УДК 524.3-14

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗДЫ АЕ ХЕРБИГА АВ AUR В БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

© 2019 г. В. И. Шенаврин¹, В. П. Гринин^{2,3*}, Р. В. Балуев^{2,3}, Т. В. Демидова⁴

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия ²Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет,

Астрономический институт им. В.В. Соболева, Санкт-Петербург, Россия

⁴Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 11.04.2019 г.; после доработки 16.07.2019 г.; принята к публикации 22.07.2019 г.

Приведены результаты многолетних инфракрасных наблюдений звезды типа AeBe Хербига AB Aur в интервале длин волн 1-5 мкм (полосы JHKLM). Продолжительность фотометрического ряда вместе с уже опубликованными нами ранее наблюдениями составила около 18 лет. Наблюдения показали, что в отличие от оптической области спектра эта звезда весьма активна в исследуемом интервале инфракрасного спектра. При этом амплитуда переменности растет с длиной волны и достигает значений $\Delta M = 0.72^m$. Моделирование показало, что при увеличении яркости звезды увеличивается как мошность ИК излучения внутренней области диска, так и его температура. Проведенный периодограммный анализ показал, что в изменениях инфракрасных потоков AB Aur присутствуют значимые признаки периодических колебаний, однако уверенности в их стабильности нет. Скорее всего это временно живущие квазиколебания, связанные с нестационарными процессами во внутреннем диске. При этом мы получили оценку временно́го параметра корреляции $au=130\pm$ $\pm 40^d$, которую можно принять за примерную характеристику продолжительности таких процессов. Результаты анализа не дают твердых оснований полагать, что во внутреннем диске существуют какие-либо массивные объекты на постоянной орбите, например протопланеты. Наличие тренда в изменениях инфракрасных потоков, особенно хорошо заметного в полосах KLM, свидетельствует о существовании крупномасштабных возмущений в диске. В заключение кратко обсуждаются условия, при которых возможен циклический характер аккреции газа из околозвездного диска на молодую звезду.

DOI: 10.1134/S0004629919120089

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда AB Aur ($T_{\rm eff} = 9500$ K, $L = 41 L_{\odot}$ [1]) является одной из ближайших к нам молодых звезд типа AeBe Хербига: по данным GAIA [2] расстояние до нее равно 163 пк. Звезда окружена протопланетным диском, наблюдаемым почти с полюса ($i = 23^{\circ}$) и имеющим обширную полость радиусом около 70 а.е. [3, 4]. Полость вызвана возмущениями в диске, предположительно в результате орбитального движения одного или двух невидимых компаньонов [4]. Другим проявлением периодических возмущений являются спиральные структуры на изображениях диска, наблюдаемых как в континууме [5, 6], так и в линиях молекулы CO [4].

В оптической области спектра AB Aur малоактивна [7, 8], что неудивительно при такой ориентации диска. Нужно отметить, однако, что по данным фотографических наблюдений, проводившихся в первой половине прошлого века (см. статью Гапошкина [9] и цитированные там работы) у этой звезды наблюдались алголеподобные ослабления блеска с амплитудой до 1^{*m*}. По данным любительской астрономии (см. статью Кавабата и др. [10] и ссылки в ней) в декабре 1997 г. оптический блеск звезды уменьшился примерно на 1^{*m*}. Такие редкие события свидетельствуют о том, что околозвездные пылевые облака, способные ослабить блеск звезды, могут появляться время от времени высоко над плоскостью околозвездного диска. Причиной их появления могут быть нестационарные процессы в диске (например, столкновения планетозималей или эмбрионов планет), приводящие к выбросу

^{*}E-mail: vgcrao@mail.ru

вещества над плоскостью диска, либо диссипация комет, пролетающих вблизи звезды.

В ближней ИК области спектра звезда, напротив, весьма активна. По данным наших предыдущих наблюдений, выполнявшихся с 2001 по 2008 г., амплитуда переменности AB Aur в полосе M составила около 0.64^m [11]. При этом, как показал анализ, наблюдаемая переменность была вызвана сильными флуктуациями излучения, образующегося во внутреннем диске звезды, внутри зоны сублимации силикатной пыли. Источником этого излучения является не только горячая тугоплавкая пыль, но и газовая компонента диска.

