

УДИВИТЕЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ IC 4997 = QV Sge

© 2020 г. В. П. Архипова¹, М. А. Бурлак^{1*}, Н. П. Иконникова¹,
Г. В. Комиссарова¹, В. Ф. Есипов¹, В. И. Шенаврин¹

¹Государственный Астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.

После доработки 13.01.2020 г.; принята к публикации 28.01.2020 г.

Представлены результаты нового этапа (2009–2019 гг.) полувековой истории фотометрических наблюдений переменной планетарной туманности IC 4997 (QV Sge). Интегральные (звезда + туманность) UBV -наблюдения показали дальнейший рост блеска в полосе V на 0^m15 , небольшое повышение ($<0^m1$) в полосе B и постоянство в полосе U . С 2000 по 2019 г. показатель цвета $B-V$ покраснел от 0^m4 до 0^m7 , а $U-B$ существенно не изменился. В 2019 г. нами получены новые наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне в полосах $JHKL$. При сравнении их с наблюдениями в 1999–2006 гг. обнаружены падение блеска в полосе L в среднем на 0^m4 и поглубине показателя цвета $K-L$ на 0^m2 . Показано, что долговременные вариации блеска туманности в оптическом и инфракрасном диапазонах обусловлены, в основном, изменением вклада переменных эмиссионных линий в фотометрические полосы. Наши спектральные наблюдения с низким разрешением, продолженные в 2010–2019 гг., показали дальнейшее систематическое уменьшение отношения интенсивностей линий [OIII] $\lambda4363$ и $H\gamma$: за 30 лет оно уменьшилось почти в 3 раза, достигнув уровня, наблюдавшегося в 1960–1970 гг. Мы обнаружили, что абсолютные интенсивности небулярных линий [OIII] $\lambda4959$ и $\lambda5007$ увеличились к 2019 г. по сравнению с 1990 г. более, чем в 2 раза, тогда как авроральная линия [OIII] $\lambda4363$ ослабела в 2 раза после своего максимума, наблюдавшегося в 2000 г. Показано, что изменения абсолютной интенсивности линии $H\beta$ за период 1960–2019 гг. качественно совпадали с вариациями потока в небулярной линии [OIII] $\lambda4959$ (и $\lambda5007$), но имели меньшую амплитуду. По линиям [SII] и [SIII] были получены оценки электронной концентрации для внешней оболочки туманности. На основании данных об абсолютных интенсивностях линий $H\beta$, [OIII] $\lambda4363$, $\lambda4959$ и их отношений предложен возможный сценарий изменения параметров газовой оболочки (N_e , T_e) IC 4997 в 1970–2019 гг. Мы считаем, что основные особенности спектральной переменности IC 4997 можно объяснить вариацией электронной температуры планетарной туманности, которая вызвана не столько изменением ионизирующего потока от центральной звезды, сколько переменным звездным ветром и процессами, связанными с ним. Таким образом, фотометрические и спектральные изменения у IC 4997 за период 1960–2019 гг. являются наблюдательным следствием отдельного эпизода усиленной потери массы нестационарным ядром туманности.

Ключевые слова: планетарные туманности, фотометрическая и спектральная переменность, IC 4997, QV Sge, диагностика газовой оболочки, электронная плотность, электронная температура.

DOI: 10.31857/S0320010820020011

ВВЕДЕНИЕ

Среди молодых планетарных туманностей (ПТ) IC 4997 заслуживает особого внимания как первый в истории их исследования переменный источник излучения. Лиллер и Аллер (1957) сообщили о заметном изменении отношения интенсивностей эмиссионных линий $\lambda4363$ [OIII] и $H\gamma$, сравнив

свои спектральные наблюдения 1956 г. с наблюдениями, выполненными в 1938 г. Мензелом и др. (1941). Воронцов-Вельяминов (1960) подтвердил факт переменности указанной величины по наблюдениям в Крыму в 1959–1960 гг.

Большой интерес к IC 4997 был проявлен в 60–70-е годы прошлого века: были проведены спектрофотометрические наблюдения О’Делла (1963), Аллера и Калера (1964), Аллера и Лиллера (1966); в конце 70-х — наблюдения Ферланда (1979),

*Электронный адрес: marina.burlak@gmail.com

Фейбельмана и др. (1979), Пургатхофера, Столла (1981). Но наиболее полно оптический спектр IC 4997 был представлен в работах Хьюнга и др. (1994), Хьюнга и Аллера (1993), где по наблюдениям с эшелльным спектрографом в 1990 и 1991 гг. были измерены относительные интенсивности около 500 эмиссионных линий от $\lambda 3647$ до $\lambda 10049$. Там же были отмечены изменения относительных интенсивностей целого ряда других (помимо [OIII] $\lambda 4363$ и $H\gamma$) линий спектра за один год наблюдений с высокой дисперсией.

Большой избыток инфракрасного (ИК) излучения IC 4997 впервые был обнаружен Жиллеттом (1971) в диапазоне 11 мкм. ИК-спектр туманности и ее пылевой оболочки подробно изучался в работах Натта и Панаджиа (1981), Потташа и др. (1984), Ленцуни и др. (1989). Таранова и Шенаврин (2007) по ИК-фотометрии 1999–2006 гг. обнаружили переменность излучения IC 4997 в полосе H в пределах $0^m:20-0^m:25$ и $0^m:05$ в полосе J .

Радионаблюдения IC 4997 Миранды и др. (1996), Миранды и Торреллеса (1998) позволили построить карту излучения туманности в континууме на волнах 3.6 и 2 см с угловым разрешением лучше $0''.1$. Эти авторы описали новые детали в структуре внешней и внутренней оболочки и подтвердили двухкомпонентную модель туманности, предложенную ранее в работе Хьюнга и др. (1994). Исследуя переменность радиопотока от IC 4997, Миранда и Торреллес (1998) обнаружили быстрые (на временах около 1 года) морфологические изменения во внутренней части туманности в пределах $<0.3''$ от центральной звезды и объяснили их взаимодействием коллимированного звездного ветра ядра с внешней оболочкой туманности. Согласно архивным данным, поток радиоизлучения на частоте 5 ГГц в оптически тонкой части оболочки уменьшился от 100 мЯн в 1989 г. (Акер и др., 1992) до 45 мЯн в 1996 г. (Гомес и др., 2002). Последующие наблюдения (Касассус и др., 2007; Паздерска и др., 2009) показали рост радиопотока от 80 до 108 мЯн на частоте 30 ГГц, однако данных оказалось недостаточно для детального анализа радиоспектра.

Центральная звезда IC 4997, HD 193538 = QV Sge, классифицировалась в ряде работ как звезда со слабыми эмиссионными линиями — *wels*. Крайне сложно разделить наблюдаемый в оптическом диапазоне суммарный спектр на компоненты, принадлежащие туманности и центральной звезде, но в эшелльном спектре эмиссионные линии CIV $\lambda 5801$, 5812 и CIII $\lambda 4650$ выделяются уверенно и приписываются звезде на основании их ширины (Хьюнг и др., 1994; Марколино, де Араужо, 2003). Марколино и др. (2007) отметили, что в спектре SWP 31683 (1987–09–01), взятом из

архива IUE наблюдений, эмиссионная линия CIV $\lambda 1549$ не имеет профиля типа P Cug, однако сравнение с более ранним IUE спектром SWP 08578 (1980–03–27) показывает изменения: в последнем уровень континуума выше, а линия NV $\lambda 1238$, возможно, имеет P Cug профиль. Авторы считают, что профили типа P Cug принадлежат звезде и ее нестационарному ветру, а не планетарной туманности. Этот факт может указывать на переменность излучения ядра IC 4997, в частности, связанную с проявлениями неустойчивого во времени и по мощности звездного ветра.

В морфологическом атласе ПТ Сахаи и др. (2011) по снимку с телескопом Хаббла IC 4997 классифицирована как биполярная ПТ. Яркая часть туманности состоит из двух пар лепестков, оси симметрии которых перпендикулярны друг другу, и простирается до $<2''$ от ядра.

В 1968 г. на Крымской астрономической станции (КАС) ГАИШ МГУ по инициативе Е.Б. Костяковой начались регулярные фотометрические *UBV* и спектральные наблюдения IC 4997. Угловой диаметр видимой в оптике туманности составляет около $2''$. И фотометрические, и спектральные наблюдения, выполненные в рамках данной программы, включают туманность вместе с ее центральной звездой HD 193538. Результаты спектрального и фотометрического мониторинга в разные годы были опубликованы в ряде статей: Воронцов-Вельяминов и др. (1970), Костякова (1970), Костякова и др. (1973), Архипова и др. (1994), Костякова (1990, 1999), Костякова и Архипова (2009), Бурлак и Есипов (2010). Наблюдения IC 4997 на телескопах КАС продолжаются, и в настоящей статье анализируются результаты, полученные в 2009–2019 гг., в совокупности с более ранними данными.

