения $S_A^2(\lambda)/S_0^2(\lambda)$ была проверена в каждой группе по критерию Фишера:

$$S_A^2(\lambda)/S_0^2(\lambda) > F_{0.95}(f_A, f_0). \qquad (6)$$

Квантили Фишера в этом неравенстве следующие: $F_{0.95}(4.275) = 2.4$ для группы каталогов I и $F_{0.95}(2.143) = 3.0$ для группы каталогов II.

Неравенство (6) выполнялось для обеих групп, т.е. влияние фактора переменности на дисперсию средних величин было значимо с вероятностью >95%.

После выполнения критерия (6) можно оценить дисперсию фактора переменности, $S_M^2(\lambda)$, по приближенной формуле [25]:

$$S_M^2(\lambda) \approx \frac{(K-1)\sum_k N_k}{\left(\sum_k N_k\right)^2 - \sum_k N_k^2}\left(S_A^2(\lambda) - S_0^2(\lambda)\right). \qquad (7)$$

Вариации звездного излучения, $\pm S_{M,\lambda}$, полученные как квадратный корень из дисперсии (7), представлены в величинах (m) в табл.3 для группы I и в табл.4 для группы II.

Таблица 3

ВАРИАЦИИ ЗВЕЗДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, $\pm S_{M,\lambda}$, ДЛЯ ГРУППЫ I

λ, нм	$m_{\lambda,\,mean}$	$\pm S_{M,\lambda}$, m	λ, нм	$m_{\lambda,\,mean}$	$\pm S_{M,\lambda}$, m
325.0	2.602	0.047	517.5	2.116	0.014
327.5	2.574	0.027	530.0	2.168	0.006
330.0	2.563	0.032	542.5	2.229	0.007
332.5	2.547	0.020	555.0	2.289	0.007
335.0	2.561	0.024	557.5	2.296	0.008
337.5	2.560	0.019	572.5	2.382	0.009
340.0	2.555	0.018	575.0	2.393	0.012
342.5	2.530	0.012	580.0	2.431	0.013
345.0	2.542	0.012	600.0	2.515	0.011
347.5	2.542	0.013	602.5	2.519	0.009
350.0	2.543	0.013	605.0	2.530	0.008
352.5	2.527	0.012	612.5	2.569	0.008
355.0	2.505	0.014	615.0	2.587	0.014
417.5	1.563	0.030	617.5	2.598	0.013
420.0	1.571	0.019	620.0	2.612	0.017
422.5	1.569	0.021	630.0	2.668	0.009
425.0	1.580	0.023	632.5	2.667	0,007
442.5	1.698	0.011	637.5	2.692	0.008
447.5	1.741	0.008	642.5	2.718	0.008
450.0	1.742	0.010	645.0	2.733	0.007
452.5	1.754	0.009	675.0	2.880	0.018
455.0	1.779	0.010	677.5	2.889	0.015
457.5	1.792	0.011	700.0	2.997	0.011
470.0	1.817	0.012	705.0	3.030	0.012
495.0	1.988	0.010	707.5	3.043	0.012
497.5	1.994	0.011	710.0	3.056	0.011
510.0	2.045	0.009	712.5	3.067	0.012
512.5	2.060	0.009			

Здесь же приведены средневзвешенные значения квазимонохроматических величин Фомальгаута в этих группах, $m_{\lambda,\,mean}$:

$$m_{\lambda,\,mean} = \frac{1}{\sum_k N_k} \sum_k N_k m_k(\lambda). \qquad (8)$$

В таблицах даны только те величины, изменение которых значимо (с вероятностью >95%) превосходило случайный разброс.

Результаты табл.3 и 4 проиллюстрированы на рис.2. На рис.2a приведены наблюденные средневзвешенные величины, $m_{\lambda,\,mean}$, для обеих групп каталогов (стандартные ошибки приведенных величин меньше размеров точек построения). На рис.2b нанесены вариации наблюденных величин, $\pm S_{M,\lambda}$,

Таблица 4

ВАРИАЦИИ ЗВЕЗДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, $\pm S_{M,\lambda}$, ДЛЯ ГРУППЫ II

