

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ У ЗВЕЗД ТИПА Т ТЕЛЬЦА С ОСТАТОЧНЫМ ДИСКОМ

© 2022 г. Н. З. Исмаилов^{1, *}, У. С. Валиев²

¹ Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси Национальной академии наук Азербайджана, Шамахи, Азербайджан

² Батабатская астрофизическая обсерватория Нахичеванского отделения Национальной академии наук Азербайджана, Нахичеван, Азербайджан

*E-mail: ismailovnshao@gmail.com

Поступила в редакцию 25.05.2022 г.

После доработки 12.06.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Приводятся результаты анализа кривых распределения энергии в спектре (РЭС) в диапазоне 0.36–100 мкм у 45 молодых звезд типа WTTS и 9 звезд сравнения типа CTTS. Наблюдается два типа кривых РЭС по классификации спектров молодых звезд. Звезды со спектрами III типа показывают избыточное излучение только в дальнем ИК диапазоне, на $\lambda \geq 12$ мкм. Звезды со спектрами II типа, помимо излучения в дальнем ИК диапазоне, показывают избыточное излучение также в ближнем ИК диапазоне, на $2 \text{ мкм} < \lambda < 12 \text{ мкм}$. Выделен новый подтип звезд III_d из группы звезд со спектрами III типа. Эти звезды имеют в спектре слабый ИК избыток в диапазоне $\lambda \geq 60$ мкм, признаки остаточных дисков и часто показывают хромосферную активность. Показано, что 15 из 45 WTTS имеют УФ избытки, и столько же звезд имеют избытки в ближнем ИК диапазоне. Две из таких звезд по спектру относятся ко II типу и показывают признаки дисковой аккреции. Определены физические параметры и параметры избыточного излучения, оценены массы и возрасты программных звезд.

Ключевые слова: звезды, околозвездное вещество, звезды до Главной последовательности, инфракрасное излучение, переменные типа Т Тельца

DOI: 10.31857/S0004629922100061

1. ВВЕДЕНИЕ

Понимание эволюции и рассеяния околозвездных дисков является ключом к теории формирования планет. В начале своей эволюции большинство оптически видимых звезд до Главной последовательности (ДГП) окружены околозвездными дисками, которые аккрецируют материал на звездную поверхность в виде аккреционных потоков [1]. Молодые звезды с массами $0.5\text{--}2 M_{\odot}$ классифицируются по спектру, на основе их сильной эмиссионной линии H_{α} , как классические звезды типа Т Тельца (CTTS). Более массивные аналоги CTTS, масса которых находится в пределах от 2 до $10 M_{\odot}$, называются звездами Ae/Be Хербига. Звезды ДГП без свидетельств продолжающейся магнитосферной аккреции известны как звезды Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями (WTTS) (см., например, [2, 3]).

Исторически границей между группами CTTS и WTTS было выбрано значение эквивалентной ширины (EW) эмиссионной линии $H_{\alpha} = 10 \text{ \AA}$. Однако, поскольку большинство WTTS показывают

эмиссию H_{α} также и из-за хромосферной активности, установить точную наблюдательную границу между WTTS и CTTS проблематично. Позднее было показано, что ширина линии H_{α} , измеренная на уровне 10% интенсивности пика (далее, $H_{\alpha}10\%$), и профиль H_{α} , измеренные на спектрах с высоким разрешением, являются более чувствительной диагностикой аккреции, чем EW линии H_{α} , полученные из спектральных данных с низким разрешением [4]. Неаккрецирующие объекты имеют узкие ($\Delta V \lesssim 230\text{--}270 \text{ км/с}$) и симметричные профили линий хромосферного происхождения, в то время как аккрецирующие объекты имеют широкие ($\Delta V \gtrsim 230\text{--}270 \text{ км/с}$) и асимметричные профили [5, 6].

Не так давно в ряде работ (см., например, [7, 8]) показано, что подавляющее большинство ($\gtrsim 80\%$) WTTS в ближайших молекулярных облаках потеряли свои диски и что несколько WTTS, которые все еще сохраняют околозвездный материал, демонстрируют широкий спектр свойств, например, различную форму кривых РЭС. CTTS имеют первичные богатые газом диски и обычно

демонстрируют оптически толстое избыточное излучение, которое простирается от ближнего до дальнего ИК-диапазона. Остатки дисков бедны газом и характеризуются оптически тонким избыточным ИК-излучением, которое в основном обнаруживается в дальнем ИК-диапазоне. Свойства распавшихся дисков (debris disks) WTTS перекрываются со свойствами дисков CTTS и могут представлять этапы эволюции околозвездных дисков между этими типами звезд. Таким образом, WTTS являются идеальными лабораториями для изучения эволюции дисков и, в частности, их диссипации.

Недавние оценки массы пыли в дисках звезд в различных областях звездообразования Галактики с возрастными звездами 1–5 млн. лет показывают, что в целом масса пыли в дисках с возрастом уменьшается [9–11]. Типичное время диссипации протопланетных дисков составляет около 3 млн. лет (см., например, [12, 13]), а самые старые диски имеют возрасты 10 млн. лет.

По современным представлениям рассеивание диска обычно зависит от аккреции материала через диск на центральную звезду [14], рассеивания материала ветром (например, [15]) и внутренних процессов, ведущих к росту сгустков вещества и формированию планет (например, [16, 17]). Кроме того, на эволюцию дисков могут влиять и внешние процессы, такие как внешнее фотоиспарение и динамические взаимодействия (например, [18]). Поскольку диски WTTS уже претерпели значительную эволюцию, накопление информации об их свойствах позволит выяснить, какой из этих факторов является доминирующим при разных возрастах.

В работе [19] были изучены кривые РЭС у 12 WTTS, большинство которых показало избыточное дисковое излучение в ИК части спектра. В [20] показано, что из избранных 31 WTTS, по имеющимся ИК избыткам, 2 звезды не отличаются от CTTS, 7 из этих звезд имеют признаки дисковой аккреции. Звезды, исследованные этими авторами, показывают различные стадии эволюции протопланетных дисков. В работе [21] из 33 звезд, исследованных в Тельце, только переходные и распавшиеся диски не показывают признаков аккреции, а среди аккреторов не обнаружены звезды с переменным темпом аккреции.

Околозвездные диски молодых звезд излучают в основном в ближней и дальней ИК области спектра за счет переизлучения энергии излучения фотосферы звезды, поглощенного в околозвездном диске [22], а также частично за счет энергии, которая образуется при дисковой аккреции [23]. Если газопылевые диски WTTS диссипировали, мы не должны наблюдать признаков аккреции, например, наличия УФ избытков, при одновре-

менном наблюдении больших скоростей в крыльях линии H_{α} .

Вышеприведенный краткий обзор показывает, что представляет большой интерес исследовать характеристики аккреционных дисков для статистически значимого количества молодых звезд разных масс и возрастов. Целью данной работы является исследование свойств околозвездной материи по спектральному распределению энергии у избранных WTTS.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Мы выбрали 45 WTTS, взятых из каталога [24] и расположенных в различных областях звездообразования. 23 звезды WTTS было отобрано из области звездообразования Тельца. Из остальных 22 звезд большинство принадлежат созвездию Ориона и другим созвездиям. Мы старались выбрать звезды, у которых эквивалентные ширины эмиссионных линий H_{α} значительно различаются. Для сравнительного изучения в список также было включено 9 классических звезд типа Т Тельца (CTTS).

Основная часть данных по широкополосной фотометрии UBVR_IJHK была собрана из литературы, список которой приводится в последней колонке табл. 1, и из каталогов Vizier (<https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR>). Данные фотометрии в ближней и дальней ИК области собраны из каталогов 2MASS [25], DENIS [26], WISE [27] и IRAS [28].

В табл. 1 приведен полный список программных звезд, где в столбцах приводятся, соответственно, номер по каталогу [24], название объекта, расстояние, коэффициент межзвездного покраснения, эквивалентная ширина эмиссионной линии H_{α} из [24], приведенные в литературе спектральные классы и соответствующие им эффективные температуры по версии [29]. В последнем столбце приводятся основные литературные источники по каждой звезде. Все расстояния до источников были перепроверены и уточнены по архиву данных Gaia DR3 (<https://gea.esac.esa.int/archive/>). Для отдельных звезд коэффициенты межзвездного поглощения, приводимые в литературе разными авторами, могут значительно отличаться. В таких случаях, используя показатель цвета $B-V$ для нормальных звезд ГП, мы перепределяли значение параметра A_V , при допущении, что соблюдается нормальный закон межзвездного поглощения и коэффициент экстинкции равен $R = 3.1$. Две звезды из нашей выборки — KN Ori и NX Mon — расположены в очень яркой отражательной туманности, поэтому их коэффициент межзвездного поглощения получен отрицательным, т.е. туманность дает дополнительный вклад к собственному блеску звезды. Еще две