Необычное состояние блеска AB Aur в ближней ИК области спектра наблюдали в 1999 г. Ашок и др. [12]. Согласно их данным блеск звезды в полосе K уменьшился до 6.0 ± 0.15^m . Оптический блеск звезды при этом не изменился. Спустя примерно 3 мес. после этого наблюдения ван ден Анкер и др. [13] повторно измерили блеск AB Aur в ИК диапазоне и нашли, что он соответствовал обычному состоянию звезды: $J = 6.25 \pm 0.06$, $H = 5.36 \pm 0.05$, $K = 4.51 \pm 0.05$.

Поскольку в оптической области спектра AB Aur фотометрически малоактивна, то причиной наблюдаемой ИК переменности звезды являются нестационарные процессы во внутренних областях ее околозвездного диска радиусом порядка 1 а.е. Представляет большой интерес дальнейшее изучение характера ИК активности этой звезды, включая поиск возможных периодов. С этой целью наши наблюдения AB Aur были продолжены. Данная статья посвящена анализу всего ряда ИК наблюдений этой звезды, полученных с 2001 по 2019 г.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Инфракрасная фотометрия AB Aur выполнялась с 2007 по 2018 г. с помощью одноканального фотометра, установленного на телескопе 1.25 м Крымской лаборатории ГАИШ. В качестве приемника излучения использовался фотодиод InSb, охлаждаемый жидким азотом. Наблюдения проводились в полосах JHKLM ($\lambda_{\text{eff}} = 1.25$, 1.6, 2.25, 3.4 и 4.8 мкм соответственно) стандартной фотометрической системы. Методика наблюдений подробно описана в статье [11]. Точность фотометрии AB Aur составляет в среднем около 0.01^m в полосах JHKL и около 0.02^m в полосе M.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты инфракрасных фотометрических наблюдений AB Aur приведены в табл. 1 и на рис. 1–3.

3.1. Фотометрическая активность AB Aur

На рис. 1 показаны кривые блеска AB Aur в полосах JHKLM, построенные по данным табл. 1 и данным, опубликованным в нашей предыдущей статье [11]. Видно, что поток излучения от звезды флуктуирует с амплитудой. увеличивающейся с длиной волны λ . Такая зависимость амплитуды флуктуаций от λ отражает тот факт, что в коротковолновой области ИК спектра доминирует излучение звезды, тогда как переменная составляющая излучения околозвездного диска дает лишь небольшой вклад в суммарное излучение. С увеличением λ вклад излучения диска увеличивается, что и отражается на росте амплитуды флуктуаций излучения при переходе от полосы Ј к полосе М. Сравнение кривых блеска в разных полосах показывает, что изменения ИК потоков происходят с высокой степенью синхронности. Согласно [10] коэффициент корреляции между вариациями потоков в полосах J/H, ..., J/M расположен в интервале 0.88-0.69. Заметим, что за все время наших наблюдений блеск звезды ни разу не опускался до значений, наблюдавшихся Ашоком и др. [12].

Кроме флуктуаций ИК потоков, кривые блеска AB Aur демонстрируют медленный тренд: из рис. 1 видно, что блеск звезды сначала постепенно увеличивается и после достижения максимума начинает уменьшаться. Этот тренд хорошо виден в полосах *KLM*, то есть там, где основной вклад в излучение дает сам диск.

На рис. 2 показаны диаграммы "цвет-величина" АВ Aur в ИК полосах. На диаграммах "К – (J – (-H)" и "K - (H - K)" видны систематические изменения показателей цвета: с уменьшением блеска в полосе K показатели цвета J - H и H - J – К уменьшаются (звезда голубеет). В очень слабом виде аналогичное поведение показателя цвета K-L наблюдается на диаграмме "K-(K-L)". На диаграмме "K - (L - M)" систематические изменения показателя цвета отсутствуют. Такое поведение ИК показателей цвета согласуется с результатами нашей предыдущей статьи [11]. Поскольку в случае AB Aur влияние околозвездной экстинкции на блеск звезды пренебрежимо мало, мы наблюдаем в чистом виде переменность ИК излучения самых внутренних слоев ее околозвездного диска.