λ, нм	$m_{\lambda,\,mean}$	$\pm S_{M,\lambda}$, m	λ, нм	$m_{\lambda,\,mean}$	$\pm S_{M,\lambda}$, m
515.0	2.103	0.017	705.0	3.048	0.022
520.0	2.115	0.012	707.5	3.049	0.021
542.5	2.228	0.011	710.0	3.064	0.028
555.0	2.293	0.012	712.5	3.110	0.017
557.5	2.314	0.014	715.0	3.112	0.023
560.0	2.326	0.012	717.5	3.113	0.019
562.5	2.337	0.016	740.0	3.230	0.020
575.0	2.396	0.011	742.5	3.234	0.014
580.0	2.418	0.018	745.0	3.241	0.014
582.5	2.417	0.015	747.5	3.246	0.010
585.0	2.430	0.016	750.0	3.242	0.010
587.5	2.451	0.016	800.0	3.452	0.010
590.0	2.468	0.012	802.5	3.458	0.008
592.5	2.481	0.014	825.0	3.565	0.025
595.0	2.482	0.015	827.5	3.566	0.015
597.5	2.488	0.012	832.5	3.592	0.015
602.5	2.510	0.013	835.0	3.596	0.016
610.0	2.556	0.019	837.5	3.611	0.014
612.5	2.570	0.016	860.0	3.649	0.009
615.0	2.588	0.009	882.5	3.693	0.012
620.0	2.611	0.015	970.0	3.949	0.024
622.5	2.622	0.013	972.5	3.960	0.023
632.5	2.668	0.011	975.0	3.966	0.021
635.0	2.676	0.012	977.5	3.960	0.017
640.0	2.706	0.015	980.0	3.965	0.019
645.0	2.742	0.010	982.5	3.968	0.011
675.0	2.921	0.025	987.5	3.986	0.014
677.5	2.928	0.019	990.0	3.997	0.012
680.0	2.940	0.021	1030.0	4.124	0.012
682.5	2.957	0.017	1047.5	4.177	0.015
697.5	3.032	0.012	1050.0	4.196	0.012
700.0	3.048	0.016	1067.5	4.253	0.013
702.5	3.050	0.019	1070.0	4.269	0.014

полученные для тех же групп. (Об остальных обозначениях см. ниже).

Поскольку разные группы относятся к разным сезонам наблюдений, то совпадение результатов в пересекающейся области спектра повышает их достоверность.

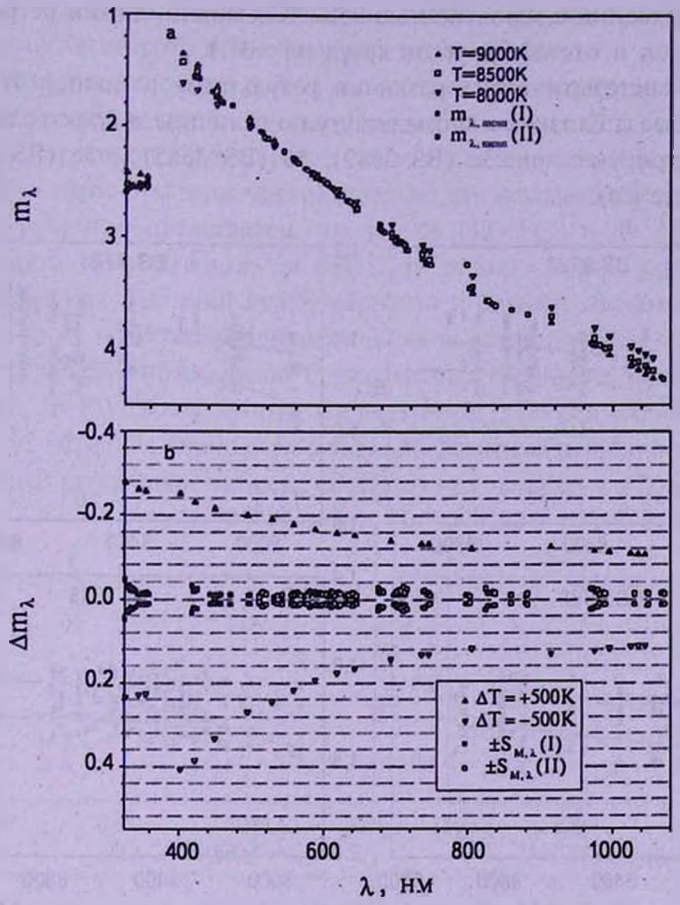

Рис.2. a - средневзвешенное распределение энергии в континууме Фомальгаута, $m_{\lambda,\text{теор}}(\lambda)$, для групп каталогов I, II и теоретические значения m_λ для температур T; b - вариации излучения Фомальгаута, $S_{M,\lambda}$, для групп I, II и теоретические вариации величин, Δm_λ, при изменении температуры на ΔT.