Таблица 1. Основные данные программных звезд, собранные из литературы

НВС	Объект	D , пк	A_V	$EW H_{\alpha}$, Å	Sp	T_{eff}	Литература
WTTS							
29	V410 Tau	130	0.31	0.5	K3–K5	4600	6, 7, 37
31	CZ Tau	155	0.6	4	M5.3	3100	11, 6, 32
39	DI Tau	144	0.65	1.2	M0.7, M0	3850	6, 11, 7
97	V1311 Ori	37	0.062	3.3	M1.5V	3550	6, 8, 9
113	V1044 Ori	190	2	8.7	G5IV/V	5280	6, 16, 17
115	SW Ori	164	3.171	4.4	G8.0, G5/K0	5500	11, 23, 6
117	XX Ori	372	1.138	6.7	M1.0	3680	6, 10, 11
122	KM Ori	160	1.69	1.3	K5V	4400	17, 6
123	KN Ori	148	–0.413	5.1	K6	4200	6, 17, 24
129	V356 Ori	408	0.864	3	K1–K4	5100	6, 17, 24
132	Brun 555	137	0.062	1.9	K3	4850	6, 29
136	TT Ori	147	2.862	6.4	K1	5100	11, 6
156	V390 Ori	401	3.35	1.4	K3	4800	6, 13, 14
162	AZ Ori	407	0.561	2.4	K6	4200	6, 9, 41
173	TY Ori	400	1.084	4.1	K0:, K3.0	5000	6, 40
213	NW Mon	731	0.7	9	K5, M0	4500	6, 30, 31
248	CD 3310685	154	0.58	6.8	K2, M5.9	4600	34, 6, 11
250	CD-35 10525	154	0.7	2.8	K7	4100	6, 9, 7
359	NTTS040047 + 2603E	125	0.48	3	M2.8	3500	6, 44
367	HD283447	120	0.7	3	K2, K4.0	4800	11, 4, 6
371	V1312 Tau	132	0.4	4	M2.2	3500	4, 5, 6
372	NTTS041529 + 1652	180	0.8	0.7	K2	5000	33, 6
378	WK 81 1	130	1.4	1.7	K8.0	4000	6, 4, 46
382	EM* LkCa 21	117	0.031	6	M3/4V	3400	1, 6
399	V827 Tau	387	1.1	1.8	K7, M1.4	4500	9, 6, 20
403	NTTS042950 + 1757	180	1.3	4	K6.0	4200	33, 6
405	V830 Tau	136	0.6	2	K7.5	4050	6, 38, 39
409	FF Tau	120	0.34	4	K8.0	4000	18, 6
412	NTTS043230 + 1746	396	0.6	9	M2.6	3400	6, 18, 19
417	V1115 Tau	147	–0.71	1	M0	3850	33, 6, 9
418	HV Tau	138	2.9	4.5	M1Ve, M4.1	3500	6, 7
420	IW Tau	136	0.93	1.4	M0.9, K7	4000	5, 6, 1
422	V999 Tau	123	3.35	3.1	M0.6	3700	6, 21, 22
426	NTTS045226 + 3013	157	0.8	1	K0V, G5	5360	1, 2, 3
427	NTTS045251 + 3016	149	0.2	2.4	K6.0, K7	4200	6, 36
435	AB Dor	15	0.05	1	K2, K0V	5100	34, 35
479	V815 Ori	393	0.563	2.9	G2IV	5500	6, 12
566	SZ Cha	190	1.4	7	K0	5300	11, 6, 15
571	UV Cha	128	–0.14	8	K5V, M1.5	3600	6, 9, 25
605	THA 15-12	146	0.35	7	K5, K6.0	4500	6, 9, 29
625	THA 15-36	374	0.42	3.9	M1.5	3600	6, 9, 26
631	THA 15-43	165	0.124	1.6	M0	3850	6, 42
635	ROX 2	180	3.4	2.5	M2	3500	6, 11,
647	DoAr 51	153	1.6	7	K8IV, M0	3900	6, 27, 28

Таблица 1. Окончание

НВС	Объект	D , пк	A_V	EW H_{α} , Å	Sp	T_{eff}	Литература
	UX Tau	390	0.36	3.9	K2V + M1V	5100	11, 33
CTTS							
25	CW Tau	131	1.9	135	K3	4840	43, 11, 46
45	DK Tau	149	1.4	19	K7e K8.5	4000	9, 43
61	CI Tau	160	1.58	102	K7, K5.5	4150	11, 34, 43
166	BC Ori	304	0.35	151	K7.5e, M0	4000	44, 45
216	NX Mon	706	-2.45	211	K7, M5	3550	51, 50, 49
268	Haro 1-16	146	1.38	54	K3	4840	6, 47
385	IP Tau	129	0.2	11	M0.6	3800	48, 47, 6
574	Ass Cha T 1-15	190	1.55	94	K5V	4450	9, 45, 46
617	SZ 102	130	6.5	186	K2, K0V	5100	6, 29, 42

Ссылки на литературу: (1) Herbig G.H. et al., 1986 AJ, 91, 575H; (2) Hog E. et al., 2000 A&A, 355L, 27H; (3) Norton A.J. 2007 A&A, 467, 785; (4) Riviere-Marichalar P. et al., 2012 A&A, 538, 3; (5) Herczeg G.J. et al., 2014 ApJ, 786, 97; (6) Cutri R.M. et al., 2003 yCat, 2246, 0C; (7) Herbig G.H. 1977 ApJ, 214, 747; (8) Alonso-Floriano F.J. et al., 2015 A&A, 577, 128; (9) Zacharias N. et al., 2012 yCat.1322, 0Z; (10) Hsu, Wen-Hsin et al., 2012 ApJ, 752, 59; (11) Ducati, 2002 yCat, 2237, .0D; (12) Smith M.A. et al., 1983 ApJ, 271, 237; (13) Herbig G.H. 1962 ApJ, 135, 736; (14) Tobin J.J. et al., 2009 ApJ, 697, 1103; (15) Rydgren A.E. 1980 AJ, 85, 444; (16) Penston M.V. et al., 1975 MNRAS 171, 219; (17) Da Rio N. et al., 2009 ApJS, 183, 261; (18) Nguyen D.C. et al., 2012 ApJ, 745, 119; (19) Ducourant C. et al., 2006 A&A. 448, 1235; (20) Kirshner R.P. et al., 1981 ApJ, 248, 35; (21) Kounkel M. et al., 2019 AJ, 157, 196; (22) Audard M. et al., 2007 A&A, 468, 379; (23) Strom K.M. et al., 1989 ApJS, 71, 183; (24) Hillenbrand L.A. 1997 AJ, 113, 1733; (25) Frasca A. et al., 2015 A&A, 575, 4; (26) Alcalá J.M. et al., 2017 A&A, 600A, 20 (27) Pecaunt M.J.; Mamajek E.E. 2016 MNRAS, 461, 794; (28) Cieza L. et al., 2007 ApJ, 667, 308; (29) Hughes J. et al., 1994 AJ, 108, 1071; (30) John E. et al., 2002 AJ, 123, 1528; (31) Dahm S.E.; Simon T. 2005 AJ, 129, 829; (32) Xiao H.Y. et al., 2012 ApJS, 202, 7; (33) Nguyen D.C. et al., 2012 ApJ, 745, 119; (34) Torres C.A.O. et al., 2006 A&A, 460, 695; ; (35) Koen C. et al., 2010 MNRAS, 403, 1949; (36) Walter F.M. et al., 1988 AJ, 96, 297; (37) Hog E. et al., 2000 A&A, 355, 27; (38) Strassmeier K.G. 2009 A&ARv, 17, 251S; (39) Norton A.J. et al., 2007 A&A, 467, 785; (40) Hernández J. et al., 2014 ApJ, 794, 36; (41) Cohen M., Kuhl L.V. 1979 ApJS, 41, 743C; (42) Merín B. et al., 2008 ApJS, 177, 551; (43) Strom K.M. et al., 1989 AJ 97, 1451; (44) Wiramihardja S.D. et al., 1991 PASJ, 43, 27; (45) Briceño C. et al., 2019 AJ, 157, 85B; (46) Lara L.M. et al., 2004 A&A, 423, 1029; (47) Lasker B.M. et al., 2008 AJ, 136, 735; (48) Lawrence A. et al., 2007 MNRAS, 379, 1599; (49) Sung H. et al., 1997 AJ, 114, 2644; (50) Varentsen G. et al., 2014 yCat. 2321, 0B; (51) Flaccomio E. et al., 2006 A&A, 455, 903.

Таблица 2. Усредненные показатели избыточного излучения разных типов звезд

Тип звезд	$S(UV)$	σ	N	$S(IR)$	σ	N	ΔK	σ	N
CTTS	0.315	0.291	5	4.192	1.043	9	0.407	0.242	8
WTTS II	0.279	0.218	5	3.107	0.793	15	0.283	0.225	3
WTTS III	0.108	0.065	2	2.719	0.832	8	—	—	—
WTTS III _d	0.141	0.077	8	1.094	0.259	22	—	—	—

звезды UV Cha и V1115 Tau также расположены в относительно слабой отражательной туманности. Очевидно, что параметры этих звезд определяются неуверенно. Поскольку A_V определяется из показателей цвета переменной и стандарта, то чем точнее определены спектральные классы переменной, тем ближе параметры к реальным значениям. Спектральные классы у звезд типа T Тельца часто определены с разбросом до 5 подкласса (см. табл. 1). Несмотря на это, сравнение параметров L/L_{\odot} и $\log t$, например, для звезды KN Ori (табл. 2) показало удовлетворительное согласие наших данных (табл. 2) с данными [30] ($L/L_{\odot} = 0.138$) и [31] ($\log t = 6.34$).

Отметим, что собранные из каталогов фотометрические данные оптического и ИК диапазонов получены неодновременно, поэтому это может проявиться как слабое избыточное ИК излучение в кривых РЭС [32]. Также переменность отдельных звезд может внести некоторое искажение на кривых РЭС. Типичные изменения блеска у TTS в V полосе равны $\Delta V \sim 0.1-0.5$ mag [33, 34]), поэтому ожидаемое максимальное изменение потока в этой полосе может составить около 35%. Максимальные изменения в полосе $K = 2.2$ мкм составляют около $\Delta K \sim 0.3$ mag [35], что может внести ошибку в потоки в этой полосе около 25%.

Для получения наблюдаемых потоков в данной длине волны F_{λ}^{obs} анализируемой звезды, ис-

правленных за межзвездное поглощение, использовано следующее соотношение:

$$F_{\lambda}^{\text{obs}} = F_{\lambda}^0 \times 10^{-0.4m_{\lambda} + 0.4A_{\lambda}}. \quad (1)$$

Здесь F_{λ}^0 — поток стандарта нулевой величины (звезды A0V) на длине волны λ в единицах эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{\AA}^{-1}$, при этом все величины стандарта $m_{\lambda} = 0$. Здесь m_{λ} — звездная величина звезды в полосе λ , а A_{λ} — соответствующий коэффициент межзвездного покраснения в этой полосе. Величины коэффициента покраснения для других полос A_{λ} были вычислены из отношений A_{λ}/A_V , взятых из работы [36].

Наблюдаемые потоки программных звезд были аппроксимированы теоретической моделью [37]. Использована сетка атмосфер звезд ГП, для интервала эффективной температуры 3500–39000 К в диапазоне длин волн от 0.009 мкм до 160 мкм.

Для контроля применяемой методики и выполненных вычислений были также построены кривые РЭС звезд-стандартов α Lyr ($T_{\text{eff}} = 9500$ К), α Leo ($T_{\text{eff}} = 12000$ К), μ UMa (3700 К) и β Peg (3600 К). Спектры этих звезд изучены достаточно хорошо и имеются кривые РЭС, полученные другими авторами (см., например, [38–40]).