Тот факт, что показатель цвета L - M не показывает никаких систематических изменений на всем интервале изменений блеска звезды в полосе K, можно было бы рассматривать как указание на то, что наблюдаемые изменения ИК потоков вызваны изменениями лишь мощности излучения при неизменной температуре. Однако нужно иметь в виду, что при температуре порядка и больше

Таблица 1. Результаты ИК фотометрии АВ Аиг

N	Дата	JD 245 0000+	J	Н	K	L	M
1	21.01.09	4852.3	6.27	5.39	4.41	3.21	2.89
2	05.03.09	4895.2	6.19	5.40	4.45	3.26	2.99
3	06.10.09	5110.6	6.16	5.30	4.33	3.22	2.96
4	08.10.09	5112.5	6.16	5.32	4.35	3.22	2.97
5	08.11.09	5143.4	6.19	5.34	4.36	3.19	2.98
6	01.02.10	5256.3	6.13	5.29	4.27	3.17	2.96
7	24.09.10	5463.6	6.21	5.38	4.43	3.25	2.95
8	24.10.10	5493.5	6.05	5.17	4.23	3.13	2.88
9	31.10.10	5500.5	6.05	5.14	4.21	3.12	2.94
10	02.11.10	5502.4	6.04	5.14	4.18	3.13	2.93
11	07.11.10	5507.5	6.05	5.13	4.19	3.09	2.88
12	07.01.11	5568.3	6.07	5.19	4.26	3.15	2.90
13	09.02.11	5601.2	6.07	5.18	4.25	3.14	2.85
14	05.03.11	5625.3	6.07	5.18	4.23	3.12	2.89
15	25.03.11	5645.2	6.12	5.24	4.32	3.21	_
16	13.09.11	5817.6	6.23	5.42	4.51	3.40	3.20
17	08.10.11	5842.5	6.26	5.44	4.53	3.40	3.14
18	05.11.11	5870.4	6.26	5.46	4.54	3.41	3.13
19	05.01.12	5931.4	6.20	5.43	4.53	3.44	3.16
20	06.02.12	5963.2	6.21	5.42	4.55	3.45	3.21
21	21.03.12	6007.3	6.22	5.40	4.50	3.40	3.12
22	26.03.12	6012.2	6.19	5.39	4.50	3.42	3.18
23	27.09.12	6197.5	6.28	5.58	4.75	3.62	3.25
24	24.10.12	6224.4	6.22	5.44	4.50	3.47	3.18
25	31.12.12	6292.3	6.21	5.42	4.51	3.44	3.17
26	02.01.13	6294.2	6.23	5.43	4.51	3.41	3.12
27	15.01.13	6307.2	6.22	5.42	4.51	3.44	3.27
28	08.02.13	6331.2	6.19	5.37	4.47	3.39	3.16
29	26.02.13	6349.2	6.18	5.33	4.41	3.33	3.10
30	27.02.13	6350.2	6.19	5.36	4.45	3.36	3.15
31	07.03.13	6358.2	6.21	5.36	4.44	3.38	3.12
32	14.03.13	6365.2	6.19	5.38	4.47	3.38	3.19
33	13.10.13	6578.5	6.18	5.38	4.47	3.36	3.11
34	30.10.13	6595.4	6.25	5.45	4.57	3.44	3.17
35	20.11.13	6616.3	6.34	5.58	4.65	3.50	3.16
36	05.12.13	6631.3	6.25	5.49	4.56	3.47	3.27
37	18.12.13	6644.3	6.30	5.52	4.60	3.49	3.30
38	20.12.13	6646.3	6.29	5.53	4.60	3.49	3.22
39	24.12.13	6650.3	6.29	5.52	4.61	3.49	3.26
40	03.02.14	6691.2	6.18	5.38	4.46	3.37	3.17
41	04.03.14	6720.2	6.10	5.25	4.38	3.30	2.97

ШЕНАВРИН и др.