НАБЛЮДЕНИЯ

UBV-фотометрия

Хотя в литературе имеется довольно много отдельных оценок интегрального оптического блеска IC 4997, их сравнение между собой нецелесообразно из-за сильного эмиссионного спектра объекта и небольших различий “стандартных” фотометрических систем, дающих весьма заметный разброс данных. Мы же провели долговременный фотометрический мониторинг на одном телескопе с неизменной аппаратурой.

Наши *UBV*-наблюдения IC 4997 проводятся с помощью автоматизированного фотометра со счетом фотонов конструкции В.М. Лютого (1971) в касегреновском фокусе телескопа Цейсс-600 КАС ГАИШ МГУ, начиная с 1971 г. Результаты наблюдений, полученных ранее, в основном

Таблица 1. *UBV*-фотометрия IC4997 в 2009–2019 гг.

JD	<i>V</i>	<i>B</i>	<i>U</i>	JD	<i>V</i>	<i>B</i>	<i>U</i>	JD	<i>V</i>	<i>B</i>	<i>U</i>
2455031	10.552	11.200	10.770	2456123	10.511	11.187	10.779	2457959	10.481	11.166	10.781
2455038	10.549	11.213	10.768	2456130	10.483	11.191	10.776	2457967	10.440	11.199	10.751
2455042	10.578	11.204	10.786	2456153	10.561	11.198	10.783	2457969	10.386	11.190	10.750
2455057	10.575	11.197	10.810	2456155	10.563	11.198	10.774	2457979	10.416	11.124	10.766
2455061	10.579	11.210	10.761	2456161	10.534	11.200	10.757	2457986	10.448	11.131	10.775
2455068	10.561	11.214	10.771	2456448	10.520	11.188	10.760	2457994	10.461	11.126	10.766
2455086	10.572	11.183	10.716	2456457	10.514	11.188	10.789	2458013	10.454	11.182	10.763
2455092	10.582	11.186	10.763	2456464	10.505	11.189	10.779	2458046	10.564	11.192	10.761
2455095	10.604	11.212	10.775	2456483	10.522	11.190	10.772	2458282	10.449	11.187	10.754
2455331	10.601	11.214	10.719	2456504	10.518	11.188	10.764	2458306	10.499	11.193	10.786
2455362	10.543	11.204	10.784	2456514	10.495	11.183	10.775	2458347	10.418	11.182	10.770
2455363	10.529	11.192	10.772	2456518	10.503	11.188	10.797	2458364	10.471	11.121	10.773
2455399	10.528	11.207	10.830	2456575	10.552	11.202	10.778	2458435	10.474	11.220	10.760
2455410	10.495	11.200	10.744	2456605	10.553	11.199	10.780	2458613	10.490	11.191	10.773
2455413	10.489	11.202	10.769	2456607	10.540	11.200	10.765	2458636	10.425	11.141	10.789
2455422	10.519	11.205	10.787	2456839	10.486	11.131	10.765	2458638	10.434	11.119	10.785
2455662	10.543	11.204	10.784	2456868	10.477	11.132	10.765	2458647	10.445	11.123	10.756
2455663	10.529	11.192	10.772	2456875	10.468	11.108	10.744	2458658	10.437	11.120	10.781
2455737	10.544	11.194	10.772	2456885	10.442	11.147	10.715	2458661	10.449	11.130	10.776
2455743	10.565	11.200	10.784	2456893	10.506	11.123	10.775	2458677	10.443	11.132	10.758
2455750	10.569	11.192	10.766	2456944	10.547	11.170	10.746	2458691	10.440	11.111	10.743
2455754	10.531	11.190	10.792	2457213	10.484	11.130	10.827	2458701	10.468	11.118	10.778
2455766	10.535	11.209	10.765	2457216	10.478	11.138	10.778	2458704	10.441	11.124	10.768
2455774	10.529	11.206	10.767	2457220	10.497	11.136	10.778	2458719	10.388	11.103	10.794
2455779	10.554	11.204	10.767	2457253	10.501	11.183	10.810	2458720	10.415	11.119	10.727
2455780	10.650	11.248	10.811	2457270	10.447	11.169	10.767	2458721	10.399	11.112	10.743
2455782	10.542	11.188	10.771	2457550	10.487	11.200	10.774	2458725	10.446	11.126	10.804
2455794	10.552	11.205	10.777	2457578	10.506	11.128	10.768	2458733	10.472	11.101	10.761
2455861	10.570	11.211	10.750	2457583	10.457	11.142	10.784	2458752	10.477	11.119	10.774
2455866	10.598	11.215	10.782	2457640	10.442	11.210	10.694	2458760	10.485	11.107	10.797
2456101	10.515	11.196	10.767	2457935	10.442	11.196	10.742	2458778	10.472	11.127	10.795
2456121	10.484	11.184	10.791	2457950	10.478	11.195	10.749	2458789	10.492	11.129	10.787
2456122	10.531	11.186	10.780	2457958	10.487	11.189	10.740				

Таблица 2. Среднегодовые значения UBV -блеска IC 4997 в 2009–2019 гг.

Годы	V	σ_V	B	σ_B	U	σ_U	N
2008.6	10.572	0.017	11.202	0.012	10.769	0.012	10
2009.5	10.529	0.037	11.204	0.007	10.772	0.035	7
2011.6	10.523	0.031	11.192	0.006	10.776	0.010	8
2010.6	10.558	0.035	11.204	0.015	10.776	0.015	14
2012.6	10.523	0.020	11.191	0.006	10.776	0.011	10
2013.6	10.488	0.033	11.135	0.021	10.754	0.020	7
2014.6	10.481	0.021	11.151	0.023	10.792	0.025	5
2015.6	10.473	0.029	11.170	0.041	10.755	0.041	4
2016.6	10.460	0.045	11.172	0.030	10.759	0.013	11
2017.6	10.462	0.030	11.180	0.037	10.769	0.012	5
2018.6	10.447	0.033	11.127	0.021	10.774	0.021	19

Е.Б.Костяковой, были представлены в работах Костяковой и др. (1973), Костяковой (1991), Архиповой и др., (1994), Костяковой и Архиповой (2009). В настоящей работе приводятся новые UBV наблюдения за 2009–2019 гг. В качестве звезды сравнения, как и прежде, использовалась звезда HD 355464, звездные величины которой ($V = 9^m.98$, $B = 10^m.08$, $U = 10^m.10$) получены привязкой к фотометрическим стандартам – членам звездных скоплений NGC 6633 и NGC 7063 (Хилтнер и др., 1958). Средняя точность фотометрических оценок составляет $\sigma_V = 0^m.009$, $\sigma_B = 0^m.009$, $\sigma_U = 0^m.012$. Наблюдения проводились с диафрагмой $27''$ (иногда $13''$), при этом измерялся блеск всего объекта в целом — ПТ и центральной звезды.

Здесь мы приводим наблюдения в нашей инструментальной системе, очень близкой к стандартной фотометрической системе Джонсона. Методика обработки, кроме стандартных процедур, включает приведение наблюдений к одной температуре под куполом телескопа ($t = +10^\circ \text{C}$) и введение поправки из-за незначительного изменения инструментальной системы в 1989 г. вследствие замены фотоумножителя.

Зависимость звездных величин в полосах V и B от температуры представляется уравнениями

$$\Delta V = 0.121 - 0.013t + 1.624 \times 10^{-4}t^2, \quad (1)$$

$$\Delta B = -0.011 - 0.001t,$$

где t — температура воздуха под куполом телескопа.

Для приведения оценок блеска к системе старого ФЭУ вводились следующие поправки: $\Delta V = 0^m.109$, $\Delta B = -0^m.084$, $\Delta U = -0^m.040$.

В табл. 1 приводятся результаты UBV -фотометрии IC 4997 в 2009–2019 гг. Для исследования вековой переменности IC 4997 мы получили среднегодовые значения UBV -блеска и приводим их в табл. 2 вместе со среднеквадратичными отклонениями и количеством ночей за год (N).

ИК-фотометрия

ИК-фотометрия IC 4997 проводилась в 1999–2006 гг. и возобновилась в 2019 г. на 1.25-м телескопе КАС ГАИШ МГУ при помощи фотометра с фотовольтаическим приемником из антимонида индия (InSb), охлаждаемого жидким азотом. Фотометр установлен в касегреновском фокусе телескопа. Диаметр входной диафрагмы $\approx 12''$, а

Таблица 3. Результаты $JHKL$ -фотометрии IC 4997 в 2019 г.