Методическая часть построения кривых распределения энергии в спектрах звезд была подробно изложена в наших работах [41, 42].

3. ДАННЫЕ О СКОПЛЕНИЯХ В ПАРАХ

3.1. Кривые РЭС

На рис. 1 для примера показаны кривые РЭС стандартных звезд α Leo (Sp B8IV) и α Lyr (A0V), а также спектры двух холодных звезд μ UMa (sp M0III) и β Peg (M2.5II-III). Каждая кривая РЭС аппроксимирована моделью спектра звезды соответствующего спектрального класса. Каждый график состоит из двух частей (панелей). На первой панели показана сама кривая РЭС. На второй панели приводится зависимость разности потоков звезды и модели от длины волны в том же диапазоне длин волн.

$$\log \frac{F_{\lambda}^*}{F_{\lambda}^m} = \log \lambda F_{\lambda}^* - \log \lambda F_{\lambda}^m. \quad (2)$$

Здесь F_{λ}^* — поток излучения от звезды, F_{λ}^m — поток от модели звезды главной последовательности соответствующего спектрального класса.

Наш анализ РЭС Веги показал, что в дальней ИК части спектра имеется значительный избыток, который хорошо описывается дополнительным излучением холодной пыли с температурой около 80 К [41]. Этот вывод согласуется с преды-

дущими результатами исследований других авторов [43, 44]. Спектр звезды α Leo не показывает признаков дополнительного излучения. Спектры звезд μ UMa и β Peg в основном показывают нормальное распределение, хотя по данным отдельных авторов, иногда у этих звезд наблюдается значительное поглощение в континууме. При построении кривых РЭС холодных звезд-стандартов мы не принимали во внимание такие peculiarности. На рисунках вертикальными барами показан уровень среднеквадратичного отклонения точек ($\sigma = \pm 0.07$) для параметра $\log \lambda F_{\lambda}$ от аппроксимирующей кривой.

При модельной аппроксимации наблюдательных данных мы допускали, что вклад излучения во внутреннем граничном слое диска в полосе R ничтожно мал (см., например, [23]), ошибки из-за межзвездного покраснения в полосах VRI незначительны, поэтому при аппроксимации наблюдательных данных было отдано предпочтение данным в полосах VRI как точкам с наименьшим значением ИК избытка.

Как видно из рис. 2, построенные кривые РЭС показывают широкий диапазон характеристик инфракрасного излучения: от почти плоского распределения с большим избыточным ИК излучением, простирающимся по всему спектру, до минимального значения избытка в дальнем ИК диапазоне. Одновременно с этим, в УФ и даже в оптическом диапазоне некоторые звезды показывают достаточно значимое количество избыточного излучения.

При построении кривых РЭС программных звезд мы заметили, что, несмотря на близкие значения длин волн двух наблюдаемых полос по каталогам WISE W3 (11.6 мкм) и W4 (22.1 мкм) и IRAS (12 мкм) и (25 мкм), по некоторым звездам данные IRAS часто показывают систематически завышенное значение потока. При этом данные всех полос каталога WISE W1 (3.35 мкм), W2 (4.6 мкм), W3 и W4 удовлетворительно аппроксимируются теоретическими кривыми, в то время как для отдельных звезд данные наблюдений IRAS получаются систематически завышенными. Поскольку данные наблюдений IRAS получены с низким разрешением [28], наблюдаемый сигнал может искажаться дополнительным вкладом других точечных источников, которые обычно находятся вблизи молодых звезд (см., например, [45]). Поэтому при построении кривых РЭС для некоторых программных звезд мы ввели специальную поправку для согласования сигналов полос 12 мкм (IRAS) и 11.6 мкм (WISE).

Из рис. 2 видно, что имеющиеся типы кривых РЭС WTTS можно разделить на две группы. Спектры звезд первой группы соответствуют III типу по классификации кривых РЭС молодых звезд [45, 46]. Такие звезды показывают спектр

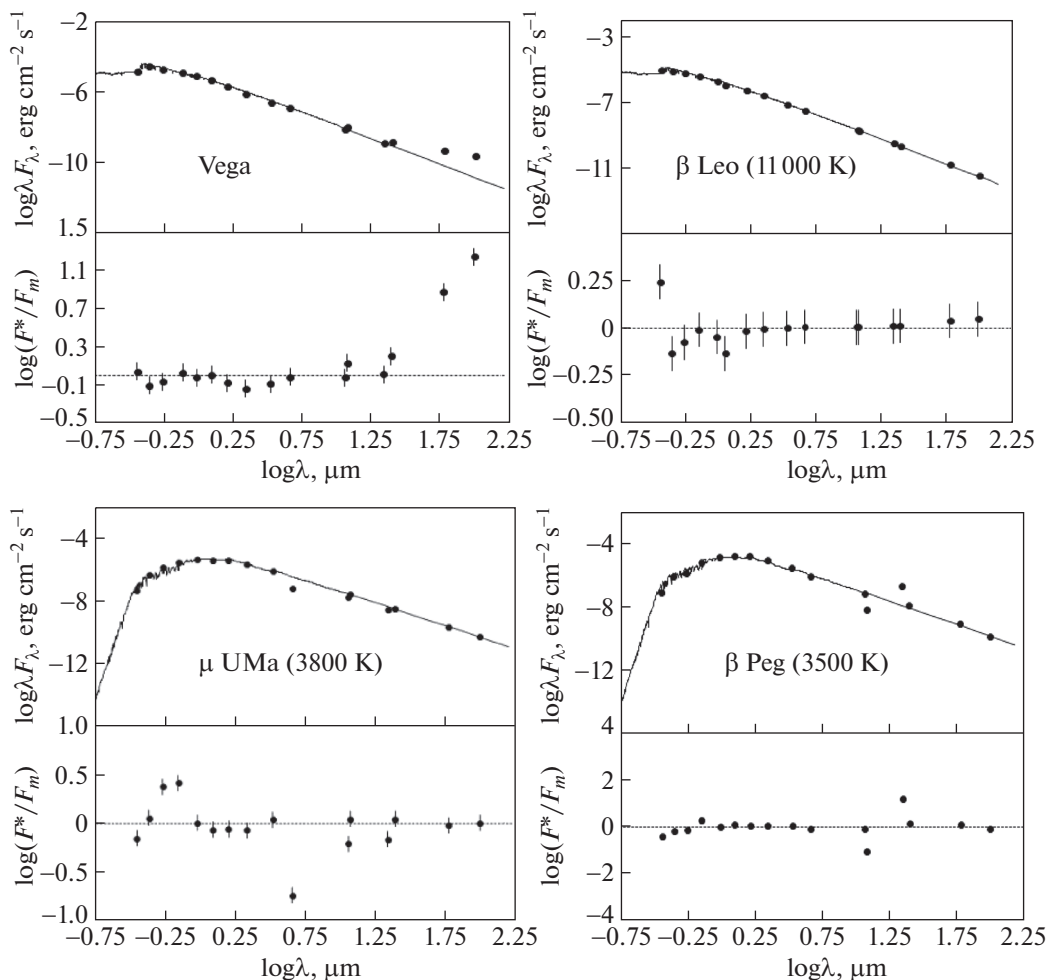


Рис. 1. Кривые РЭС звезд стандартов α Lyr, α Leo (верху), μ UMa и β Peg (внизу). В первой части каждого рисунка показано распределение (точки) и его аппроксимация с моделью звезды соответствующей эффективной температуры. Во второй части каждого рисунка показаны логарифмы разности потоков от звезды и модели. Пунктирной линией указан нулевой уровень. Вертикальными барами обозначен средний разброс точек от аппроксимирующей кривой.

фотосферного излучения и ИК избытки, наблюдаемые только в дальнем ИК диапазоне, в области $\lambda \geq 12$ мкм (рис. 2а).

Среди 30 WTTS со спектром III типа выделяется также подгруппа звезд, которые имеют слабый избыток в дальнем ИК диапазоне, и параметр избытка дальнего ИК диапазона обычно имеет значение $S(\text{IR}) \leq 1.5$. Аналогично спектрам α Lyr [43] и β Pic [48], эти звезды имеют слабый ИК избыток только в диапазоне $\lambda \geq 60$ мкм. У таких звезд, вероятно, имеются только остаточные пылевые диски (см., например, [49] и [50]). Среди таких объектов есть звезды, показывающие УФ избытки в спектре (табл. 2). Такие звезды, по-видимому, показывают хромосферную активность, индикатором которой являются эмиссионные линии H α и дублет H и K CaII, а также наличие УФ избытка в спектре за счет хромосферной активности. В табл. 2 в обозначении типа таких

звезд приводится символ “d”, указывающий признак остаточного диска (debris disk). Подобные остаточные диски имеются у 22 из 30 звезд со спектрами типа III d, что составляет около 48.8% от общего количества всех программных звезд типа WTTS. Остальные 8 звезд со спектром III типа имеют относительно большие избытки в дальнем ИК диапазоне ($S(\text{IR}) > 1.5$).

Вторая группа спектров звезд, по сути, совпадает с типом II по классификации [46], т.е. звезды показывают избыточное ИК излучение от ближнего до дальнего ИК диапазона. Спектрами такого типа обычно обладают также звезды CTTS [47].