Таблица 1. Окончание

N	Дата	JD 245 0000+	J	Η	K	L	M
42	24.03.14	6740.2	6.13	5.28	4.37	3.33	3.08
43	06.10.14	6936.5	6.24	5.46	4.53	3.41	3.16
44	12.10.14	6942.4	6.28	5.48	4.57	3.46	3.14
45	05.11.14	6966.4	6.35	5.59	4.69	3.55	3.26
46	14.12.14	7005.3	6.23	5.50	4.59	3.46	3.16
47	23.01.15	7045.2	6.17	5.43	4.55	3.49	3.33
48	28.08.15	7262.6	6.14	5.34	4.40	3.29	3.05
49	27.09.15	7292.5	6.07	5.24	4.30	3.18	2.96
50	29.10.15	7324.4	6.01	5.19	4.28	3.22	2.96
51	08.02.16	7426.3	6.22	5.52	4.65	3.55	3.26
52	06.09.16	7637.5	6.28	5.58	4.68	3.63	3.38
53	23.12.16	7745.3	6.29	5.60	4.78	3.71	3.47
54	21.01.17	7774.3	6.32	5.65	4.75	3.67	3.50
55	02.02.17	7786.2	6.30	5.62	4.77	3.72	3.57
56	11.02.17	7795.3	6.32	5.58	4.75	3.67	3.45
57	19.02.17	7803.3	6.26	5.58	4.71	3.66	3.43
58	28.02.17	7812.3	6.32	5.62	4.71	3.68	3.50
59	24.03.17	7836.2	6.32	5.61	4.60	3.62	3.48
60	02.09.17	7998.6	6.25	5.58	4.72	3.68	3.35
61	11.09.17	8007.5	6.26	5.57	4.73	3.68	3.49
62	03.10.17	8029.5	6.26	5.58	4.72	3.64	3.37
63	09.11.17	8066.4	6.28	5.63	4.78	3.69	3.44
64	09.12.17	8096.3	6.37	5.75	4.91	3.77	3.41
65	27.12.17	8114.4	6.28	5.66	4.83	3.70	3.26
66	02.01.18	8120.3	6.32	5.68	4.83	3.72	3.41
67	07.01.18	8125.4	6.29	5.65	4.79	3.73	3.40
68	25.01.18	8143.3	6.28	5.64	4.79	3.77	3.36
69	02.02.18	8151.3	6.25	5.59	4.74	3.69	3.40
70	17.02.18	8166.3	6.22	5.53	4.68	3.64	3.48
71	06.03.18	8183.2	6.19	5.55	4.71	3.63	3.29
72	17.03.18	8194.2	6.26	5.57	4.66	3.52	3.14
73	31.08.18	8362.6	6.09	5.29	4.36	3.26	3.06
74	21.09.18	8382.6	6.13	5.32	4.41	3.32	3.06
75	06.10.18	8397.5	6.16	5.40	4.47	3.40	3.21
76	18.10.18	8409.5	6.15	5.40	4.50	3.41	3.12
77	23.11.18	8446.4	6.17	5.47	4.54	3.47	3.12
78	25.01.19	8509.3	6.16	5.42	4.52	3.48	3.27
79	04.02.19	8519.3	6.12	5.35	4.49	3.50	3.32
80	17.02.19	8532.2	6.12	5.37	4.49	3.47	3.30
81	24.02.19	8539.3	6.16	5.38	4.48	3.45	3.32
	$\langle m \rangle$		6.20	5.39	4.47	3.36	3.13
	Δm		0.36	0.62	0.73	0.68	0.72

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019



Рис. 1. Кривые блеска АВ Анг в полосах *JHKLM*.



Рис. 2. Диаграммы "цвет-величина" АВ Анг в полосах ЈНКLМ.

1500 К полосы L и M расположены в Рэлей-Джинсовской области спектра и поэтому малочувствительны к небольшим вариациям температуры. Чтобы проверить это, мы построили двухцветную диаграмму "(J-K) - (K-L)" и рассчитали для нее две простые модели.

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019



Рис. 3. Наблюдаемые показатели цвета AB Aur и теоретические треки на диаграмме (J - K) - (K - L). Сплошные линии — модель A, пунктирные — модель \mathcal{B} (см. текст).