2.5. *Результаты фотометрических наблюдений.* Фомальгаут - одна из самых ярких звезд неба, $V = 1^m.17$. Известно [26], что результаты фотометрических наблюдений ярких звезд, приведенные в каталоге Hipparcos [16], имеют большие неопределенности. Действительно, для Фомальгаута мы обнаружили неучтенные систематические ошибки: различие данных *Vt* и *Bt* после прохождения света через наклонные и вертикальные щели, а также постепенное в течение трех лет уярчение звезды в обеих полосах. Это иллюстрируется рис.3a (*Vt*) и 3b (*Bt*). На рисунках нанесены наблюденные величины с указанием на "усах" стандартных ошибок. Черными кружками

обозначены результаты, полученные после первого прохождения (через наклонные щели), белыми - после второго (через вертикальные щели). Через те и другие точки проведены сплошные линии регрессии второго порядка, точечными линиями ограничены доверительные интервалы их допустимых значений с вероятностью 95%. Как видно, линии регрессий не пересекаются и отстоят друг от друга на ~$0^m.1$.

Такие же систематические различия результатов в полосе *Vt* двух прохождений звезд близких к Фомальгауту по величине и спектральному классу иллюстрируют рис.3c (BS 3982), 3d (BS 3685) и 3e (BS 4905) (обозначения те же).

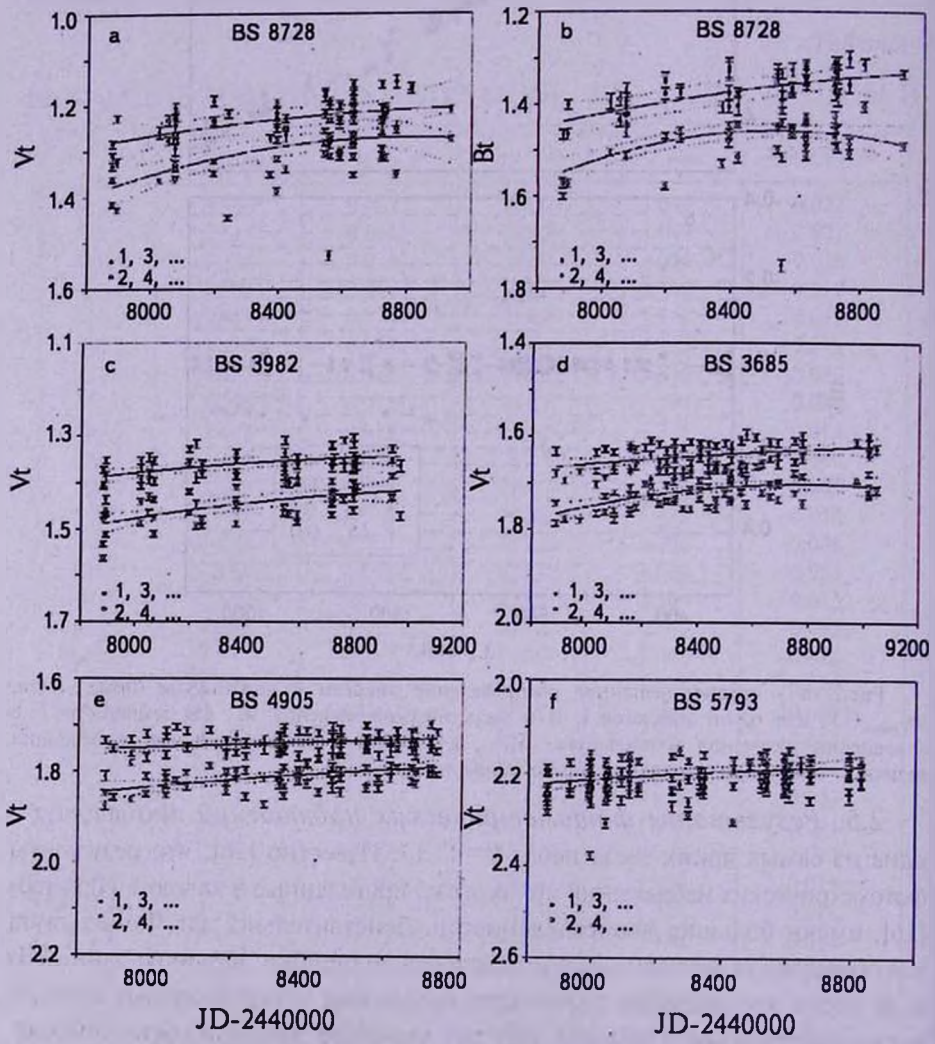

Рис.3. Величины *Vt* и *Bt* по данным каталога Hipparcos для звезд: a, b - BS 8728, c - BS 3982, d - BS 3685, e - BS 4905, f - BS 5793; черные кружки - первое прохождение звезды (1, 3, ...), белые кружки - второе прохождение звезды (2, 4, ...).