Наши данные показали, что из рассматриваемого набора 45 WTTS только 15 можно отнести ко II типу спектра (рис. 2б). Кривые РЭС звезды SW Ori и XX Ori, возможно, являются комбинированным излучением двух звезд с разными температурами (рис. 2б). Для аппроксимации этих спектров

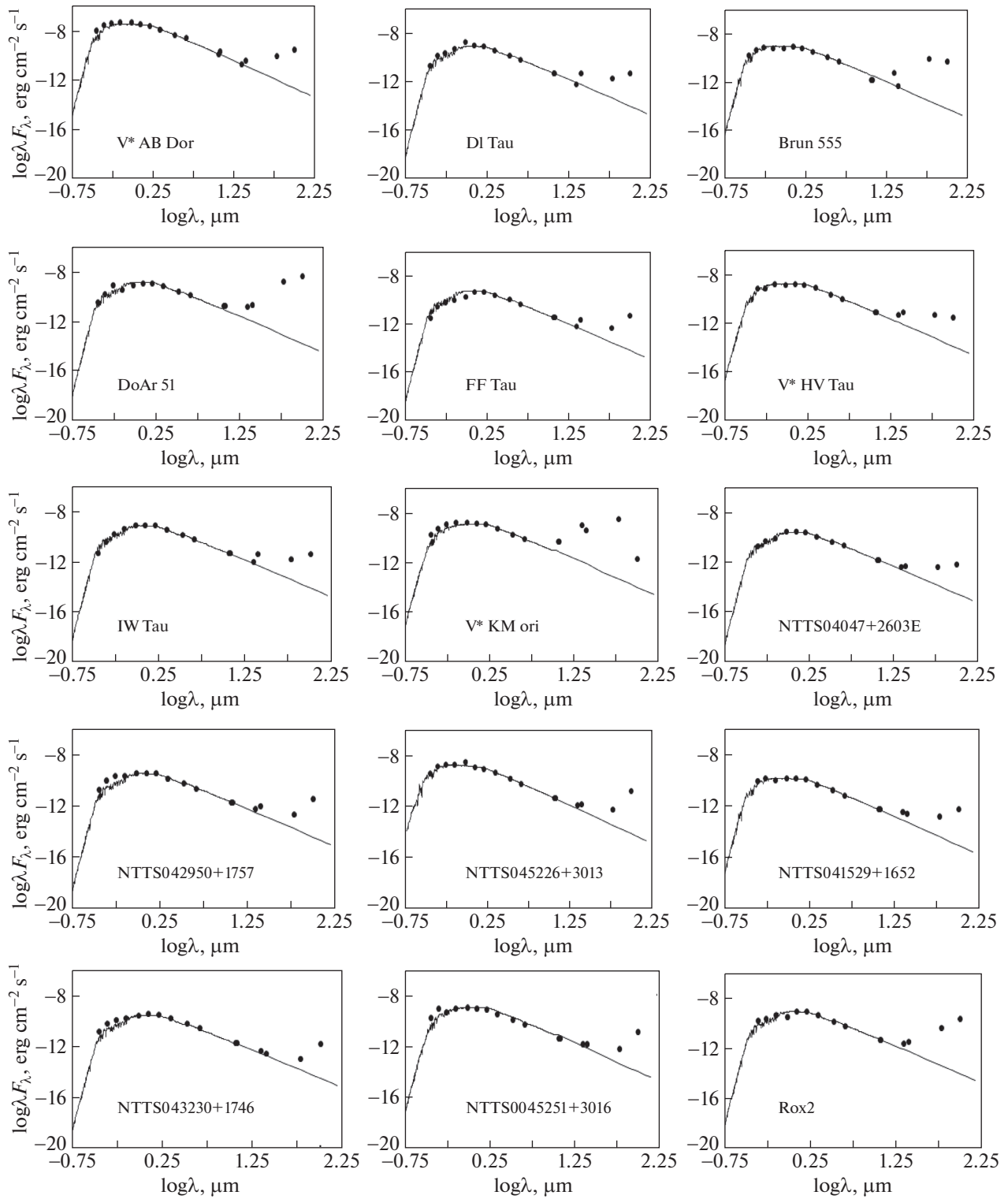


Рис. 2. а: Кривые РЭС WTTS III типа; б: Кривые РЭС программных звезд II типа.

нами также были применены планковские кривые с температурами 10000 К (пунктирная линия) и 2500 К (сплошная кривая). Спектры всех СТТС, приведенные нами на рис. 3, также соответствуют

II типу. В табл. 2 в отдельной колонке приводятся типы звезд.

В качестве возможной меры избытка в ближнем ИК диапазоне был взят логарифм отношения

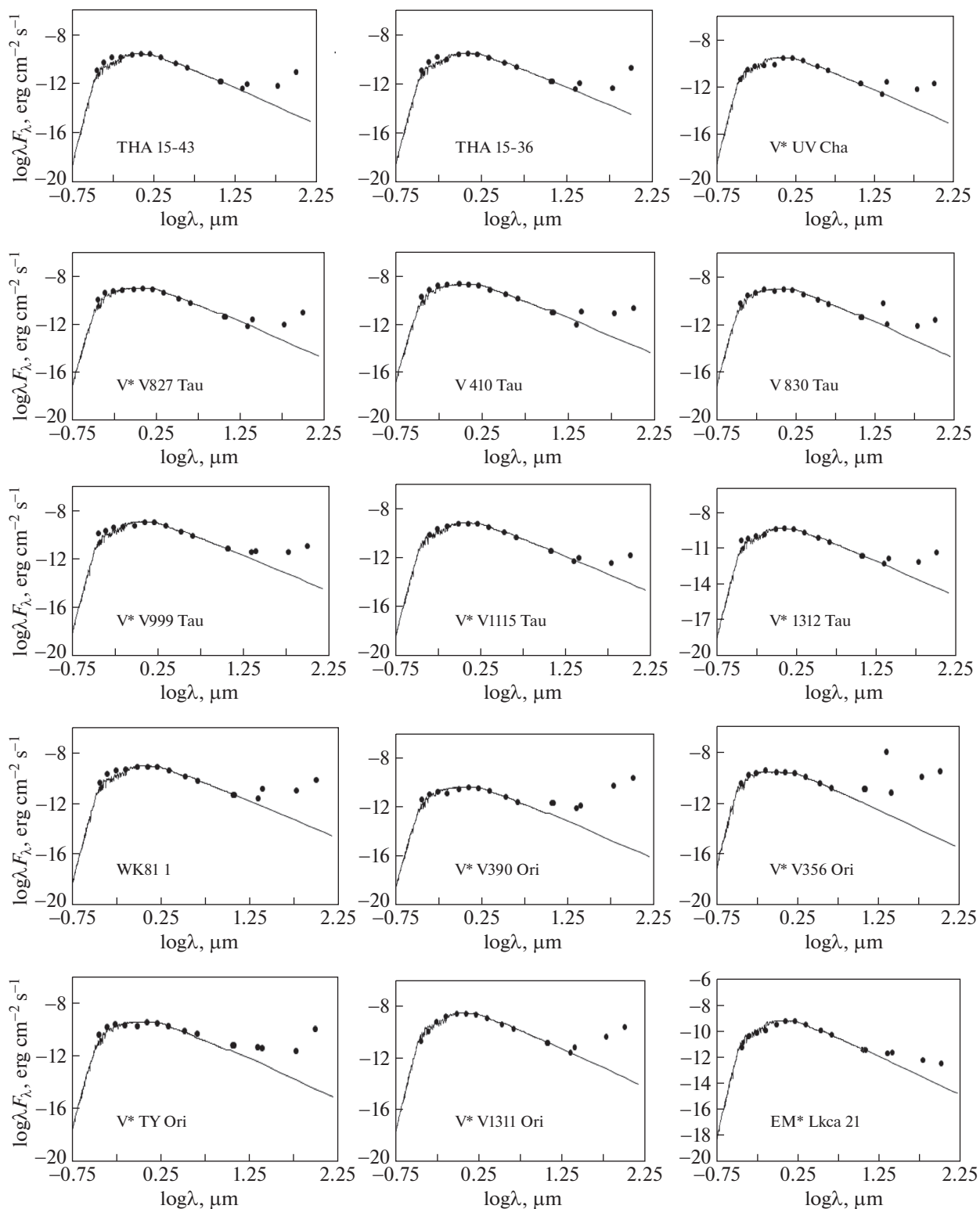


Рис. 2. Продолжение

потоков звезды $F_{2.2}^*$ и модельного стандарта $F_{2.2}^m$ того же спектрального класса в полосе К [32],

$$\Delta K = \log F_{2.2}^* - \log F_{2.2}^m = \log F_{2.2}^*/F_{2.2}^m. \quad (3)$$

Для величины ΔK ожидаемая ошибка определения должна быть на уровне ошибок аппроксимации наблюдательных данных модельной кривой (± 0.07). Поэтому все звезды, у которых $\Delta K \geq$