Предполагая ИК излучение фотосферы звезды планковским с температурой 10^4 К, мы добавили к нему переменное планковское излучение внутренней области диска с температурой T_d . В модели A величина T_d была фиксирована, менялась мощность излучения. Был рассмотрен ряд значений T_d в интервале 1500–3000 К. В модели B, напротив, была зафиксирована мощность излучения диска и менялась его температура в принятом выше интервале. В качестве параметра, определяющего вклад излучения диска в суммарное излучение системы "звезда + диск", было выбрано отношение потоков F_d/F_* в полосе K.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Из них видно, что увеличение инфракрасного блеска звезды происходит как за счет увеличения мощности излучения внутренней области диска, так и в результате небольшого увеличения температуры вещества от ~1700 до 2500 К. При этом весь наблюдаемый интервал изменений показателя цвета J - K перекрывается путем увеличения потока излучения диска F_d в полосе K примерно в 3 раза.

В указанном выше температурном интервале значительный вклад в ИК избыток излучения дает газовая компонента диска внутри зоны сублимации пыли. Этот вывод согласуется с результатами интерферометрических наблюдений AB Aur Танниркулама и др. [14]. Они показали, что примерно 65% излучения AB Aur в полосе K дает самая внутренняя область диска с температурой ~1900 К и радиусом около 0.24 а.е.

3.2. Частотный анализ при помощи периодограмм

3.2.1. Анализ в классической модели с белым шумом. Мы провели детальный частотный анализ наших данных на основе периодограмм, подробности которого приведены ниже. Для практических вычислений мы применяли средства обработки временных рядов из программного комплекса PLANETPACK, разработанного Балуевым [15].

На первом этапе мы применили периодограмму z_3 из работы [16], которая по своему смыслу близка к нормированной периодограмме Ломба— Скаргла [17, 18], но может включать и более сложные модели кривой блеска.

Для этого мы, во-первых, задали базовую (или т.н. нулевую, null) гипотезу, которая моделирует данные полиномиальным трендом, возможно с годичной периодичностью:

$$\mu_{\mathcal{H}}(t) = \sum_{k=0}^{4} c_k t^k + A_s \cos\left(\frac{2\pi}{1 \text{ year}}(t-t_s)\right). \quad (1)$$

Четвертая степень многочлена в (1) выбиралась эмпирически, исходя из того, что коэффициент с5 — первый, который по результатам статистического анализа определялся ненадежно (с погрешностью порядка самого значения). Косинусоидальный член был введен в (1) для проверки наличия возможной систематической ошибки, вызванной сезонными эффектами на телескопе. Результаты анализа, как оказалось, практически не зависят от того, включаем мы его в модель или нет, из чего можно сделать вывод, что заметная сезонная ошибка отсутствует. Тем не менее мы приводим результаты с учетом годичной компоненты в модели (1). Коэффициенты c_i и параметры A_s , t_s в (1) являются свободными параметрами, подлежащими оценке по временному ряду.

Далее, на основе (1) мы сформировали альтернативную гипотезу, включающую в себя пробную синусоиду (сигнал) произвольной частоты, f = 1/P:

$$\mu_{\mathcal{K}}(t) = \mu_{\mathcal{H}}(t) + A\cos(2\pi f t + \varphi). \tag{2}$$



Рис. 4. ЛМНК-периодограммы фотометрических рядов АВ Аиг для разных спектральных фильтров и вид спектрального окна.

Обе введенных модели можно считать линейными по отношению ко всем параметрам, кроме пробной частоты f. Заметим, что синусоидальные члены в (1), (2) содержат, казалось бы, другие нелинейные параметры в виде амплитуды и фазы колебания, но их легко преобразовать в эквивалентную линейную форму:

 $A\cos(2\pi ft + \varphi) = a\cos(2\pi ft) + b\sin(2\pi ft), \quad (3)$

где новые параметры $a = A \cos \varphi$ и $b = -A \sin \varphi$ уже линейны.

Поскольку все параметры моделей, кроме пробной частоты, оказываются линейными, мы можем применить теорию обобщенных линейных периодограмм, основанных на методе наименьших квадратов, или ЛМНК-периодограмм [16, 19]. Мы использовали периодограмму $z_3(f)$ из статьи [16], которая представляет собой статистику отношения правдоподобия для моделей $\mu_{\mathcal{H}}$ и $\mu_{\mathcal{K}}^{-1}$.