Наблюдаемые различия результатов после первого и второго прохождений звезды практически исчезают для более слабых звезд, что видно на рис.3f, построенного для звезды BS 5793. Результаты нашей предыдущей работы [27], полученные для звезд с величинами $Vt = 3^m.4 \div 5^m.6$, также показали, что превышение блеска звезд после первого прохождения над блеском после второго пренебрежимо мало, $-0^m.007$.

Поскольку в настоящей работе нас интересовал не систематический ход, а рассеяние результатов, то мы попытались преодолеть появившуюся трудность тем, что определили рассеяние точек относительно линий регрессии (Vt_{reg} и Bt_{reg} - ординаты этих линий) отдельно для наклонных и вертикальных щелей. Рассеяние представлено на рис.4a ($Vt - Vt_{reg}$) и 4b ($Bt - Bt_{reg}$) для Фомальгаута (обозначения те же). Как видно, точки перемешаны - систематических различий между черными и белыми точками нет.

Для поиска возможной периодичности мы использовали метод Фурье-анализа для временных рядов с разрывами. На рис.4c показан спектр мощности, 10^5 PW, вычисленный для ряда $Vt - Vt_{reg}$. По оси абсцисс отложена частота, ν, обратная периоду (в сутках, d). Максимальный по высоте пик, отмеченный штриховой линией, соответствует периоду $p = 20.6$ d. Ошибка

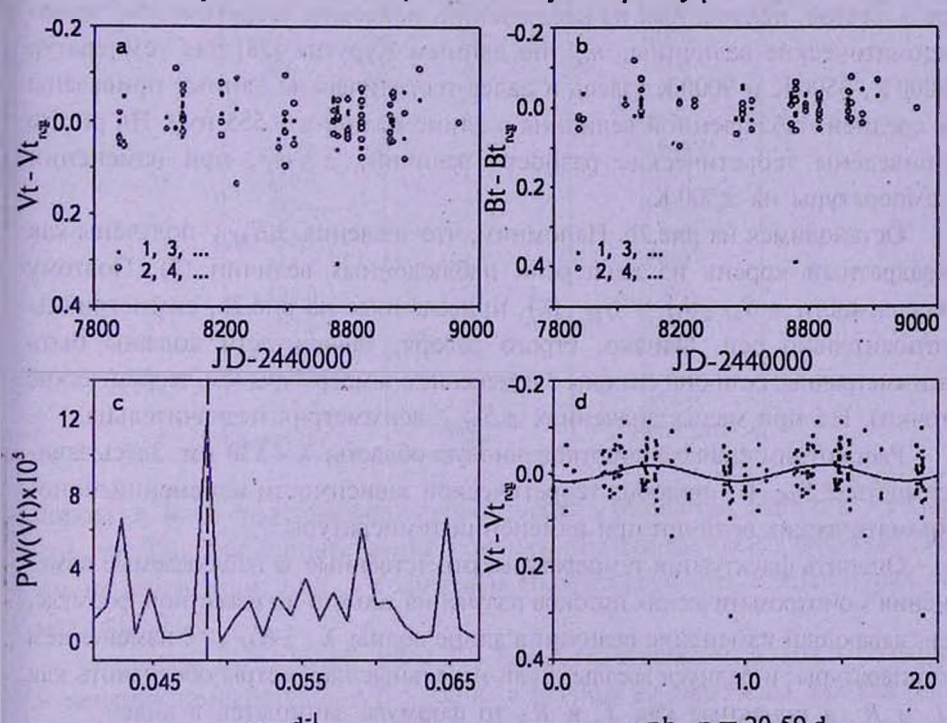

Рис.4. a - $Vt - Vt_{reg}$; b - $Bt - Bt_{reg}$; JD - юлианская дата; Vt_{reg} и Bt_{reg} - ординаты линий регрессии в соответствующую дату (см. рис.3a и 3b), обозначения те же, что на рис.3; c - спектр мощности, $PW(Vt) \cdot 10^5$, для ряда $Vt - Vt_{reg}$, ν - частота в d^{-1}; d - фазовая зависимость $Vt - Vt_{reg}$, p - период, ph - фаза.

периода равна ±0.6 d (получена из ширины пика). Пик превышает уровень шума в 5.6 раза. (Спектр мощности для ряда *Bt* не приводится, поскольку в нем оказалось несколько примерно одинаковых по высоте пиков, среди которых нам не удалось выделить основной).