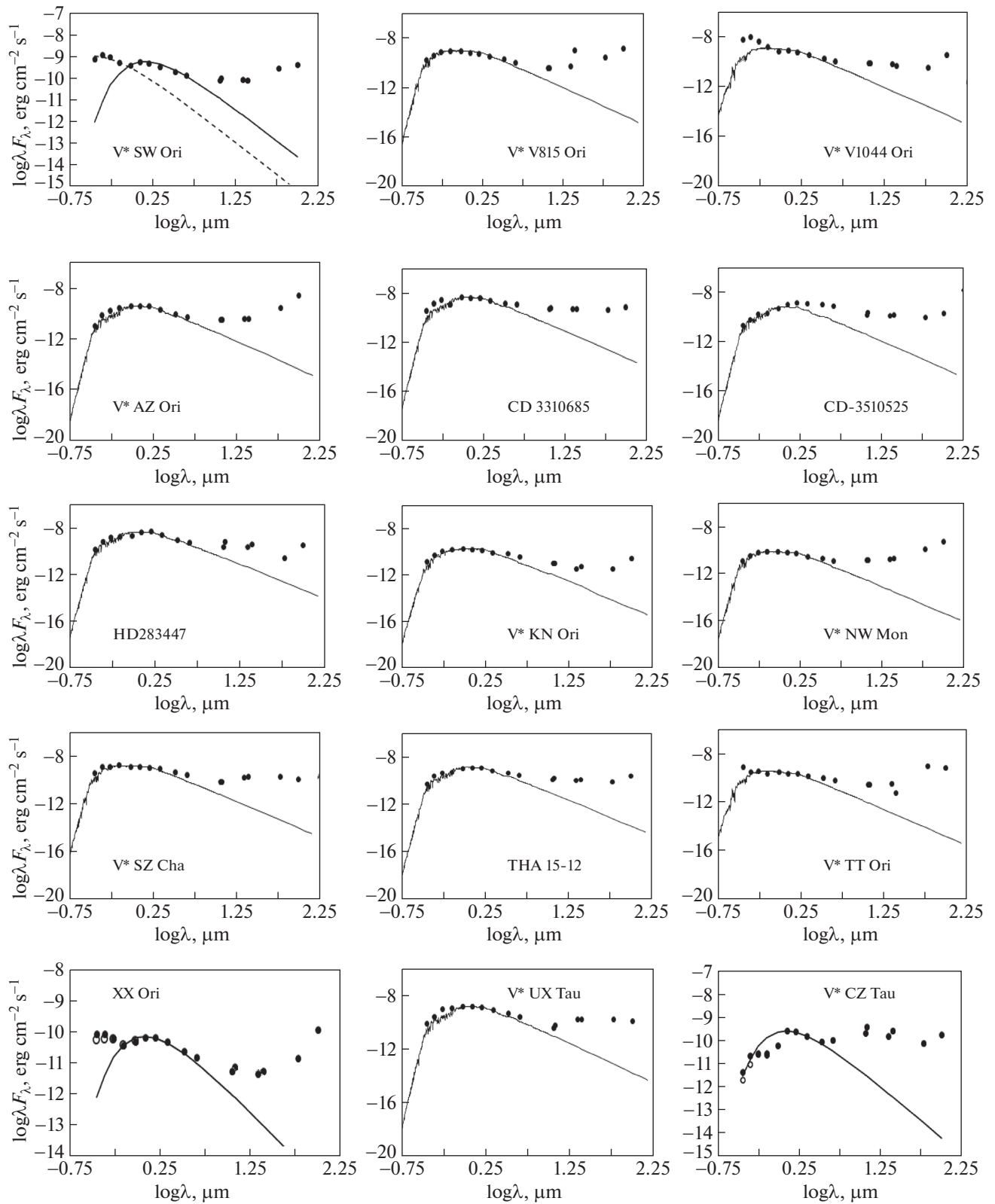


Рис. 2. Окончание

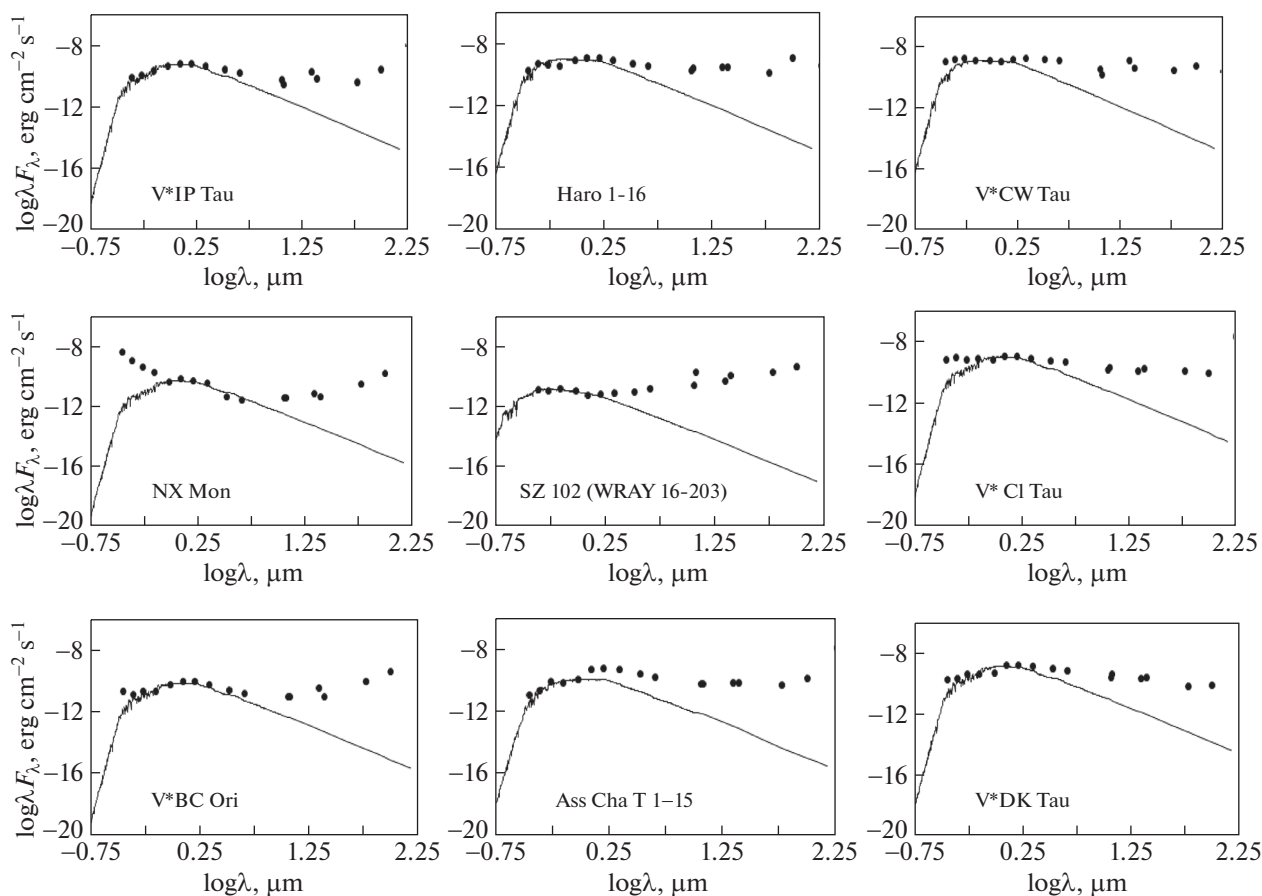


Рис. 3. Кривые РЭС избранных CTTS.

≥ 0.07 , будем считать обладающими реальным избытком. Наши измерения этой величины показали, что в данной выборке имеется всего 3 звезды WTTS, у которых уверенно наблюдается значимое количество избыточного излучения в К-полосе. Это звезды SZ Cha, $\Delta K = 0.138$, у TT Ori, $\Delta K = 0.170$, и у CD-35 10525, $\Delta K = 0.542$. При этом, из 9 CTTS только звезда CI Tau не показала значимого избытка излучения в этой полосе. Критерий ΔK был применен в работе [32] для выявления наличия теплой пыли во внутренних областях протопланетных дисков. Поскольку CTTS по определению окружены аккреционными дисками, а WTTS лишены таких дисков (или имеют остаточные диски без внутренних аккреционных областей), то результаты, полученные нами, по применению этого критерия подтверждают современные представления об основных различиях между CTTS и WTTS.

Чтобы количественно оценить величину интегрального избыточного излучения в спектрах WTTS, мы также применили метод, который демонстрируется на примере кривых РЭС двух звезд типа WTTS, DoAr 51 и V999 Tau (рис. 4). На графиках, показывающих зависимость величин

$\log F^*/F_m \sim \log \lambda$, выделены участки, которые могут характеризовать величину полного избыточного излучения в УФ и ИК части спектра, обозначенные соответственно как $S(\text{UV})$ и $S(\text{IR})$. Чтобы вычислить интегральное избыточное излучение на спектральном участке $\lambda_2 - \lambda_1$ (где $\lambda_2 > \lambda_1$), можно применить выражение

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \log \frac{F^*}{F_m} d\lambda. \quad (4)$$

Здесь λ_1 и λ_2 — начальные и конечные длины волны участка избыточного излучения. Для вычисления этого интеграла практически нужно вычислить площади фигур на этих графиках, выделенных пунктиром. Полученные величины $S(\text{UV})$ и $S(\text{IR})$ характеризуют интегральную величину избыточного излучения в соответствующих участках спектра. Как видно из рис. 4, в спектре DoAr 51 не наблюдается УФ-избытка, а в спектре звезды V999 Tau выделяются участки с избыточным излучением как в УФ, так и в ИК-части спектра. Все полученные значения $S(\text{UV})$ и $S(\text{IR})$ приводятся в табл. 2.

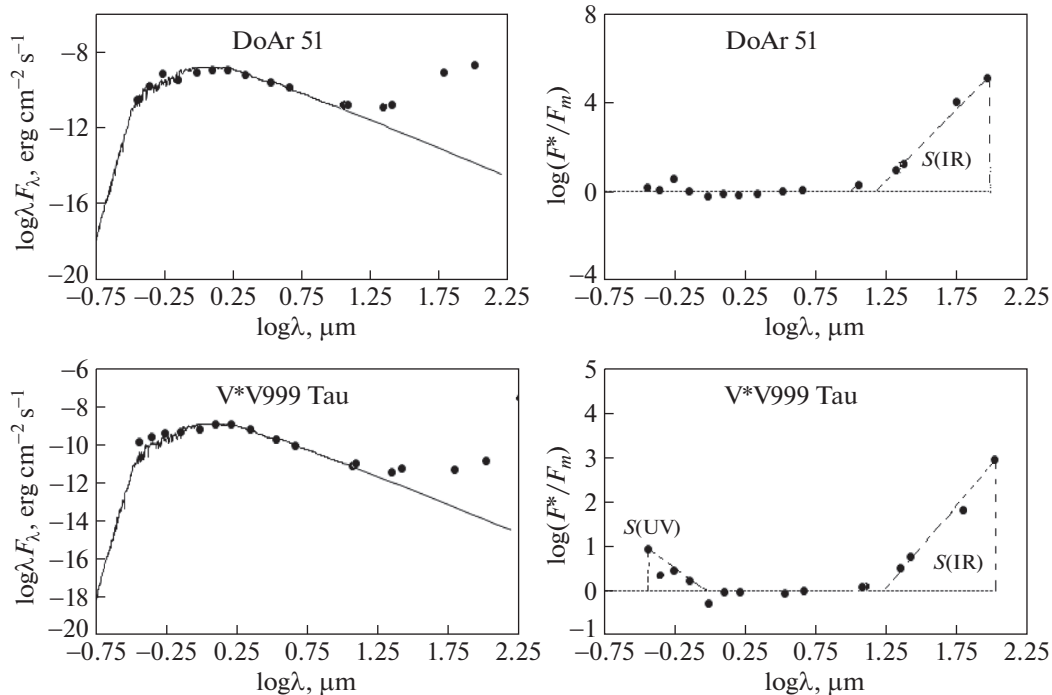


Рис. 4. Пример кривых РЭС для звезд WTTS DoAr 51 и V999 Tau (левые панели) и разность потока звезды и модели $\log(F^*/F_m)$ (правые панели). Фигуры в виде треугольников, выделенные штриховыми линиями, указывают участки площади под кривой $S(UV)$ и $S(IR)$, ограниченной нулевой линией.