Мы построили периодограмму $z_3(f)$ раздельно для всех пяти спектральных полос *JHKLM*

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019

(см. рис. 4), а также соответствующее этим наблюдениям спектральное окно W(f). Для каждой периодограммы приведены два горизонтальных уровня, соответствующие статистической значимости сигнала 2σ и 3σ (вероятность ложной тревоги FAP = 0.046 и FAP = 0.0027 соответственно). На всех периодограммах присутствует максимальный пик на периоде ~1000^{*d*}, причем в трех полосах его статистическая значимость превысила уровень 3σ .

С целью уменьшить влияние инструментальных и астрофизических шумов и иных случайных колебаний, мы также построили аналогичную периодограмму для средней величины (J + H + K + L + M)/5 (рис. 5, верхний график). Наблюдается пик на такой же частоте около 1000^d , который также обладает значимостью выше 3σ .

Предположив 1000-суточное колебание реально существующим, мы задались вопросом, не присутствуют ли в данных и другие периодичности. Те периодограммы, которые мы проверили на данный момент, не могут дать на этот вопрос однозначного ответа, потому что в них доминирует вклад 1000-суточного периода, который нам теперь нужно вычесть. Для этого мы модифицировали базовую модель (1), добавив к ней дополнительный синусондальный член. При этом частота этого нового члена задавалась близкой к f = 1/P = 0.001 сут⁻¹,

¹На данном этапе максимизация функции правдоподобия эквивалентна методу наименьших квадратов, однако мы используем более общую терминологию метода максимума правдоподобия ввиду того, что ниже последуют и более сложные модели.

ШЕНАВРИН и др.



period analysis of AB Aur: analysing average data (J + H + K + L + M)/5quartic trend + annual variation in the null model

Рис. 5. Периодограммы для суммированного фотометрического ряда AB Aur.

то есть при любом фиттинге модели это численное значение бралось за начальное приближение. Вследствие чего, конечное значение частоты не смогло бы уйти от заданного начального дальше, чем на характерную ширину периодограммного пика (частотное разрешение, $\sim 1/T$, где T — длина временно́го ряда).

Строго говоря, периодограмма, основанная на модели с дополнительной синусоидой, уже не относится к ЛМНК-периодограммам, поскольку частота синусоиды — параметр нелинейный. Тем не менее, благодаря тому, что примерное значение периода 1000-суточного сигнала уже известно — мы в ходе анализа его просто уточняем — то данный параметр можно считать квазилинейным. То есть, такая базовая модель оказывается приближенно линеаризуемой, и всю теорию ЛМНК-периодограмм из статьи [16] можно распространить на нее в приближенном смысле [20, 21].

Центральный график на рис. 5 представляет собой такую периодограмму с исключенным 1000-суточным колебанием. На периоде $P \sim 2000^d$ выделяется еще один пик, который, однако, не достигает уровня значимости в 2σ .

Таким образом, после удаления полиномиального тренда и 1000-суточной периодической компоненты, на периодограмме не остается статистически значимых пиков. То есть, эта формальная модель дает исчерпывающее (на данный момент) описание возможных систематических колебаний в нашей фотометрии. Ее график представлен на рис. 6, а само периодическое колебание, сведенное к соответствующему периоду, — на рис. 7.

Тем не менее наблюдаемую фотометрическую переменность можно интерпретировать и с иных позиций. Существуют модели недетерминированного характера, т.е. модели в виде автокоррелированных случайных процессов, которые подчас в состоянии мимикрировать под гармонические колебания, особенно если эти колебания имеют большие периоды. В астрономии хорошо известны примеры, когда присутствие в наблюдательных данных красного, т.е. низкочастотного, шума приводило к ложным выводам о наличии периодических компонент [22]. Красный шум способен генерировать



Рис. 6. Модельная кривая фотометрического ряда AB Aur (полиномиальный тренд и тренд плюс выделенная синусоидальная компонента).



Рис. 7. Периодические компоненты, выделенные из фотометрии AB Aur.

квазипериодические осцилляции, которые на ограниченном интервале могут показаться похожими на синусоидальные сигналы, но со временем параметры этих синусоид могут "поплыть", а сами синусоиды — исчезнуть.