Используя полученное для ряда $Vt - Vt_{ns}$ значение периода, мы свернули все наблюдения в ряду по фазам в один цикл. Результаты свертки приведены на рис.4d. По оси абсцисс отложены значения фаз, *ph*, по оси ординат - разности $Vt - Vt_{ns}$. Через точки проведена кривая приближенной регрессии (синусоида), $y = f(ph)$, с амплитудой $0^m.0169$. Так же, как в работе [27], была вычислена дисперсия величин от регрессионной кривой и корреляционное отношение, равное 0.729, выражающее силу связи, значимость которой определялась доверительной вероятностью >99.9% [25].

Таким образом, результаты как спектрофотометрических, так и фотометрических наблюдений Фомальгаута показали реальные, статистически значимые изменения звездного излучения с амплитудой ~$0^m.02$.

3. *Физические параметры микропеременности.*

3.1. *Физические параметры пульсаций.* На рис.2a, кроме результатов, полученных из наблюдений, нанесены теоретические монохроматические величины, m_λ, по данным Курутца [28] для температур 8000 K, 8500 K и 9000 K (здесь и далее теоретические данные привязаны к средней наблюденной величине в длине волны $\lambda = 555$ нм). На рис.2b приведены теоретические разности величин, $\pm\Delta m_\lambda$, при изменении температуры на ±500 K.

Остановимся на рис.2b. Напомним, что значения $\pm S_{M,\lambda}$ получены как квадратный корень из дисперсии наблюденных величин (7). Поэтому зависимости $+S_{M,\lambda}(\lambda)$ и $S_{M,\lambda}(\lambda)$, приведенные на рис.2b, симметричны относительно оси. Однако, строго говоря, зависимости должны быть асимметричны, если они связаны с изменением температуры (см. теоретические точки). Но при малых значениях $\pm S_{M,\lambda}$ асимметрия незначительна.

Рассмотрим сначала коротковолновую область, $\lambda < 530$ нм. Здесь зависимость $\pm S_{M,\lambda}(\lambda)$ подобна теоретической зависимости изменений монохроматических величин при изменении температуры.

Оценить флуктуации температуры, ответственные за наблюдаемые изменения монохроматических потоков излучения, можно по известной формуле, связывающей изменение величин в длине волны λ, $\pm S_{M,\lambda}$, с изменением температуры и радиуса звезды. Если начальные параметры обозначить как T_1 и R_1, а конечные как T_2 и R_2, то формула запишется в виде:

$$S_M(\lambda) = 1.56\,(1/T_1 - 1/T_2)/\lambda - 5\log(R_1/R_2) + \\ + 2.5\log\left[\left(1 - 10^{-0.624/\lambda T_1}\right)/\left(1 - 10^{-0.624/\lambda T_2}\right)\right]. \qquad (9)$$

После введения обозначения,

$$C_\lambda(T_1, T_2) = 2.5\log\left[\left(1-10^{-0.624/\lambda T_1}\right)\Big/\left(1-10^{-0.624/\lambda T_2}\right)\right], \qquad (10)$$

для любых двух длин волн, λ_1 и λ_2, будет справедливо равенство

$$S_M(\lambda_1) - S_M(\lambda_2) = 1.56(1/T_1 - 1/T_2)(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2) + \left[C_{\lambda_1}(T_1, T_2) - C_{\lambda_2}(T_1, T_2)\right]. \qquad (11)$$

В это равенство входит только один искомый параметр - температура. Если задать начальную температуру $T_1 = 8751$ K (эффективная температура звезды [5]), то задача сводится к нахождению T_2, а затем - к нахождению отношения радиусов (см. формулу (9)).

Оценка флуктуации температуры была проведена нами по данным табл.3 в длинах волн λ_1, короче 530 нм. Длина волны 530 нм использовалась в качестве длины волны сравнения, λ_2. Значение S_M (530) = $0^m.006$ - наименьшее в выбранной области спектра. Увеличение S_M в сторону

Таблица 5

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ΔT, и радиуса, R_2/R_1

λ, нм	ΔT, K	R_2/R_1
342.5	21	0.999
345.0	22	0.999
347.5	28	1.000
350.0	26	1.000
352.5	21	0.999
442.5	44	0.995
447.5	7	0.988
450.0	44	0.994
452.5	23	0.990
455.0	42	0.993
457.5	51	0.994
470.0	68	0.996
495.0	65	0.992
497.5	86	0.996
510.0	67	0.991
512.5	70	0.991
средн.	43±22	0.995±0.004

коротких волн подобно ходу теоретических разностей величин, $\pm\Delta m_\lambda$ (см. рис.2b). Для количественной оценки последний член в формуле (11) мы не учитывали: при $\lambda < 530$ нм и соответствующих температурах он мал, $<0^m.0025$.