JD	J	σ_J	H	σ_H	K	σ_K	L	σ_L
2458631.5	10.52	0.03	10.67	0.05	9.94	0.03	—	—
2458634.5	10.42	0.04	10.60	0.04	9.91	0.03	8.72	0.09
2458631.5	10.52	0.03	10.67	0.05	9.94	0.03	—	—
2458655.5	10.51	0.02	—	—	9.92	0.03	8.70	—
2458659.5	10.44	0.04	10.65	0.07	9.92	0.03	8.70	0.08
2458682.5	10.53	0.03	10.69	0.05	9.99	0.04	8.54	0.12
2458686.5	10.52	0.03	10.71	0.04	9.93	0.03	8.52	0.11
2458704.5	10.55	0.04	10.52	0.06	9.93	0.05	8.48	0.18
2458734.3	10.54	0.03	10.52	0.03	9.94	0.03	8.56	0.08
2458776.2	10.47	0.03	10.64	0.03	9.95	0.02	8.61	0.10

пространственное разделение пучков при модуляции составляло $\approx 30''$ в направлении восток-запад. Фотометрическим стандартом служила звезда BS 7635 из каталога Джонсона и др. (1966). Результаты ИК-фотометрии IC 4997 в 1999–2006 гг. были представлены в работе Тарановой и Шенаврина (2007). В табл. 3 приводятся результаты новых наблюдений в полосах $JHKL$ за 2019 г.

Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения IC 4997 в оптическом диапазоне проводились на 1.25-м телескопе КАС ГАИШ МГУ в 2010–2019 гг. Использовался спектрограф низкого разрешения с дифракционной решеткой 600 шт/мм и ПЗС-матрицей ST-402 размером 765×510 пикселей. Ширина щели была постоянной и составляла $4''$. Спектральное разрешение в среднем оценивается в 7.4 \AA (FWHM). В августе и октябре 2019 г. спектры были получены в новой конфигурации спектрографа с другими объективом камеры и ПЗС-матрицей FLI PL-4022 размером 2048×2048 пикселей, работавшей в режиме биннинга 2×2 . В новой конфигурации спектральное разрешение оставалось примерно таким же. Для калибровки потоков проводились также наблюдения звезд-стандартов с известными распределениями энергии: 107 Her, 18 Vul, 29 Vul, HD 196775, 40 Cyg, ρ Aql (Глушнева и др., 1998; Пиклс, 1998). Калибровочные звезды наблюдались до и/или после IC 4997 на близких воздушных массах. Журнал наблюдений представлен в табл. 4.

Конструкция спектрографа такова, что одновременно можно получить участок спектра длиной около 1500 \AA в старой и около 2400 \AA в новой конфигурации. Для покрытия всей доступной области спектра ($\sim 4000\text{--}9500 \text{ \AA}$) требуется четыре либо три диапазона. Обычно разность воздушных масс между IC 4997 и звездой стандартом не превышала 0.2. В условиях стабильной атмосферы точность абсолютной калибровки составляла $\sim 5\%$, о чем свидетельствовало удовлетворительное совпадение краевых участков диапазонов. При нестабильном состоянии атмосферы точность калибровки была хуже (до 20%).

Интенсивности эмиссионных линий измерялись как площадь под спектральным профилем. В табл. 5 представлены наблюдаемые относительные интенсивности линий в шкале $I(H\beta) = 100$, а также наблюдаемый поток в линии $F(H\beta)$ в абсолютных единицах. Для линий, интенсивность которых составляет больше 1% от интенсивности $H\beta$, ошибка равна примерно 10%, и около 25% для более слабых. Точность измерения потока в линии $H\beta$ в среднем оценивается как 10%.

Для исследования физических условий в туманности необходимо было исправить относительные интенсивности за межзвездное поглощение света. В работе Бурлак, Есипов (2010) была подробно рассмотрена история определения избытка цвета для IC 4997, и по спектральным наблюдениям 2003–2009 гг. получена оценка $c(H\beta) = 0.35$ с учетом эффекта самопоглощения в водородных

Таблица 4. Журнал спектральных наблюдений IC 4997

Дата	JD	Диапазон, Å	Стандарт
04.08.2010	2455413	4000–7200	18 Vul
31.07.2011	2455774	4000–7400	HD 196775
26.08.2011	2455800	4000–9100	40 Cyg
21.07.2012	2456130	4000–7400	18 Vul
23.08.2012	2456163	4200–7400	ρ Aql
09.07.2013	2456483	4000–7200	29 Vul
08.08.2015	2457243	4000–7700	107 Her
06.08.2016	2457607	4000–6700	ρ Aql
09.08.2016	2457610	4000–7700	ρ Aql
21.07.2017	2457956	4000–9700	ρ Aql
19.10.2017	2458046	4000–9700	ρ Aql
08.08.2018	2458339	4000–7000	29 Vul
13.10.2018	2458405	4000–9400	29 Vul
07.07.2019	2458672	4000–9400	29 Vul, 30 Vul
07.08.2019	2458703	4000–9250	29 Vul, HD 196775, η Sge
03.10.2019	2458760	4000–9250	HD 196775, η Sge

линиях. Наши новые спектральные данные удовлетворительно согласуются с этим значением $c(H\beta)$. Отметим, что в 2010–2019 гг. бальмеровский декремент также указывал на наличие самопоглощения, хотя к 2019 г. этот эффект уменьшился.

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Переменность интегрального блеска IC 4997 характеризуется малоамплитудными (менее 0^m2) вариациями внутри сезона и долговременным трендом в течение последних 50 лет. Изменение среднегодового блеска IC 4997 в фильтрах UBV и показателей цвета $U-B$ и $B-V$ с 1968 по 2019 г. по результатам работ Костяковой и др. (1973), Костяковой (1991, 1999), Архиповой и др. (1994), Костяковой и Архиповой (2009), неопубликованным

наблюдениям Е.Б. Костяковой и новым данным показано на рис. 1.

Амплитуда изменения среднегодового блеска V составила около 0^m6 , в полосе B — 0^m4 , в полосе U — около 0^m3 . Важно отметить, что за полвека наших наблюдений интегральный блеск объекта в U и B полосах плавно описал асимметричную кривую и вернулся в исходное состояние, тогда как в V полосе после 2010 г. блеск продолжал повышаться, и в настоящее время звезда ярче на 0^m2 , чем в начале наших наблюдений. Показатели цвета $B-V$ и $U-B$ изменялись со временем менее плавно и в целом показали поглубение на стадии уменьшенного интегрального блеска, с заметным разбросом значений на этой стадии, что можно было бы приписать переменному эффекту эмиссионных линий.

Таблица 5. Наблюдаемые интенсивности эмиссионных линий в спектре IC 4997 в шкале $I(H\beta) = 100$ и наблюдаемая интенсивность $H\beta$ в единицах 10^{-11} эрг с^{-1} см^{-2}

$\lambda, \text{\AA}$	Ион	04.08.10	31.07.11	26.08.11	21.07.12	23.08.12	09.07.13	08.08.15	06.08.16
4102	H δ	20.1	20.7	20.9	23.8	—	21.6	21.9	21.4
4340	H γ	43.7	43.7	46.6	51.0	46.5	46.4	47.9	42.2
4363	[OIII]	46.3	46.8	41.8	43.5	43.9	41.6	36.8	33.9
4471	HeI	4.01	4.35	4.47	4.81	4.13	4.54	4.45	4.16
4713	HeI	0.94	0.97	0.85	0.97	—	0.97	0.81	0.76
4740	[ArIV]	0.38	0.45	0.41	0.43	—	0.42	0.37	0.34
4959	[OIII]	227	238	238	224	233	237	225	226
5007	[OIII]	690	725	734	680	691	723	678	—
5192	[ArIII]	0.18	0.16	0.20	0.16	—	—	0.11	0.11
5270	[FeIII]	0.27	0.30	0.27	0.32	—	0.28	0.26	0.29
5518	[CIII]+OI	0.18	0.15	0.14	0.15	—	0.17	0.14	0.14
5538	[CIII]	0.28	0.29	0.28	0.31	—	0.33	0.30	0.29
5755	[NII]	1.45	1.65	1.66	1.56	1.64	1.60	1.50	1.48
5876	HeI	20.8	21.3	21.2	20.4	21.5	16.9	19.1	19.4
6300	[OI]	6.82	5.91	6.73	6.35	6.70	6.38	5.88	6.10
6312	[SIII]	3.03	2.93	3.25	3.40	3.13	2.95	3.12	3.09
6364	[OI]	2.29	2.16	2.33	2.27	2.24	2.23	2.19	2.25
6563	H α	376	397	380	366	463	376	425	—
6584	[NII]	24.7	26.2	28.1	25.4	33.3	27.4	30.1	38.8
6678	HeI	5.52	5.75	5.69	5.41	6.56	5.11	5.31	—
6716	[SII]	0.86	0.96	0.92	0.88	1.14	0.77	1.04	—
6731	[SII]	1.85	1.95	1.91	1.85	2.34	1.71	1.89	—
7065	HeI	17.0	19.5	18.5	18.6	20.9	15.8	17.6	—
7136	[ArIII]	12.6	15.1	13.7	14.9	16.7	12.4	14.4	—
7170	[ArIV]	0.61	0.35	0.54	0.34	—	—	0.62	—
7237	[ArIV]	—	0.26	0.32	0.28	—	—	0.44	—
7281	HeI	—	1.63	1.39	1.31	1.18	—	1.70	—
7751	[ArIII]	—	—	3.12	—	—	—	—	—
9069	[SIII]	—	—	21.7	—	—	—	—	—
	$F(H\beta)$	3.14	2.87	3.24	3.05	3.04	3.24	3.25	3.33