3.2. Физические параметры звезд

Прежде всего, на основании очищенной от межзвездного покраснения величины V , расстояния до звезды и болометрических поправок, взятых из работы [29], нами были вычислены абсолютные болометрические звездные величины M_V . Зная абсолютную величину Солнца $M_{V\odot} = 4.83$, мы вычислили абсолютные светимости звезд в единицах солнечной светимости L/L_\odot . Далее, зная эффективные температуры T_{eff} и светимости, мы вычислили радиусы звезд в единицах радиуса Солнца R/R_\odot . Солнечная эффективная температура T_\odot была взята равной 5800 К.

С использованием теоретических эволюционных треков [51] также были определены массы и возрасты звезд. Положение на диаграмме ГР показывает (рис. 5), что массы звезд находятся в пределах $0.15 \leq M/M_\odot \leq 2.5$. Всего одна звезда, CZ Tau, на диаграмме оказалась около изолинии с массой $0.15 M_\odot$ и три звезды II типа — V815 Tau, V1044 Ori и UX Tau имеют массы, немного больше, чем $2 M_\odot$. Как видно из рис. 5, возрасты рассматриваемых звезд находятся в пределах 10^5 – 10^8 лет и отдельные звезды находятся на линии ZAMS. Здесь положения WTTS III типа указаны черными кружками, II типа — светлыми треугольниками, положения CTTS — крестиками. На

рис. 5 видно, что оба типа звезд в основном расположены в области возрастов до нескольких миллионов лет. Эта диаграмма показывает, что как по массам, так и по возрастам не существует четкого разделения между различными типами звезд WTTS. Аналогичные результаты были получены и в других работах (см., например, [52, 21]).

В табл. 2 приводятся все вычисленные параметры для отдельных звезд нашего списка. В столбцах табл. 2 слева направо приведены: название объекта, параметры, показывающие меру УФ и ИК избытков $S(UV)$ и $S(IR)$, абсолютная болометрическая светимость M_V , болометрическая светимость в L/L_\odot , радиусы R/R_\odot , соответствующий тип по кривой РЭС, массы M/M_\odot , возрасты t (10^6 год). Ожидаемые погрешности отдельных параметров должны быть не более 20%.

3.3. Анализ полученных результатов по отдельным объектам

В табл. 2 приведено среднее значение параметров избыточного излучения, σ — среднеквадратичное отклонение от среднего и N — количество звезд, у которых проведено усреднение, т.е. количество звезд, у которых наблюдается данный вид избытка. Для звезд со спектрами типа III и III_d эти параметры приводятся отдельно. Из табл. 3 видно, что, с уменьшением газовой составляю-

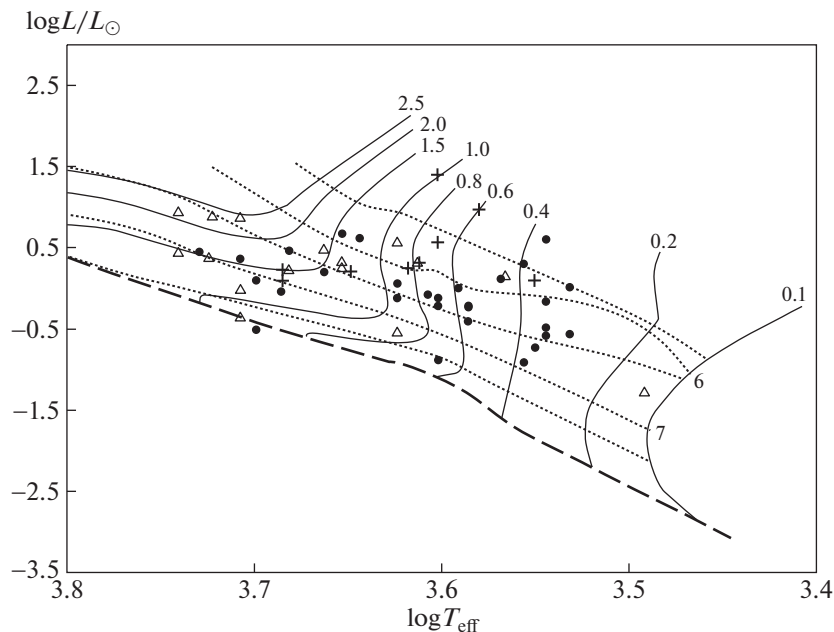


Рис. 5. Расположение программных звезд на ГР диаграмме с эволюционными треками по данным [51]). Цифры на сплошных линиях указывают массы, а около точечных линий, логарифмы возрастов от 5 до 8 с шагом 0.5. Нижняя жирная штриховая линия – линия нулевого возраста (ZAMS). Светлыми треугольниками отмечены данные WTTS II типа, черными кружками – III типа, крестиками – CTTS.

шей диска, наблюдается тенденция уменьшения показателя как УФ, так и ИК избытка. С возрастом количество газа в диске должно уменьшаться, поэтому с возрастом мы должны наблюдать уменьшение избытка в ИК диапазоне. Такими объектами являются все WTTS, которые показали типы распределения спектра II, III и III_d. Одновременно с этим, с уменьшением количества газовой составляющей диска мы должны наблюдать уменьшение УФ избытка, из-за ослабления дисковой аккреции.

У звезд типа WTTS CD-33 10685 и UX Tau со спектрами II типа наблюдается значительный избыток как в УФ, так и в ИК диапазонах. Для этих звезд получены параметры $H_{\alpha}10\%$, равные 630 км/с [53] и 513 км/с [54], соответственно, что указывает на существовании дисковой аккреции у этих звезд. 9 из 15 WTTS со спектром II типа показывают значения параметра $H_{\alpha}10\%$ в интервале 90–179 км/с. Такая ширина характерна для хромосферных профилей при отсутствии дисковой аккреции.

Сравнение кривых РЭС WTTS II типа с кривыми распределения трех звезд CTTS (табл. 2 и рис. 2, 3) показывает, что практически эти кривые ничем не отличаются. Кроме того, выявлено всего 2 звезды с возрастaми около 10^8 лет. Одна из них – это WTTS со спектром типа III_d AB Dor, а вторая – WTTS III_d типа NTTS 041529 + 1652. По-видимому, эти звезды являются наиболее стары-

ми среди программных звезд (см., например, [55]).

Одним из индикаторов существования дисковой аккреции является абсолютная светимость в эмиссионной линии H_{α} . Следуя [56], для вычисления светимости звезд в линии H_{α} ($L_{H_{\alpha}}$) была использована формула

$$L_{H_{\alpha}} = 4\pi d^2 F_R W_{H_{\alpha}}, \quad (5)$$

где d – расстояние до звезды, F_R – абсолютная плотность потока в фотометрической полосе R ($\lambda_{\text{eff}} \sim 7000 \text{ \AA}$), $W_{H_{\alpha}}$ – эквивалентная ширина линии H_{α} , выраженная в ангстремах. С использованием выражения (5) для программных звезд был вычислен логарифм светимости излучения в линии H_{α} в единицах светимости солнца. Результаты этих вычислений приведены на рис. 6 на графиках, выражающих зависимость этой величины от параметров $S(\text{UV})$ и $S(\text{IR})$. На этом рисунке темными кружками показаны WTTS с кривыми III типа, светлыми треугольниками, WTTS с кривыми II типа, а крестиками, – CTTS. Как видно из левой панели рис. 6, не наблюдается корреляции светимости в линии H_{α} с избыточным излучением в УФ, в то время как наблюдается слабая корреляция с ИК избыточным излучением. Вычисленный для всех 45 WTTS коэффициент корреляции для ИК избытка равен $r = 0.41 \pm 0.13$, а для УФ избытка $r = 0.29 \pm 0.19$. Коэффициент корреляции между мерой избытка и светимостью

Таблица 3. Вычисленные параметры для программных звезд

Объект	$S(UV)$	$S(IR)$	M_V, mag	L/L_{\odot}	R/R_{\odot}	Тип	M/M_{\odot}	$\log t, \text{год}$
WTTS								
V 410 Tau		1.523	4.33	1.59	2	IIIId	1.4	6.6
CZ Tau	0.11	3.244	8	0.05	0.81	II	0.15	6.75
DI Tau	0.126	1.273	5.36	0.61	1.78	IIIId	0.58	6.5
V1311 Ori		1.478	6.67	0.18	1.15	IIIId	0.38	6.2
V1044 Ori		3.455	2.6	7.79	3.37	II	2.2	6.6
SW Ori		2.823	3.71	2.79	1.86	II	1.5	7.2
XX Ori	0.299	2.444	4.44	1.44	2.98	II	0.48	5.7
KM Ori		3.196	3.28	4.17	3.55	III	1.2	5.9
KN Ori	0.255	2.861	6.17	0.29	1.03	II	0.82	7.3
V356 Ori		3.466	3.9	2.36	1.99	III	1.6	6.9
Brun 555		2.641	4.93	0.91	1.37	III	1.2	7.2
TT Ori		4.567	4.85	0.98	1.28	II	1.1	7.4
V390 Ori		3.887	3.66	2.93	2.5	III	1.7	6.5
AZ Ori		3.685	3.4	3.73	3.68	II	0.9	7.4
TY Ori		2.938	4.57	1.28	1.52	III	1.3	7.1
NW Mon		3.41	3.96	2.23	2.48	II	1.3	6.4
CD-33 10685	0.636	2.844	3.6	3.1	2.8	II	1.5	6.2
CD-35 10525		4.483	4.02	2.1	2.9	II	1.75	6.5
NTTS040047 + 2603E	0.119	0.714	6.28	0.26	1.41	IIIId	0.35	5.9
HD 283447		2.409	4.23	1.74	1.93	II	1.7	6.5
V1312 Tau	0.115	0.944	6.05	0.33	1.57	IIIId	0.32	5.8
NTTS041529 + 1652	0.206	1.344	6.08	0.32	0.76	IIIId	0.9	8.1
WK 81 1		1.851	5.37	0.61	1.64	III	0.7	7.5
EM* LkCa 21		0.635	6.24	0.27	1.52	IIIId	0.3	5.5
V827 Tau	0.299	1.056	3.14	4.74	3.62	IIIId	1.4	5.9
NTTS042950 + 1757	0.07	0.912	4.67	1.16	2.06	IIIId	0.9	6.4
V830 Tau		1.253	5.01	0.85	1.89	IIIId	0.75	6.4
FF TAU		0.917	7.02	0.13	0.77	IIIId	0.7	6.5
NTTS043230 + 1746		0.841	4.77	1.06	2.99	IIIId	0.3	6.4
V1115 Tau		0.776	5.84	0.39	1.42	IIIId	0.59	6.5
HV Tau		1.096	3.3	4.09	5.55	IIIId	0.4	5
IW Tau	0.063	1.227	5.13	0.76	1.83	IIIId	0.7	6.3
V999 Tau	0.125	1.385	4.53	1.32	2.82	III	0.48	5.8
NTTS045226 + 3013		1.006	3.69	2.85	1.98	IIIId	1.5	7
NTTS 045251 + 3016		1.594	5.12	0.76	1.67	IIIId	0.95	6.5
AB Dor	0.13	1.021	5.69	0.45	0.87	IIIId	0.9	8
V815 Ori		3.472	2.43	9.09	3.35	II	1.4	7.2
SZ Cha		2.896	3.86	2.44	1.87	II	1.5	7
UV Cha		0.933	7.09	0.12	0.92	IIIId	0.39	6.9
THA 15-12		2.497	4.14	1.88	2.28	II	1.3	6.5
THA 15-36		1.187	4.09	1.98	3.66	IIIId	0.4	5.5
THA 15-43		1.08	5.4	0.59	1.74	IIIId	0.58	6.5
ROX 2		1.275	5.24	0.68	2.27	IIIId	0.36	6.1
DoAr 51	0.09	2.389	4.82	1.01	2.23	III	0.6	5.5