Результаты вычислений $\Delta T = T_2 - T_1$ и R_2/R_1 приведены в табл.5. Большие изменения температуры, $\Delta T > 100$ K, в таблицу не включены, так как они, скорее всего, связаны с большими значениями S_M, которые обусловлены влиянием на излучение звезды дополнительных (нетепловых) факторов. Усредненные параметры пульсации звезды даны в последней строке табл.5: $\Delta T_{mean} \approx 40 \pm 20$ K, $(R_2/R_1)_{mean} \approx 0.995 \pm 0.004$. Как видно, разброс значений

очень большой, но даже в крайнем случае $\Delta T \neq 0$.

Кроме температуры, на излучение звезды в коротковолновой области могут влиять другие факторы, в частности, рассеяние света мелкими частицами и поглощение атомами газа.

3.2. *Рассеяние мелкими частицами.* Как следует из сравнения наблюденных и теоретических кривых на рис.2а, распределение энергии в спектре звезды в области длин волн короче 500 нм соответствует теоретической кривой с температурой ниже, чем 8500 K, т.е. спектрофотометрическая температура звезды ниже эффективной температуры (8751 K [5]). Это свидетельствует о том, что излучение фотосферы в континууме претерпело в вышележащих слоях поглощение или рассеяние, что понизило наблюдаемый поток звездного излучения. Такими слоями, по всей вероятности, являлись области окружающего звезду газопылевого диска. В них могло происходить и поглощение излучения газом, и рассеяние его пылью. Согласно теории [29], наибольшую роль в рассеянии излучения в видимой области спектра ($\lambda < 650$ нм) играет рассеяние света мелкими частицами с радиусом ≤ 0.1 мкм. Причем эффективность рассеяния растет с уменьшением длины волны. Рассматривая рис.2а, на котором отчетливо видно понижение потока излучения в сторону коротких волн, можно предположить, что именно рассеяние излучения мелкими частицами ответственно за это понижение.

Понижение потока излучения и спектрофотометрической температуры в разные сезоны были разными. Это хорошо видно на рис.1, на котором нанесены разными символами теоретические величины для разных температур по данным Курутца [28]. Сравнивая с ними наблюденные кривые, можно отметить различия спектрофотометрических температур, полученные в разные сезоны. Если предположить, что уменьшение температуры было связано с рассеянием излучения мелкими частицами, то вариации температуры определялись вариациями плотности частиц в тех областях околозвездного диска, которые пронизывал свет от звезды в различные сезоны. Пыль, участвуя в кеплеровском вращении, очевидно, перемещалась относительно луча зрения, играя, в зависимости от плотности, бóльшую, или меньшую роль в рассеянии звездного излучения.

Следует обратить особое внимание на 9-й сезон (рис.1). В нем поток излучения от звезды был наибольшим, спектрофотометрическая температура была также наибольшей и практически равна эффективной температуре. Кажется, что свет от звезды в этот период наблюдений не испытывал рассеяния на мелких частицах, пересекая области диска с наименьшей плотностью. Это может указывать на крупномасштабную неоднородность диска.

Таким образом, различие спектрофотометрических температур в коротко-

волновой области спектра могло быть связано с различием плотности мелких частиц, ≤ 0.1 мкм, в различных областях околозвездного диска.

3.3. *Поглощение атомами газа.* Рассматривая рис.1, можно видеть, что поток излучения довольно сильно занижен по сравнению с теоретическими потоками в нескольких крайних точках в ультрафиолетовом конце спектра, $\lambda < 300$ нм. Если учесть, что реальный континуум включает в себя слабые линии поглощения, можно предположить, что сильное понижение континуума в этих точках связано со сгущением в спектре слабых линий поглощения ионизованных атомов, которых особенно много в области $\lambda\lambda = 320 + 335$ нм [30]. Однако слабые линии в газовом диске Фомальгаута изучены мало из-за неудобной ориентации диска для исследования поглощения. Поэтому ограничимся лишь предположением, имея в виду, что при высокой температуре звезды (8751 K) фотоионизация в диске может быть достаточно высокой, и поглощение в линиях ионизованных атомов может заметно сказаться на реальном континууме.

Наличие вариаций результатов наблюдений в области сгущения линий может указывать на то, что газ в диске так же, как пыль, перемещается, вращаясь вокруг звезды, и свет от звезды пересекает в разные годы слои газа разной плотности.

По-видимому, в результате действия нескольких причин: пульсации фотосферы, рассеяния света мелкими пылевыми частицами и поглощения его газом, - наблюдались большие вариации излучения звезды в крайних точках ультрафиолетовой области спектра. То же, очевидно, можно отнести и к другим длинам волн, в которых суммировались разные факторы.

Рассмотрим далее длинноволновую область спектра.