Таблица 5. Окончание

λ , Å	Ион	09.08.16	21.07.17	19.10.17	08.08.18	13.10.18	07.07.19	07.08.19	03.10.19
4102	H δ	18.2	19.6	19.7	19.9	17.4	19.3	19.8	19.4
4340	H γ	41.2	45.7	43.1	46.8	42.3	42.8	42	40
4363	[OIII]	30.6	32.2	30.8	32.5	29.0	32.6	35.5	32.7
4471	HeI	3.78	4.01	3.53	4.06	3.16	3.39	4.79	4.51
4712	HeI	0.68	0.83	0.73	0.77	0.77	0.92	1.05	0.9
4740	[ArIV]	0.32	0.36	0.32	0.29	0.30	0.44	0.49	0.46
4959	[OIII]	226	219	225	232	235	230	237	216
5007	[OIII]	–	671	670	–	715	–	726	658
5192	[ArIII]	0.11	0.13	–	0.13	0.10	0.10	0.15	0.09
5270	[FeII]	0.27	0.26	–	0.27	0.26	0.26	0.27	0.31
5518	[CIII]+OI	0.13	0.12	0.14	0.12	0.16	0.18	0.15	0.16
5538	[CIII]	0.28	0.29	0.25	0.30	0.31	0.33	0.35	0.33
5755	[NII]	1.53	1.39	1.37	1.41	1.34	1.34	1.66	1.61
5876	HeI	19.1	18.9	16.6	18.7	18.9	18.1	19.4	19.7
6300	[OI]	6.25	6.43	5.33	5.77	6.01	5.8	7.16	6.94
6312	[SIII]	3.00	2.58	2.63	2.87	2.81	2.48	2.79	2.87
6364	[OI]	2.29	2.23	1.62	2.05	2.16	2.11	2.44	2.48
6563	H α	351	438	321	422	388	368	475	408
6584	[NII]	35.7	38.6	27.5	36.7	36.2	33.7	32.2	28.4
6678	HeI	5.03	5.33	4.12	4.88	5.01	4.92	5.48	5.75
6716	[SII]	1.02	0.85	0.73	0.75	0.84	0.88	0.97	0.97
6731	[SII]	1.77	1.93	1.50	1.79	1.84	1.82	2.08	2.20
7065	HeI	16.2	16.7	13.9	–	15.1	13.9	16.0	18.5
7136	[ArIII]	13.5	13.8	11.1	–	12.2	11.4	13.3	14.8
7170	[ArIV]	–	0.47	0.43	–	0.40	0.47	0.40	0.63
7237	[ArIV]	–	0.35	0.28	–	0.33	0.29	0.40	0.35
7281	HeI	1.10	1.80	1.29	–	1.68	1.43	1.57	1.74
7751	[ArIII]	–	3.63	2.17	–	3.12	2.85	3.46	3.86
9069	[SIII]	–	43.9	36.6	–	26.2	32.3	57.9	46.2
$F(H\beta)$	3.33	3.55	3.64	4.29	3.08	3.19	3.53	2.93	3.16

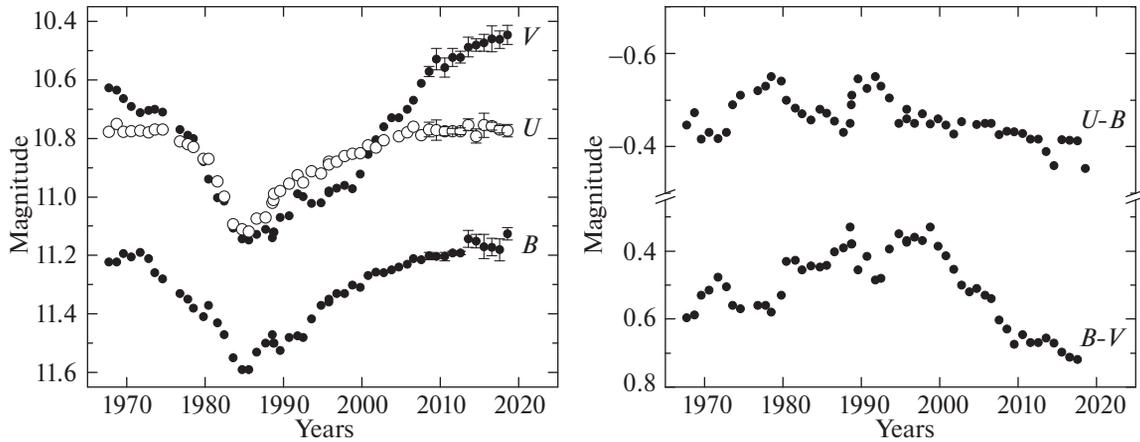


Рис. 1. Среднегодовые кривые блеска и показателей цвета IC 4997 с 1968 по 2019 г.

Для оценки вклада эмиссионных линий в фотометрических полосах системы UBV мы выделили эмиссионный спектр туманности IC 4997 из наших средних UBV для 1990 г. с использованием самых полных и надежных спектральных данных 1990 г. из работы Хьюнга и др. (1994). Учитывались линии, относительная интенсивность которых была не ниже 0.05 в шкале $I(H\beta) = 100$. К сожалению, в этой работе имелись лишь относительные интенсивности линий спектра IC 4997 в августе 1990 г. Для абсолютизации потоков в линиях нами был принят абсолютный поток излучения туманности в линии $H\beta$ в 1990 г., приведенный в работе Костяковой и Архиповой (2009), равный $F(H\beta) = 2.6 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В 1990 г. по результатам 12 ночей наблюдений (май–октябрь) мы получили средние значения блеска и показателей цвета $V = 11^m07$, $B = 11^m52$, $U = 10^m98$, $B-V = +0.45$, $U-B = -0.54$. Для учета вклада линий мы использовали кривые пропускания нашей инструментальной системы UBV .

Отметим, что даты наблюдений для всех источников данных не совпадали между собой, однако средняя дата UBV -наблюдений и абсолютных спектрофотометрических измерений приходится на конец июля 1990 г.

В результате мы получили оценки вклада линий излучения в полосах UBV , а также потоки и звездные величины суммарного континуума объекта в 1990 г.

$$F_V(\text{lines}) = 4.57 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$F_V(\text{cont}) = 8.91 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$V(\text{cont}) = 11^m51;$$

$$F_B(\text{lines}) = 11.06 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$F_B(\text{cont}) = 4.73 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$B(\text{cont}) = 12^m83;$$

$$F_U(\text{lines}) = 2.35 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$F_U(\text{cont}) = 17.11 \times 10^{-11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$U(\text{cont}) = 11^m14.$$

В фотометрических полосах системы UBV эффект эмиссионных линий у переменной ПТ IC 4997 в 1990 г. составлял 30% в V , 70% в B , нижний предел в полосе U — 13% (из-за отсутствия измененных линий за бальмеровским скачком в 1990 г.).

Особо отметим вклад излучения небулярных линий [OIII] $\lambda 5007$ и $\lambda 4959$, а также линии $H\beta$ в полосы B и V . На рис. 2 представлено соотношение между суммарным потоком сильнейших эмиссионных линий — $H\beta$, [OIII] $\lambda 4959$ и $\lambda 5007$ — и блеском в полосах V и B . Рассматриваются среднегодовые значения с 1972 по 2019 г. Прослеживается четкая связь между этими величинами: коэффициенты корреляции суммарного потока $\log(F(H\beta) + F(\lambda 4959) + F(\lambda 5007))$ и блеска в полосах V и B составляют соответственно 0.90 и 0.81. Следовательно, основной причиной переменности в этих фотометрических полосах можно считать изменение со временем линейчатого спектра туманности. Подобный анализ переменности блеска в полосе U затруднен тем, что мы не располагаем данными об изменении спектра туманности в диапазоне длин волн короче $\lambda 3700$.

Показатели цвета суммарного излучения ядра туманности и ее газового континуума оказались равными $B-V = +1^m32$, $U-B < 1^m69$. Принимая $E(B-V) = 0^m24$ для IC 4997, получаем исправленные за поглощение света показатели цвета суммарного непрерывного спектра $(B-V)_0 = +1^m08$, $(U-B)_0 < 1^m89$.