Таблица 3. Окончание

Объект	$S(\text{UV})$	$S(\text{IR})$	M_V, mag	L/L_\odot	R/R_\odot	Тип	M/M_\odot	$\log t, \text{год}$
UX Tau	0.097	1.517	2.61	7.75	3.6	II	2.3	6.5
CTTS								
CW Tau	0.152	4.191	4.464	1.401	1.7	II	1.3	7
DK Tau	0.12	3.24	4.861	0.972	2.073	II	0.7	5.8
CI Tau	0.312	3.348	4.459	1.407	2.317	II	0.8	6
BC Ori	0.174	3.984	6.327	0.252	1.055	II	0.7	5.7
NX Mon	0.82	3.15	7.298	0.103	0.857	II	0.4	5.7
Haro 1-16		4.604	5.448	0.566	1.08	II	1.4	7
IP Tau		3.712	6.567	0.202	1.047	II	0.6	5
Ass Cha T 1-15		5.155	6.406	0.234	0.822	II	1.5	6.7
SZ 102		6.345	3.55	3.25	2.332	II	0.8	6

в линии H_α по отдельным группам звезд получил-ся еще меньше.

На рис. 7 показан график зависимости величины $S(\text{IR})$ от возраста звезд. Поскольку подгруппа WTTS III не многочисленна (всего 8 звезд), мы объединили эти звезды с подгруппой WTTS II и представили эти две подгруппы на рис. 7 в виде кружков, треугольниками – III_d, крестиками – CTTS. Для каждой группы точек пунктирными и точечными линиями проведен аппроксимирующий линейный тренд. Как видно, для типов CTTS и WTTS III типа заметна тенденция увеличения параметра $S(\text{IR})$ с возрастом. Для WTTS III_d типа такая зависимость отсутствует или очень слаба. Коэффициент корреляции между $S(\text{IR})$ и $\log t$ для CTTS равен $r = 0.38 \pm 0.19$, для WTTS III типа $r = 0.30 \pm 0.21$ и для WTTS III_d типа $r = 0.20 \pm$

± 0.16 . Определенной корреляции между параметрами $S(\text{UV})$ и $\log t$ не обнаруживается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наши данные показали, что практически все программные звезды имеют значимое количество избыточного излучения в дальнем ИК диапазоне ($\lambda \geq 12$ мкм). Из рассматриваемых звезд, как звезды CTTS, так и оба типа WTTS проявляют признаки УФ избыточного излучения. При этом только три WTTS показали значимый избыток излучения в полосе 2.2 мкм. У восьми из девяти CTTS наблюдается избыток в полосе 2.2 мкм, что является признаком существования оптически толстого диска. Кроме того, у 15 WTTS наблюдается избыточное излучение в ближнем ИК диапазоне в интервале 3–12 мкм.

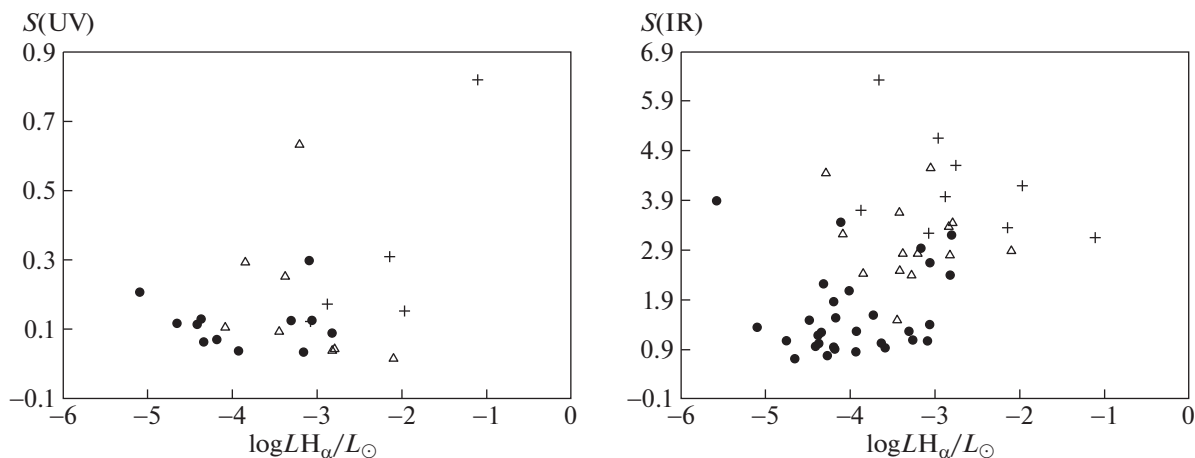


Рис. 6. Зависимость между абсолютной светимостью в эмиссионной линии H_α и параметрами избытков $S(\text{UV})$ (слева) и $S(\text{IR})$ (справа). На диаграммах темные кружки соответствуют данным звезд II типа, светлые треугольники – звезды III типа, а крестики – звезды CTTS.

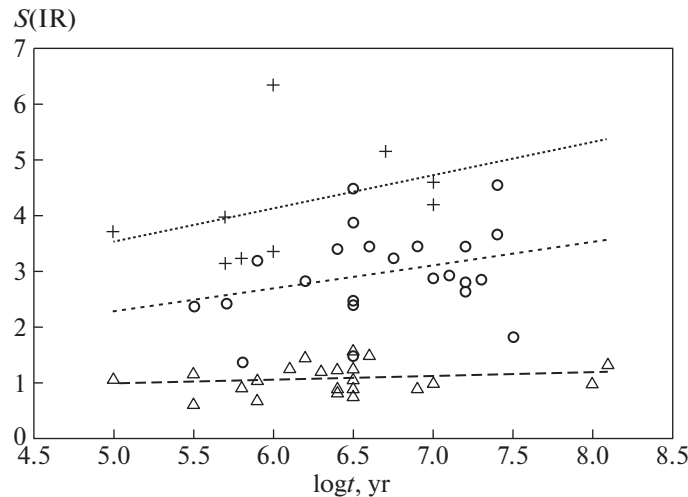


Рис. 7. Зависимость параметра $S(\text{IR})$ от возраста $\log t$ для разных типов звезд. Кружками обозначены данные WTTS II и III типа, треугольниками – IIId типа, крестиками – CTTS. Ряды аппроксимированы штриховыми (WTTS) и точечными (CTTS) линиями.

Нами выявлено 2 типа кривых РЭС программных звезд. К III типу по классификации Лада [46] мы отнесли кривые, у которых ИК избыточное излучение наблюдается только в диапазоне λ 12–100 мкм. Ко II типу отнесены те кривые, у которых, помимо избыточного излучения в дальней ИК части спектра, ИК избыток наблюдается также и в диапазоне $3.0 \text{ мкм} < \lambda < 12 \text{ мкм}$. Звезды CTTS показали II тип кривых РЭС, а среди WTTS кривые 30 звезд отнесены к III, 15 – ко II типу.

Из WTTS со спектральным типом III нами впервые выделена отдельная подгруппа звезд со спектром типа III d. Эта подгруппа WTTS показывает слабое избыточное ИК излучение в диапазоне $\lambda > 60 \text{ мкм}$. У таких звезд, в отличие от обычных WTTS, не обнаруживается зависимости ИК избытка от возраста. Величина интегрального ИК избытка у таких звезд не превышает $S(\text{IR}) \leq 1.5$. Протопланетные диски таких звезд, по-видимому, распались на фрагменты и находятся на конечной стадии процесса образования планет.

Показано, что из 15 WTTS со спектрами II типа по крайней мере две звезды достоверно являются аккреторами. Это согласуется с результатами [20], в котором сообщалось обнаружение подобных объектов среди WTTS. Наши данные показали, что у большинства звезд со спектрами типа III d наблюдается избыточное УФ излучение (табл. 2). Значение параметра N_{α} 10% у таких звезд указывает на отсутствие дисковой аккреции (см. п. 3.3). Следовательно, наблюдаемые УФ избытки и эмиссия в линии H_{α} являются следствием хромосферной активности у таких звезд (см., например, [55, 58]).

Звезды с кривыми РЭС III типа не показывают спектра излучения оптически толстого газа в околозвездном диске (см., например, [57]). Количество газа в таких дисках значительно меньше. Количество таких звезд составляет около 67% от всей выборки. Расположение WTTS на диаграмме ГР показало, что их возраст находится в широком диапазоне, от 10^5 до 10^8 лет. Часть из WTTS имеют такие же возрасты, что и CTTS. Это говорит о том, что у отдельных представителей WTTS эволюция околозвездного вещества прошла значительно быстрее. По нашим данным, избыточное ИК излучение как у CTTS, так и у WTTS показывает тенденцию увеличения с возрастом, а у подгруппы с типом III d определенной зависимости от возраста не наблюдается. Это подтверждает вывод, что у звезд типа III d ресурсы газа в диске уже исчерпаны, как и у звезд α Лун и β Пис.