3.4. *Рассеяние крупными частицами.* Как следует из рис.2b и табл.4, в сторону длинных волн, $\lambda > 650$ нм, наблюдалось изменение наблюденных величин в пределах $\pm 0^m.025$, причем зависимости от длины волны практически не было. Отсутствие зависимости от длины волны можно объяснить рассеянием излучения на крупных частицах, ≥ 1 мкм, для которых такая зависимость отсутствует [29]. Степени экранирования и отражения излучения звезды крупными пылинками, скорее всего, различны. Приведенные же в табл.4 и на рис.2b одинаковые значения $\pm S_{M,\lambda}$ как в сторону увеличения излучения звезды, так и в сторону его уменьшения, являются результатом вычислений (квадратный корень из дисперсии (7)), в процессе которых все отклонения от среднего значения усреднялись.

Различное воздействие частиц в этой области спектра в разных сезонах, по-видимому, также связано с неравномерностью распределения пыли по диску и ее вращением вокруг звезды.

4. *Дискуссия.* Учитывая результаты, полученные по данным фото-

метрических наблюдений, можно предположить, что период изменений в полосе *Vt*, $p = 20.6$ d, связан с вращением вокруг звезды неизвестной планеты. Если использовать данные уже существующей планеты (см. раздел 1), то неизвестная планета, вращаясь вокруг звезды с периодом 20.6 d, должна находиться (по закону Кеплера) на расстоянии 0.184 а.е. Скорость движения планеты по орбите должна составлять 97 км/с.

Однако при наклонной ориентации околозвездного диска к лучу зрения, кажется маловероятным прохождение планеты по диску звезды (затмение), хотя, благодаря близости планеты к звезде, вероятность такого прохождения не бесконечно мала.

Возможно, по-видимому, и другое объяснение: существование в околозвездном диске плотного облака пыли, участвующего в кеплеровском вращении.

5. *Заключение*. Таким образом, исследование результатов спектрофотометрических наблюдений Фомальгаута показало, что в коротковолновой области спектра ($\lambda < 650$ нм) его спектрофотометрическая температура (<8500 K) ниже эффективной температуры (8751 K). Это связано, как предполагается, с рассеянием излучения мелкими (< 0.1 мкм) пылевыми частицами в околозвездном диске.

На основе однофакторного дисперсионного анализа тех же результатов были получены реальные изменения квазимонохроматических величин в разных интервалах спектра на ~$0^m.02$.

Полученная микропеременность имела три основных составляющих.

Первая, проявившаяся в диапазоне спектра короче 650 нм, могла быть связана с пульсациями фотосферы, которые определялись изменением температуры звезды на ~40 K и радиуса на ~0.5%.

Вторая, более слабая, в этом же спектральном диапазоне обязана, предположительно, вариациям плотности мелких (< 0.1 мкм) рассеивающих частиц пылевого диска. По длительности сезонов наблюдений с одинаковыми параметрами рассеяния был сделан вывод о крупномасштабной неоднородности диска.

Третья, в длинноволновом участке спектра, > 650 нм, могла определяться вариациями плотности крупных (≥ 1 мкм) пылевых частиц, ответственных за экранирование и отражение звездного излучения.

На наличие излучения, отраженного от окружающего диска, указывалось и в [2]. В ней отмечалась также переменность излучения в длине волны 0.6 мкм.

Опираясь на сделанные предположения, и исходя из различия влияния диска на наблюдаемые параметры звезды в различные сезоны, был сделан вывод о крупномасштабной неоднородности диска.

Кроме обнаружения переменности по результатам спектрофотометрических наблюдений, Фурье-анализ результатов фотометрических наблю-

дений выявил периодические изменения в полосе *Vt*. Величина *Vt* менялась с периодом $p = (20.6 \pm 0.6)$ d и амплитудой $0^m.017$.

Такой результат можно интерпретировать, с одной стороны, как существование неизвестной планеты, находящейся (по закону Кеплера) на расстоянии ~0.2 а.е. от звезды и обращающейся вокруг нее за 20.6 суток. Скорость планеты должна составлять ~100 км/с. Существование планеты требует подтверждения. С другой стороны, возможно существование в околозвездном диске плотного облака пыли, вращающегося вокруг звезды и периодически затмевающего ее.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Россия, e-mail: rubane@mail.ru e-mail: arkadi@arharov.ru