После вычитания вклада эмиссионного спектра положение IC 4997 на двухцветной диаграмме

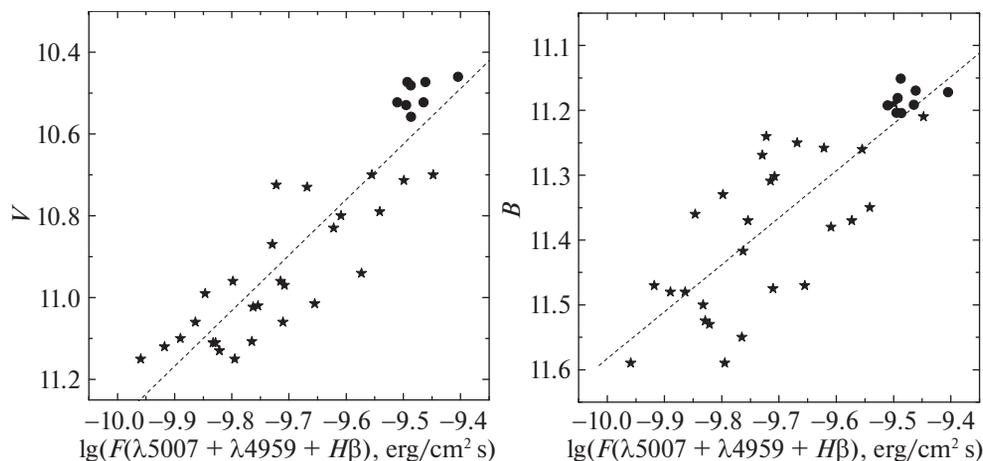


Рис. 2. Сопоставление величины $\lg(F(H\beta) + F(\lambda 4959) + F(\lambda 5007))$ с блеском в полосах V и B за период с 1972 по 2019 г. Звездочки — данные из работы Костяковой и Архиповой (2009), точки — настоящая работа.

$U-B$, $B-V$ оказалось в области значений, характерных для суммарных показателей цвета горячей звезды с температурой выше 35 000 К и газового континуума с заметной оптической толщей. Из-за несовпадения дат фотометрических и спектральных наблюдений и других факторов мы оцениваем неопределенность положения IC 4997 без эмиссионных линий на двухцветной диаграмме в $\sim 0^m3$.

Отметим, что IC 4997 была уверенно классифицирована как биполярная ПТ (Сахаи и др., 2011). В настоящее время многие исследователи считают, что биполярные ПТ, морфология которых напоминает песочные часы (т.е. цилиндр с узкой перемычкой в центре), имеют в качестве ядра тесную двойную звезду. В связи с этим фактом нам было интересно поискать проявления возможной двойственности ядра в суммарном оптическом континууме IC 4997 после вычитания вклада эмиссионных линий из UBV данных. Полученные нами выше показатели цвета $(B-V)_0(\text{cont}) = 1.08$ и $(U-B)_0(\text{cont}) < -1.89$, хотя и обнаруживают некий избыток в показателе $(B-V)_0(\text{cont})$, но из-за низкой точности оценки его нельзя считать достоверным.

Переменность блеска IC 4997 обнаружена и в ближнем ИК-диапазоне. Таранова и Шенаврн (2007) представили наблюдения в полосах JHK_L за период с 1999 по 2006 г. и показали, что амплитуда колебаний JHK_L -блеска туманности составила порядка 0^m2-0^m3 , а показателей цвета $J-H$, $H-K$ и $K-L$ — до $\sim 0^m5$ на шкале времени 260–280 дней. Авторы выдвинули предположение, что обнаруженные ими изменения в полосе H в основном связаны с изменением вклада водородных линий серии Бреккета. В 2019 г. нами были проведены наблюдения на том же телескопе,

с той же аппаратурой. На рис. 3 представлены кривые блеска и показателей цвета в ближнем ИК-диапазоне IC 4997 по данным из работы Тарановой и Шенаврн (2007) и новым наблюдениям 2019 г. На рис. 3 видно, что в 2019 г. в H и K полосах блеск находился на уровне минимальных значений за 1999–2006 гг., а в J полосе в среднем понизился на 0^m25 . Наиболее существенные изменения показал блеск в полосе L : его уровень упал на 0^m4 . Показатели цвета с 1999 г. в среднем практически не изменились и примерно составляют $J-H = -0^m2$, $J-K = 0^m5$, $H-K = 0^m7$. Только показатель цвета $K-L$ уменьшился с 1^m5 до 1^m3 .

Вайтлок (1985) рассмотрела основные источники излучения ПТ в ближнем ИК-диапазоне. Это свободно-свободное и свободно-связанное излучение водорода и гелия и тепловое излучение пыли с $T_d > 1000$ К (если таковая присутствует в туманности). Небольшой вклад дает центральная звезда и заметный — эмиссионные линии, сильнеешие из которых: в J -полосе — линии серии Пашена $P\beta$ и $P\gamma$, He II $\lambda 1.162$ мкм, He I $\lambda 1.083$ мкм; в H -полосе — линии серии Бреккета от $B\gamma$ 10 $\lambda 1.737$ мкм до границы серии на $\lambda 1.459$ мкм; в K -полосе — $B\gamma$ и He I $\lambda 2.058$ мкм.

Вайтлок (1985) предложила классифицировать ПТ в зависимости от основного источника излучения в диапазоне длин волн 1–2 мкм. Согласно этой классификации, IC 4997 относится к типу N (nebula), для которого в ближнем ИК-диапазоне преобладает излучение газовой туманности. Следует также отметить, что IC 4997 — туманность низкого возбуждения, и в ее спектре отсутствует эмиссионная линия He II на 1.162 мкм. Следовательно, переменность блеска IC 4997 в полосах JHK , скорее всего, связана с изменением вклада

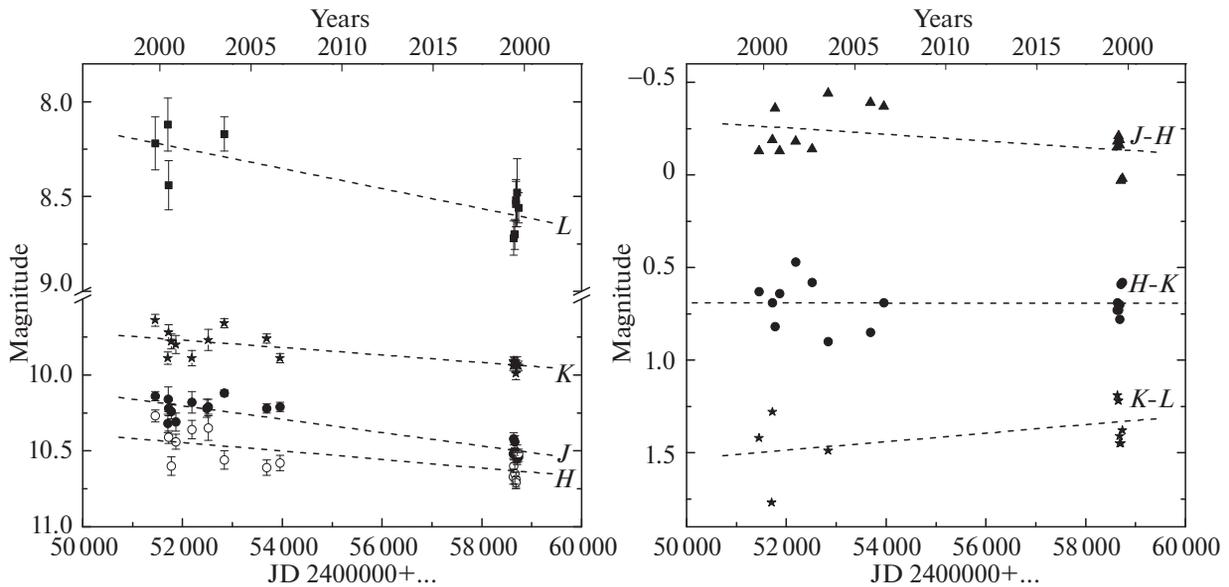


Рис. 3. Изменение блеска и показателей цвета IC 4997 в ближнем ИК-диапазоне с 1999 по 2019 г.

линий водорода и в меньшей степени — линий He I, и можно исключить влияние переменной пылевой составляющей.

В работе Озава и др. (2016) представлены AKARI/IRC спектры 72 ПТ, в том числе IC 4997, в ближнем ИК-диапазоне (2.5–5.0 мкм). Благодаря этой работе, мы имеем представление об основных эмиссионных линиях в спектре IC 4997, попадающих в полосу пропускания фильтра *L*. Отметим, что в этой полосе основные эмиссионные линии относятся к серии Бреккета: $V\alpha$ 4.05 мкм и $V\beta$ 4.26 мкм. Следовательно, можно предполагать, что переменность блеска IC 4997 в полосе *L* вызвана изменением абсолютного потока излучения в этих линиях.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Исторически первым свидетельством спектральной переменности IC 4997 стало изменение отношения интенсивностей авроральной линии [OIII] $\lambda 4363$ к $H\gamma$, которое может быть сравнительно легко и надежно измерено. На рис. 4 показана эволюция отношения $F(\lambda 4363)/F(H\gamma)$ в течение нескольких десятков лет по данным этой работы и более ранним оценкам других авторов, начиная с наблюдений 1938 г.: Аллер (1941), Струве, Свингс (1941), Пейдж (1942), Уайт (1952), Лиллер, Аллер (1963), Аллер, Лиллер (1966), Воронцов-Вельяминов и др., (1965), Аллер, Калер (1964), О’Делл (1963), Ахерн (1978), Фейбельман и др. (1979), Пургатхофер (1978), Пургатхофер, Столл (1981), Акер и др. (1989),

Хьюнг и др. (1994), Костякова, Архипова (2009). Кроме того, мы измерили интенсивности линий в спектре IC 4997, опубликованном в работе Гайдука и др. (2015), а также в спектре, представленном в базе данных HASH PN (Паркер и др., 2016). За все время наблюдений это отношение описало волну с размахом около 0.45 в логарифмическом представлении и характерным временем порядка 50–60 лет. За период 2010–2019 гг. величина $\lambda 4363/H\gamma$ уменьшалась, продолжая тенденцию, начатую около 1990 г., и к 2019 г. вернулась к значению, наблюдавшемуся в 1960–1970 гг.