3.2.2. Учет коррелированного шума. Для проверки такой интерпретации мы применили методику анализа, описанную в статье Балуева [21]. Наблюдаемые колебания блеска моделировались гауссовым случайным процессом с корреляционной функцией вида $\exp(-|\Delta t|/\tau)$, где τ — параметр спада, подлежащий определению. Этот параметр, как и все остальные параметры моделей (1) и (2), определялись методом максимального правдоподобия в предположении, что весь наш набор из N фотометрических измерений имеет многомерное нормальное распределение (с корреляционными коэффициентами, определяемыми в соответствии

с указанной выше экспоненциальной моделью). Далее на этой основе для каждой частоты fпробного сигнала из (2) строилась статистика отношения правдоподобия, которая, как и прежде, представляет собой значение периодограммы z(f). Отличие от ЛМНК-периодограмм здесь в том, что вместо модели белого шума (независимые нормально распределенные величины одинаковых дисперсий) мы применяем модель в виде суммы белого и красного шума. При этом параметры обеих шумовых компонент определяются совместно с параметрами детерминированных моделей (1, 2). Все математические подробности и необходимые формулы приведены в статье [22].

Эта периодограмма представлена на нижнем графике рис. 5. Как видно, модель с красным шумом позволяет очистить периодограмму от пиков даже еще полнее, чем наша детерминированная модель. Значение функции правдоподобия также получается немного выше в модели красного шума, хотя статистическую значимость этого различия трудно оценить. Статистический критерий Вонга [23, 24] дает формальную оценку значимости в 3.1σ (FAP ~ 0.2%) в пользу интерпретации с красным шумом, однако этот критерий, вообще говоря, нельзя применять к автокоррелированным моделям.

Из проведенного анализа можно сделать следующий общий вывод: фотометрическая активность AB Aur в ближней ИК области спектра содержит значимые признаки периодических колебаний, однако уверенности в их стабильности нет. Скорее всего, это всего лишь временно живущие квазиколебания, связанные с нестационарными пылевыми структурами диска. При этом мы получили оценку временно́го параметра корреляции $\tau = 130 \pm 40^d$, которую можно принять за примерную характеристику времени жизни данных структур².

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный выше анализ не дает оснований полагать, что во внутреннем диске AB Aur существуют какие-либо массивные объекты на постоянной орбите (например, протопланета), способные вызывать в нем заметные возмущения. Вместе с тем наличие крупномасштабного тренда в изменениях ИК потоков, особенно хорошо заметное в полосах KLM (рис. 1), указывает на существование медленных возмущений в диске на временной шкале, сравнимой с продолжительностью нашего ряда наблюдений (~19 лет).

Как показало моделирование, основная часть переменной составляющей ИК излучения образуется в ближайшей к звезде области околозвездного диска, в которой вещество находится преимущественно в газовой фазе. При этом увеличение ИК потоков сопровождается увеличением температуры газа (рис. 2). В связи с этим интересно отметить, что циклическая активность AB Aur с близким характерным временем (~124^d) обнаружена недавно Погодиным и др. [25] по наблюдениям переменности эмиссионного спектра звезды (линии H_{α} , HeI 5876 Å, D NaI). Анализ показал, что спектральные изменения были вызваны (по крайней мере частично) вариациями температуры газа в эмиссионной области.