YOUNG STARS IN GAS-DUST DISKS. I. FOMALHAUT

E.V.RUBAN, A.A.ARKHAROV

We carried out the single-factor analysis of variance for the average quasimonochromatic stellar magnitudes of Fomalhaut (α PsA) obtained in the wavelength interval 325-1080 nm for different times of observations and collected in the Pulkovo Spectrophotometric Catalog. The total dispersion of the combined results for several time intervals was decomposed into components that specify separately the random factor and the factor of variability. It was shown that the influence of the factor of variability on the dispersion of average magnitudes is significant with the confidence probability exceeding 95%. The estimated amplitude of the variability is $0^m.02$-$0^m.03$. We suggest that the variability was basically caused by photospheric pulsations (the variations in the temperature and radii of ~40 K and ~0.5% respectively) and by variations in the radiation scattering on the dust of the circumstellar disk as a result of large-scale inhomogeneity of the latter. Using the data from the HIPPARCOS catalog, we found that the star's brightness varies in *Vt* band with the amplitude $\sim 0^m.017$ and the period 20.6 d. It was suggested that the circumstellar disk displays a region of increased concentration of particles, which periodically eclipses the star in the course of Kepler's rotation. Occultations of Fomalhaut with a planet at the distance ~0.2 AU from the star may provide another explanation for the phenomenon, which should be confirmed with the use of other techniques.

Key words: *spectrophotometry:photometry:microvariation - individual:α PsA*

ЛИТЕРАТУРА

1. *D.Hoffleit, C.Jascek*, The Bright Star Cataloge, New-Haven, p.472, 1982.
2. *Paul Kalas, J.R.Graham, Eugene Chiang et al.*, Science, **322**, 1345, 2008.
3. *A.-M.Lagrange, M.Bonnefoy, G.Clauvin et al.*, Science, **329**, 57, 2010.
4. *H.H.Aumann, C.A.Beichman, F.C.Gillett et al.*, Astrophys. J., **278**, L23-L27, 1984.
5. *E.Di.Folco, F.Thevenin, P.Kervella et al.*, Astron. Astrophys., **426**, 601, 2004.
6. *J.Yoon, D.M.Peterson, R.L.Kurucz, R.J.Zagarello*, Astrophys. J., **708**, 71, 2010.
7. *А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, В.Д.Галкин и др.*, Каталог спектральных, фотометрических, пространственных и физических характеристик 693 ярких звезд, деп. в ВИНИТИ, №2327 - В97, с.171, 1997.
8. *G.Bryden, C.A.Beichman, J.M.Carpenter et al.*, Astrophys. J., **705**, 1226, 2009.
9. *Dent et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **314**, 702, 2000.
10. *H.Graham, A.F.Gulliver, S.J.Adelman*, Astrophys. J., **712**, 250, 2010.
11. *L.M.Hobbs, C.E.Albert, Cécile Gry*, Astrophys. J., **293**, L29-L33, 1985.
12. *P.Kalas, J.R.Graham, E.Chiang et al.*, Science, **322**, 1345, 2008.
13. *P.Kalas, M.P.Fitzgerald, M.Clampin et al.*, Bul. AAS, **41**, 491, 2009.
14. *E.Chiang, E.Kite, P.Kalas, J.R.Graham, M.Clampin*, Astrophys. J., **693**, 734, 2009.
15. http://www.allplanets.ru/.
16. The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200, ESA, 1997.
17. *G.A.Alekseeva, A.A.Arkharov, V.D.Galkin et al.*, Baltic Astronomy, **5**, 603, 1996.
18. *G.A.Alekseeva, A.A.Arkharov, V.D.Galkin et al.*, Baltic Astronomy, **6**, 481, 1997.
19. *А.А.Архаров, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан*, Изв. ГАО, **212**, 277, 1998.
20. *А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Е.В.Рубан*, Изв. ГАО, **215**, 5, 2000.
21. *А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан*, Изв. ГАО, **216**, 483, 2002.
22. *А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Е.В.Рубан*, Изв. ГАО, **217**, 38, 2004.
23. А.А.Архаров, Т. Ю. Пузакова, Е. В. Рубан, Изв.ГАО, **212**, 247, 1998.
24. *Е.В.Рубан, Г.А.Алексеева, А.А.Архаров и др.*, Письма в Астрон. ж., **32**, 672, 2006.
25. *Е.И.Пустыльник*, Статистические методы анализа и обработки наблюдений, Москва, Наука, с.288, 1968.
26. *V.Großmann, G.Bässgen, D.W.Evans et al.*, Astron. Astrophys., **304**, 110, 1995.
27. *Е.В.Рубан, А.А.Архаров*, Астрофизика, **53**, 575, 2010.
28. *R.L.Kurucz*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **40**, 1, 1979.
29. *Г. Ван де Хюлст*, Рассеяние света малыми частицами, ИЛ, 1961.
30. *К.У.Аллен*, Астрофизические величины, МИР, М., с.446, 1977.