По нашим данным, прослеживается эволюционный переход – с возрастом, в результате диссипации вещества в диске и формирования планет, запасы газа в околозвездном диске значительно уменьшаются, и звезды II группы переходят в группу III и далее в III d. Однако из ГР диаграммы видно, что есть также исключения из этой тенденции, т.е. некоторые звезды даже в раннем возрасте относятся к группе III. Возможно, существуют какие-то механизмы, которые ускоряют или замедляют эволюцию таких звезд – одни относительно быстро теряют газовую составляющую околозвездного диска, другие относительно медленно. Для выяснения этого вопроса нужно выполнить отдельные исследования.

В конце перечислим главные выводы, полученные в этой работе:

1. Все звезды нашей выборки, состоящей из 45 WTTS и 9 CTTS, показывают избыточное излучение в дальнем ИК диапазоне. Только 15 из WTTS обладают избыточным УФ излучением. Показано, что среди 15 WTTS с УФ избытком достоверно не выявляются аккреторы.

2. Из 45 WTTS только 3 объекта, а из 9 CTTS, 8 объектов обладают дополнительным излучением в полосе 2.2 мкм. Из этих 3 WTTS, по крайней мере, два являются аккреторами. Всего обнаружено 15 WTTS, которые обладают избыточным ИК излучением в диапазоне 3–12 мкм. Не все из этих звезд одновременно показывают признаки УФ избытков.

3. Построенные кривые РЭС у WTTS показывают два типа спектра по классификации [46]. Звезды со спектрами III типа показывают отсутствие избыточного излучения в ближнем ИК диапазоне, а звезды II типа показывают избыток как в ближнем, так и в дальнем ИК диапазоне. Из 45 WTTS, 30 принадлежит к III, 15 – к II типу звезд. Кривые РЭС звезд II типа практически не отличаются от РЭС CTTS.

4. Примерно 67% WTTS не показали избыточного излучения в ближнем ИК диапазоне. Несмотря на это, у некоторых таких объектов наблюдаются спектры с УФ избытками излучения. Отсутствие корреляции между светимостью линии H_{α} и избыточным УФ излучением свидетельствует о том, что по крайней мере часть из этих звезд обладают дисковой аккрецией.

5. Из 30 WTTS у 22 звезд обнаруживается слабый избыток в дальнем ИК диапазоне. Эти звезды имеют остаточные диски на конечной стадии образования планет. Большинство этих звезд показывают признаки хромосферной активности. Эта группа звезд нами обозначена как тип III_d.

6. Положение программных звезд на ГР диаграмме показало, что нет четкой границы разделения разных типов WTTS и CTTS. Большинство звезд обладают возрастными в несколько млн. лет и массами в интервале от 0.15 до 2.5 M_{\odot} .

В результате действия в диске различных механизмов диссипации газа и формирования планет запасы газа в околосреднем диске значительно уменьшаются, и звезды со спектрами II типа переходят в III, и далее в III_d тип. При этом в протопланетных дисках наблюдаются остаточные части диска. В таких звездах может наблюдаться хромосферная активность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимного рецензента за подробный и конструктивный отзыв, который позволил нам улучшить ясность статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. Bouvier, S. H. P. Alencar, T. J. Harries, C. M. Johns-Krull, and M. M. Romanova, Protostars and Planets V* (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 479, 2007).
2. *I. Appenzeller and R. Mundt, Astron. and Astrophys. Rev.* **1**, 291 (1989).
3. *P. P. Petrov, Acta Astrophysica Taurica* **2** **1**, 1 (2021).
4. *A. Natta, L. Testi, J. Muzerolle, et al., Astron. and Astrophys.* **424**, 603 (2004).
5. *R. Jayawardhana, S. Mohanty, and G. Basri, Astrophys. J.* **592**, 282 (2003).
6. *R. J. White and G. Basri, Astrophys. J.* **582**, 1109 (2003).
7. *D. L. Padgett, L. Cieza, K. R. Stapelfeldt, et al., Astrophys. J.* **645**, 128 (2006).
8. *Z. Wahhaj, L. Cieza, D. W. Koerner, et al., Astrophys. J.* **724**, 835 (2010).
9. *L. A. Cieza, D. Ruíz-Rodríguez, A. Hales, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 698 (2019).
10. *S. E. van Terwisga, A. Hacar, and E. F. van Dishoeck, Astron. and Astrophys.* **628**, 85 (2019).
11. *S. L. Grant, C. C. Espaillat, J. Wendeborn, et al., Astrophys. J.*, **913**, 123 (2021).
12. *E. E. Mamajek and L. A. Hillenbrand, Astrophys. J.* **691**, 1265 (2009).
13. *A. Ribas, B. Merin, H. Bouy, and L. T. Maud, Astron. and Astrophys.* **561**, 54 (2014).
14. *L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet, Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **54**, 135 (2016).
15. *Y. Hasegawa, J. T. Haworth, K. Hoadley, et al., Astrophys. J.* **926**, 23 (2022).
16. *L. Testi, T. Birnstiel, L. Ricci, et al., Protostars Planets VI*, 339 (2014).
17. *A. Morbidelli and S. N. Raymond, Journal of Geophys. Res. (Planets)* **121**, 1962 (2016).
18. *A. J. Winter, C. J. Clarke, G. Rosotti, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **478**, 2700 (2018).
19. *A. Gras-Valazquez and T. P. Ray, Astron. and Astrophys.* **443**, 541 (2005).
20. *L. A. Cieza, J. Olofsson, P. M. Harvey, et al., Astrophys. J.* **762**, 100 (2013).
21. *G. Duchene, A. Becker, Y. Yang, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **469**, 1783 (2017).
22. *K. Wood, C. J. Lada, J. E. Bjorkman, et al., Astrophys. J.*, **567**, 1183 (2002).
23. *S. J. Kenyon and L. Hartmann, Astrophys. J.*, **323**, 714 (1987).
24. *G. H. Herbig and K. R. Bell, Lick Observ. Bull.* **1111** (1988).
25. *R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, van S. Dyk, et al., 2MASS All Sky Catalog of point sources* (2003).
26. *N. Epchtein, E. Deul, S. Derriere, et al., Astron. and Astrophys.* **349**, 236 (1999).
27. *R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, et al., yCat* **2328**, 0C (2014).
28. *M. Moshir et al. IRAS F C, 0M* (1990).
29. *M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**, 9 (2013).
30. *D. Lin, N. A. Webb, and D. Barret, Astrophys. J.* **756**, 27 (2012).

31. *L. A. Hillenbrand, S. E. Strom, N. Calvet, et al.*, *Astron. J.* **116**, 1816 (1998).
32. *K. M. Strom, S. E. Strom, S. Edwards, et al.*, *Astron. J.* **97**, 1451 (1989).
33. *K. N. Grankin, S. Yu. Melnikov, J. Bouvier, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **461**, 183 (2007).
34. *W. Herbst and V. S. Shevchenko*, *Astron. J.* **118**, 1043 (1999).
35. *S. J. Kenyon and L. Hartmann*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **101**, 117 (1995).
36. *G. H. Rieke and M. J. Lebofsky*, *Astrophys. J.* **288**, 618 (1985).
37. *F. Castelli and R. I. Kurucz*, ATLAS9, URL: https://www.user.oats.inaf.it/castelli/grids/*, (2004).
38. *H. Campins, G. H. Rieke, and M. J. Lebofsky*, *Astron. J.* **90**, 896 (1985).
39. *L. Decin, B. Vandenbussche, K. Waelkens, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **400**, 695 (2003).
40. *T. Kinman and F. Castelli*, *Astron. and Astrophys.* **391**, 1039 (2002).
41. *N. Z. Ismailov, A. F. Kholtygin, I. I. Romanyuk, and M. A. Pogodin*, *Azerb. Astron. J.* **16**, 5 (2021).
42. *N. Z. Ismailov, A. F. Kholtygin, I. I. Romanyuk, M. A. Pogodin, and A. V. Moiseeva*, *Astrophysical Bulletin* **76**, 415 (2021).
43. *H. H. Aumann, F. C. Gillett, C. A. Beichman, et al.*, *Astrophys. J.* **278**, 23 (1984).
44. *H. H. Aumann*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **97**, 885 (1985).
45. *L. A. Hillenbrand, S. E. Strom, F. J. Vrba, and J. Keene*, *Astrophys. J.* **397**, 613 (1992).
46. *C. J. Lada*, *IAU Symposium* **115**, 1 (1987).
47. *N. J. Evans II, M. M. Dunham, J. K. Jørgensen, et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **181**, 321 (2009).
48. *T. A. Stuber and S. Wolf*, *Astron. and Astrophys.* **658**, 121 (2022).
49. *S. M. Andrews, J. Huang, L. M. Pérez, et al.*, *Astrophys. J.* **869**, L41 (2018).
50. *H. Avenhaus, S. P. Quanz, A. Garufi, et al.*, *Astrophys. J.* **863**, 44 (2018).
51. *L. Siess, E. Dufour, M. Forestini*, *Astron. and Astrophys.* **358**, 593 (2000).
52. *L. Ingleby, N. Calvet, J. Hern, et al.*, *Astron. J.* **141**, 127 (2011).
53. *A. Frasca, K. Biazzo, and J. M. Alcalá*, *Astron. and Astrophys.* **602**, 33F (2017).
54. *R. J. Harris, S. M. Andrews, and D. J. Wilner*, *Astrophys. J.* **751**, 115 (2012).
55. *J. H. M. M. Schmitt, P. Ioannidis, J. Robrade, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **652**, 135 (2021).
56. *M. Corcoran and T. P. Ray*, *Astron. and Astrophys.* **331**, 147 (1998).
57. *C. F. Manara, A. Natta, G. P. Rosotti, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **639**, 58 (2020).
58. *A. Dodin, S. Lamzin, P. Petrov, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **497**, 4322 (2020).