Помимо вариации отношения $F(\lambda 4363)/F(H\gamma)$, в спектре IC 4997 наблюдаются также изменения интенсивностей небулярных линий [OIII] относительно $H\beta$. Начиная с 60–70-х годов прошлого века, их интенсивность сначала падала примерно до 1985 г., потом росла до 2005 г., и с тех пор остается приблизительно на постоянном уровне, несколько превышающем значение начала 60-х годов. Примечательно, что изменение относительных интенсивностей авроральной и небулярных линий не было одинаковым, что хорошо иллюстрирует рис. 5. Так же есть указание на переменность линий нейтрального гелия, хотя она менее достоверна и может быть прослежена на меньшем интервале времени. На рис. 5 представлена эволюция отношения интенсивности линии HeI $\lambda 5876$ к $H\beta$: в целом ее изменения обратны изменениям небулярных линий (Воронцов-Вельяминов и др., 1965; О’Делл, 1963; Аллер, Уокер, 1970; Ахерн, 1978; Акер и др., 1989; Хьюнг и др., 1994; Гайдук и др., 2015; Паркер и др., 2016). Линия HeI $\lambda 6678$

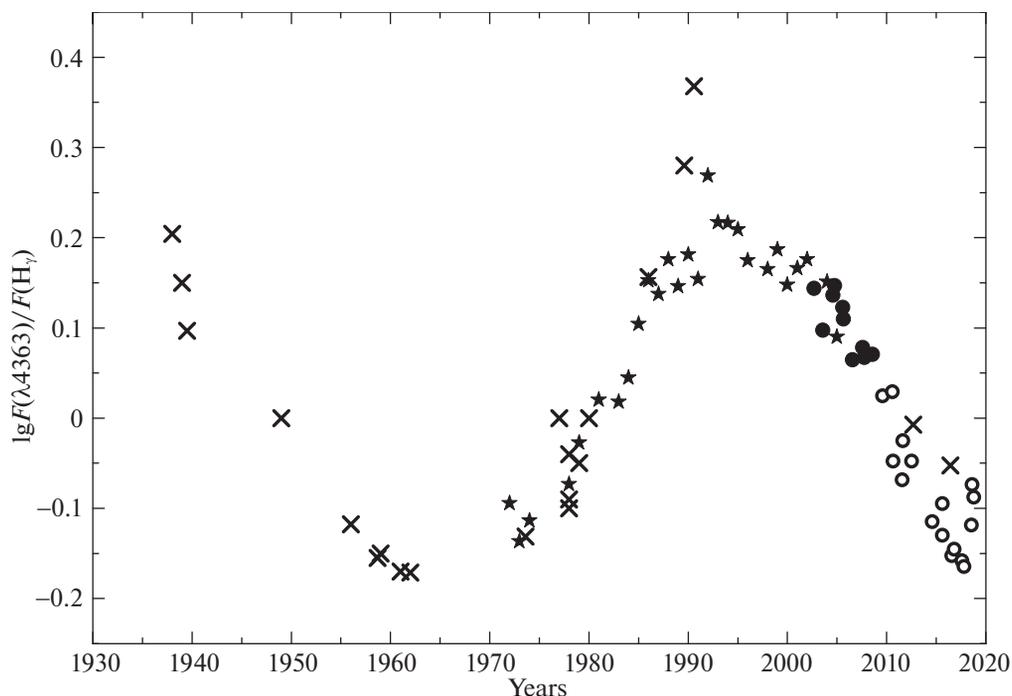


Рис. 4. Изменение со временем наблюдаемого отношения интенсивностей $F(\lambda 4363)/F(H\gamma)$, по данным разных авторов: звездочки — Костякова, Архипова (2009), закрытые кружки — Бурлак, Есипов (2010), открытые кружки — данная работа, крестики — данные других работ, перечисленных в тексте.

ведет себя подобно $\lambda 5876$, по крайней мере, начиная с 1986 г., — нам не удалось найти более ранних оценок $\lambda 6678$.

На рис. 6 представлены наблюдаемые абсолютные интенсивности линий [OIII] $\lambda 4363$, $\lambda 4959$ разных авторов, полученные за последние 60 лет. Для этих линий, несмотря на большую дисперсию оценок, изменения прослеживаются достаточно четко. После 1960 г. абсолютная интенсивность авроральной линии росла с примерно постоянной скоростью, достигла максимума около 2000–2005 гг., увеличившись более, чем в 2 раза, а потом стала уменьшаться, причем слабеет линия быстрее, чем усиливалась. Абсолютные интенсивности небулярных линий после 1960 г. сначала почти не менялись, возможно, с небольшой тенденцией к уменьшению, в середине 1970-х годов резко пошли вниз, достигнув минимума около 1985–1990 гг., затем более медленно выросли до значений, наблюдавшихся около 1960 г., или чуть более высоких, повторив тем самым оптическую кривую блеска IC 4997.

Огромный интерес вызывает вопрос о том, есть ли изменения в абсолютной интенсивности $H\beta$, но, к сожалению, сложность проведения абсолютных спектрофотометрических наблюдений и неоднородность наблюдательного материала, полученного разными исследователями, приводят к большому

разбросу данных, на фоне которого форма и характерные параметры переменности интенсивности $H\beta$ определяются крайне неоднозначно. Однако мы считаем, что можно выделить период более высокой абсолютной интенсивности линии до 1980 г., потом произошло ослабление примерно в полтора раза, затем интенсивность была более или менее постоянной до 2000–2005 гг., после чего она начала расти.

Относительно переменности в других линиях необходимо заметить, что в ранних работах исследовалась в основном синяя область спектра, а в более поздних — красная. Лишь для небольшого числа линий существуют измерения, охватывающие длительный интервал времени, а количество надежно измеренных мало. На рис. 7 показано изменение со временем относительных интенсивностей авроральных линий [SIII] $\lambda 6312$ и [NII] $\lambda 5755$, а также небулярной линии [ArIII] $\lambda 7135$. В 1986–2019 гг. линия [SIII] $\lambda 6312$ в целом повторяла поведение авроральной линии [OIII]: ее относительная интенсивность уменьшалась, — тогда как изменения интенсивности авроральной линии [NII] $\lambda 5755$ были обратны вариациям [OIII] $\lambda 4363$. За указанный интервал времени не удалось надежно выявить изменения в относительной интенсивности [ArIII] $\lambda 7135$.