Таким образом, две совершенно разные серии многолетних наблюдений AB Aur (фотометрия в ближней ИК области спектра и спектральные наблюдения в визуальной области) дали, вопервых, близкие временные масштабы переменности и, во-вторых, зафиксировали наличие температурных изменений в областях образования ИК континуума и эмиссионного спектра звезлы. Если такое совпадение неслучайно, то должен существовать механизм циклических возмущений во внутренней области околозвездного диска, способный оказывать влияние на две близкие, но все же пространственно разделенные области околозвездной среды. Таким механизмом по нашему мнению мог бы быть нестационарный режим аккреции, при котором часть аккрецирующего вещества при взаимодействии с магнитосферой звезды отбрасывается назад и возвращается обратно в диск. Подобная модель впервые была рассмотрена Илларионовым и Сюняевым [26] при изучении аккреции на нейтронные звезды и получила название "магнитный пропеллер". Недавно Романова и др. [27] предложили подходящее название такой модели аккреции — модель "мягкого" пропеллера. Наблюдательные проявления эффекта магнитного пропеллера в спектрах молодых звезд рассмотрены в статье Гринина и др. [28].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН КП19-270 12 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований". Один из авторов статьи (Р.В.Б.) выражает благодарность РФФИ за финансовую поддержку работы (грант РФФИ 17-02-00542А).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. M. Vioque, R. D. Oudmaijer, D. Baines, I. Mendigutia, and R. Perez-Martinez, Astron. and Astrophys. **620**, id. A128 (2018).
- A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. 616, id. A1 (2018).
- 3. V. Pietu, S. Guilloteau, and A. Dutrey, Astron. and Astrophys. **443**, 945 (2005).
- 4. Y.-W. Tang, S. Guilloteau, A. Dutrey, T. Muto, et al., Astrophys. J. **840**, id. 32 (2017).
- C. A. Grady, B. Woodgate, F. C. Bruhweiler, A. Boggess, P. Plait, D. J. Lindler, M. Clampin, and P. Kalas, Astrophys. J. 523, L151 (1999).

²Заметим, что найденные выше периоды 1000^d или 2000^d нельзя принимать за оценку этого характерного времени жизни. Красный шум может давать квазиколебания во всей низкочастотной зоне, то есть на *любых* периодах, больших τ . При этом конкретное квазиколебание может и не быть связано с какой-либо конкретной физической структурой, а быть результатом случайного наложения.

- 6. M. Fukagawa, M. Hayashi, M. Tamura, Y. Itoh, et al., Astrophys. J. **605**, L53 (2004).
- 7. А. Ф. Шаймиева, Н. А. Шутемова, Переменные звезды, **22**, 167 (1985).
- V. S. Shevchenko, K. N. Grankin, M. A. Ibragimov, S. Yu. Mel'Nikov, and S. D. Yakubov, Astrophys. Space Sci. 202, 121 (1993).
- 9. S. Gaposchkin, Ann. Harvard College Observ. 118, 119 (1952).
- 10. T. Kawabata, T. Kogure, M. Fuji, K. Ayani, and M. Suzuki, Inform. Bull. Var. Stars № 4651, 1 (1998).
- В. И. Шенаврин, В. П. Гринин, Н. А. Ростопчина-Шаховская, Т. В. Демидова, Д. Н. Шаховской, Астрон. журн. 89, 424 (2012).
- 12. N. M. Ashok, T. Chandrasekhar, H. C. Bhatt, and P. Manoj, IAU Circ. № 7103 (1999).
- 13. M. E. van den Ancker, A. W. Volp, M. R. Perez, and D. de Winter, Inform. Bull. Var. Stars № 4704 (1999).
- 14. A. Tannirkulam, J. D. Monnier, T. J. Harries, R. Millan-Gabet, et al. Astrophys. J. **689**, 513 (2009).
- 15. R. V. Baluev, Astron. and Comput. 25, 221 (2018).
- R. V. Baluev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 385, 1279 (2008).
- 17. N. R. Lomb, Astrophys. Space Sci. 39, 447 (1976).

- 18. J. D. Scargle, Astrophys. J. 263, 835 (1982).
- 19. R. V. Baluev, Astophysics 57, 434 (2014).
- 20. R. V. Baluev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **393**, 969 (2009).
- 21. R. V. Baluev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 446, 1478 (2015).
- 22. R. V. Baluev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **429**, 2052 (2013).
- 23. Q. H. Vuong, Econometrica 57, 307 (1989).
- 24. R. V. Baluev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **422**, 2372 (2012).
- M. A. Pogodin, O. V. Kozlova, N. G. Beskrovnaya, N. R. Ikhsanov, N. Z. Ismailov, O. V. Khalilov, and R. V. Yudin, Astrophysics 55, 480 (2012).
- 26. A. F. Illarionov and R. A. Sunyaev, Astron. and Astrophys. **39**, 185 (1975).
- M. M. Romanova, A. A. Blinova, G. V Ustyugova, A. V. Koldoba, R. V. E. Lovelace, New Astronomy 62, 94 (2018).
- В. П. Гринин, И. С. Потравнов, И. В. Ильин, С. Г. Шульман, Письма в Астрон. журн. 41, 444 (2015).