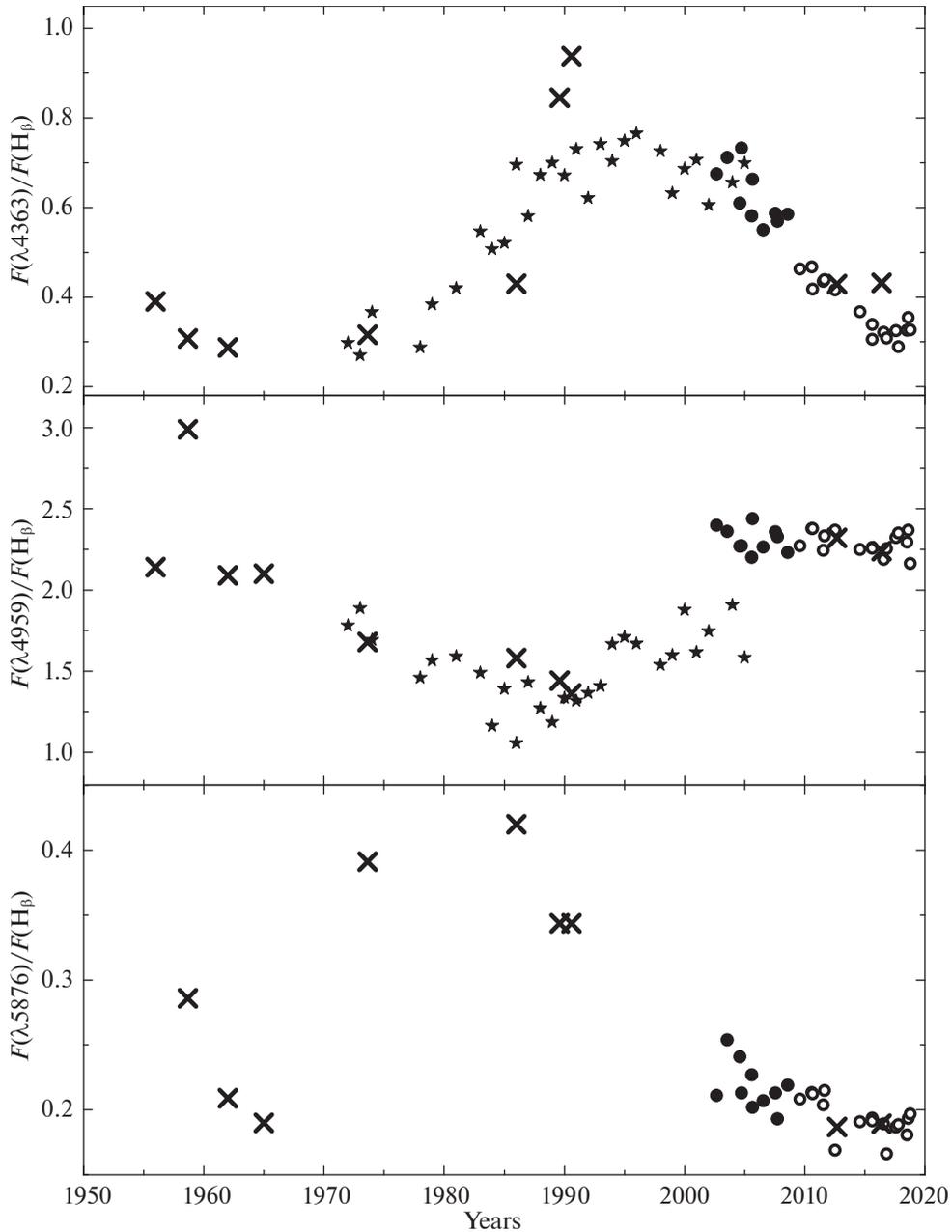


Рис. 5. Изменение со временем наблюдаемых относительных интенсивностей линий [OIII] $\lambda 4363$, $\lambda 4959$ и HeI $\lambda 5876$ по данным разных авторов. Обозначения те же, что и на рис. 4.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ IC 4997

“Нужно быть оптимистом, чтобы попытаться построить модель для IC 4997 ...”
(Хьюнг и др., 1994)

В первые годы после открытия спектральной переменности IC 4997 в отношениях интенсив-

ностей $F(\lambda 4363)/F(H\gamma)$ и $F(\lambda 4363)/F(\lambda 4959 + \lambda 4959)$ (примерно до 1970 г.) было предложено несколько объяснений этих спектральных изменений. Гурзядян (1958), Воронцов-Вельяминов (1960) и Хромов (1961) причиной уменьшения отношения интенсивности линий $F(\lambda 4363)/F(H\gamma)$ считали уменьшение температуры центральной звезды, причем Гурзядян полагал это изменение эволюционным, Воронцов-Вельяминов — долгопериодическим, а Хромов — флуктуационным. Со-

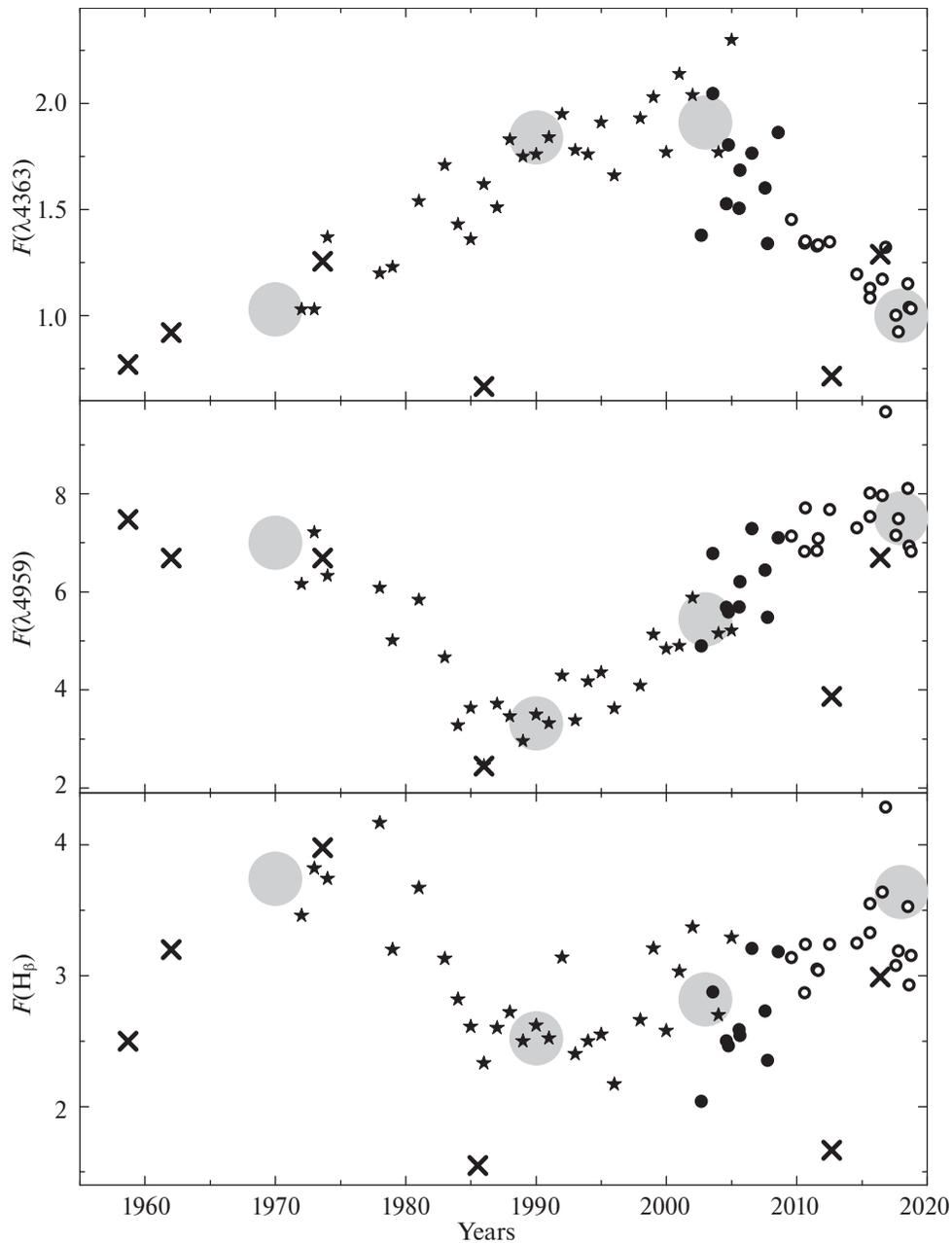


Рис. 6. Изменение со временем наблюдаемых абсолютных интенсивностей линий [OIII] $\lambda 4363$, $\lambda 4959$ и $H\beta$ в единицах 10^{-11} эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ по данным разных авторов. Обозначения те же, что и на рис. 4. Большие серые круги отмечают примерные границы временных этапов, выделенных по характеру изменений интенсивностей линий [OIII] $\lambda 4363$, $\lambda 4959$.

гласно расчетам Аллера и Лиллера (1966), изменение отношения $F(\lambda 4363)/F(\lambda 4959 + \lambda 4959)$ явилось результатом расширения туманности, сопровождавшегося одновременным уменьшением электронной температуры и плотности. Однако помимо медленных изменений наблюдались также быстрые, на временах порядка нескольких месяцев, вариации отношения $F(\lambda 4363)/F(H\beta)$, причиной которых

Ферланд (1979) полагал изменения электронной температуры, вызванные колебаниями потока ионизирующего излучения от центральной звезды: благодаря высокой электронной концентрации $N_e \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ во внутренней части туманности, где преимущественно излучается авроральная линия [OIII] $\lambda 4363$, время установления теплового равновесия мало, что позволяет говорить о единой для внутренней области электронной температуре.

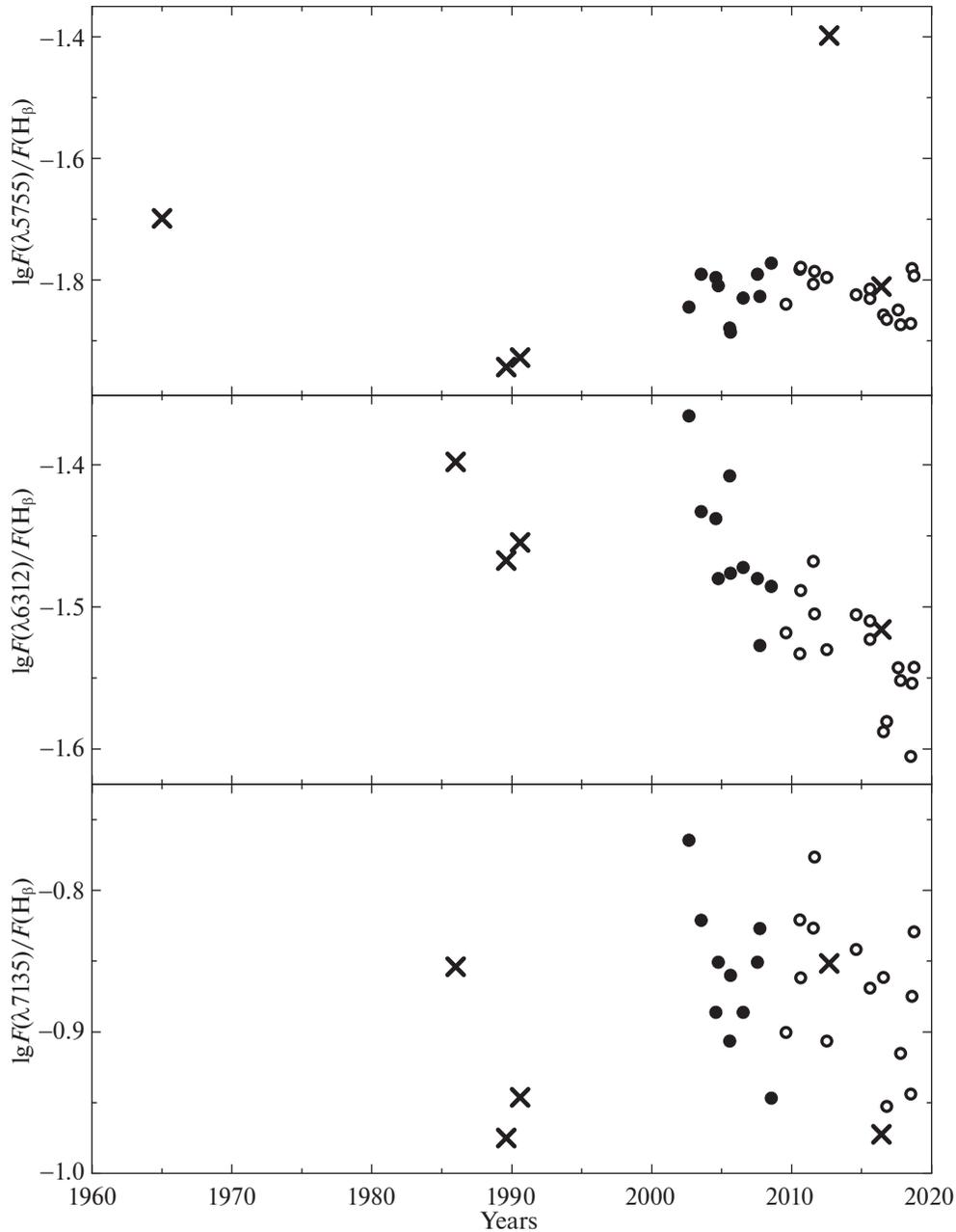


Рис. 7. Изменение со временем наблюдаемых относительных интенсивностей линий [ArIII] $\lambda 7135$, [SIII] $\lambda 6312$, [NII] $\lambda 5755$ по данным разных авторов. Обозначения те же, что и на рис. 4.

Несмотря на значительное количество диагностических соотношений, измеренных для IC 4997 по оптическим и ультрафиолетовым (УФ) данным, до сих пор не удается построить количественную модель, которая описывала бы не только мгновенное состояние туманности и центральной звезды, но и его изменение со временем (см., в особенности, работу Хьюнг и др., 1994). Излучение разных ионов формируется в различных областях, характеризующихся отличающимися значениями электрон-

ной температуры и концентрации. Таким образом, на диагностической диаграмме IC 4997 область, включающая в себя все точки пересечения кривых, соответствующих разным ионам, охватывает большой диапазон значений N_e , T_e . Для объяснения наблюдательных данных и для определения химического состава приходится принять как минимум двухкомпонентную структуру туманности, состоящую из более плотной центральной зоны и более разреженной внешней оболочки.

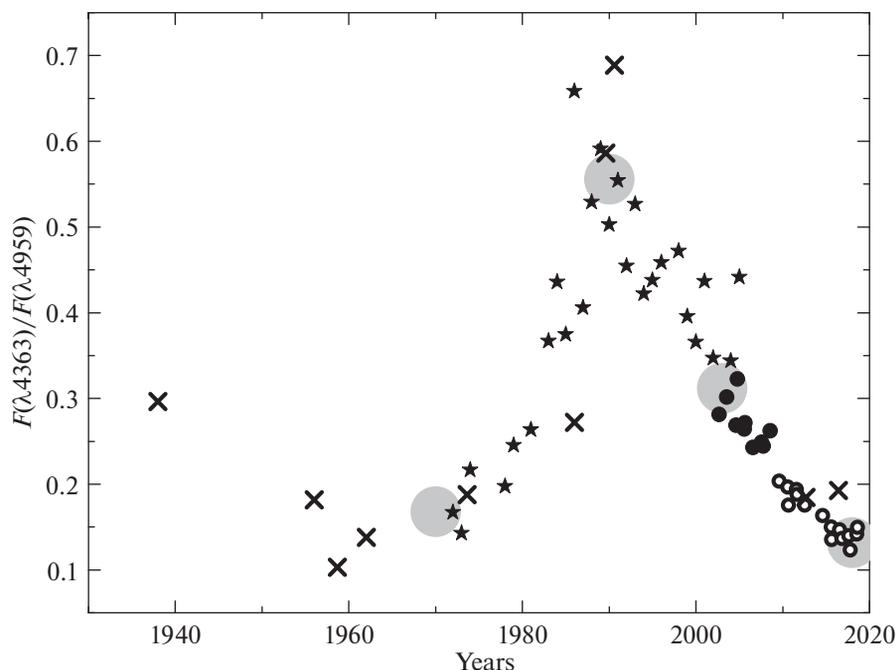


Рис. 8. Изменение со временем наблюдаемого отношения интенсивностей авроральной линии $\lambda 4363$ к небулярной $\lambda 4959$ [OIII] по данным разных авторов. Обозначения те же, что и на рис. 4 и рис. 6.

Для определения физических условий в туманности нами были измерены несколько диагностических соотношений. Исторически самым активно определяемым было отношение интенсивностей авроральной линии [OIII] $\lambda 4363$ к небулярным $\lambda 4959 + \lambda 5007$ или к одной из них. Нам не всегда удавалось измерить интенсивность [OIII] $\lambda 5007$, поэтому на рис. 8, где собраны наблюдения разных авторов за интервал времени около 80 лет, представлена величина $R = F(\lambda 4363)/F(\lambda 4959)$. В 2010–2019 гг. это отношение уменьшалось, продолжая тенденцию, начатую около 1990 г., и к 2019 г. вернулось к значению, наблюдавшемуся в 1960–1970 гг. Благодаря наличию абсолютных измерений интенсивностей, поведение R в интервале 1970–2019 гг. можно условно разделить на три этапа. На первом этапе (~ 1970 –1990) R росло за счет усиления авроральной линии и ослабления небулярной, на втором (~ 1990 –2000) — R уменьшалось при одновременном усилении небулярной и авроральной линий, на третьем (~ 2000 –2019) — уменьшалось при усилении небулярной линии и ослаблении авроральной. На рис. 6 и 8 серыми кругами обозначены усредненные оценки соответствующих величин в моменты времени, разделяющие выделенные этапы: 1970, 1990, 2003 (год начала наших наблюдений с ПЗС-матрицей), 2019 г.

Есть указание на изменения других соотношений интенсивностей линий в спектре IC 4997, хотя

они менее достоверны и могут быть прослежены на меньшем интервале времени (рис. 9). Так, с начала 1990-х годов к 2019 г. наблюдалось уменьшение отношения интенсивностей линий [ArII] $F(\lambda 5192)/F(\lambda 7135)$: от ~ 0.033 (по данным Хьюнга и др., 1994) до ≤ 0.01 (наши оценки), в основном за счет ослабления авроральной линии [ArII]. Однако следует отметить, что линия [ArII] $\lambda 5192$ слаба и образует бленду со сравнимыми по интенсивности линиями [NI] $\lambda 5198$ и $\lambda 5200$, что не позволяет надежно измерить ее интенсивность при нашем спектральном разрешении. Сходное поведение наблюдается у линий [SIII], хотя большое расстояние между линиями ($\lambda 6312$ и $\lambda 9069$) увеличивает погрешность калибровки. Напротив, отношение интенсивностей линий [NII] $F(\lambda 5755)/F(\lambda 6584)$ не показывает значимых изменений. Кроме того, разброс точек велик, вероятно, из-за сложности выделения линии $\lambda 6584$ из крыла $H\alpha$.

Диагностические соотношения, чувствительные к электронной концентрации, для ионов серы и хлора [SII] $F(\lambda 6716)/F(\lambda 6731)$ и [SIII] $F(\lambda 5518)/F(\lambda 5538)$ для всего периода наших наблюдений с 2003 г. оставались постоянными в пределах точности. Отношение $F(\lambda 6716)/F(\lambda 6731)$ имеет значение, близкое к критическому, и поэтому дает только нижнюю оценку $\log N_e \sim 4$, соответствующую внешней более разреженной части туманности, где излучают ионы низкого возбуждения.

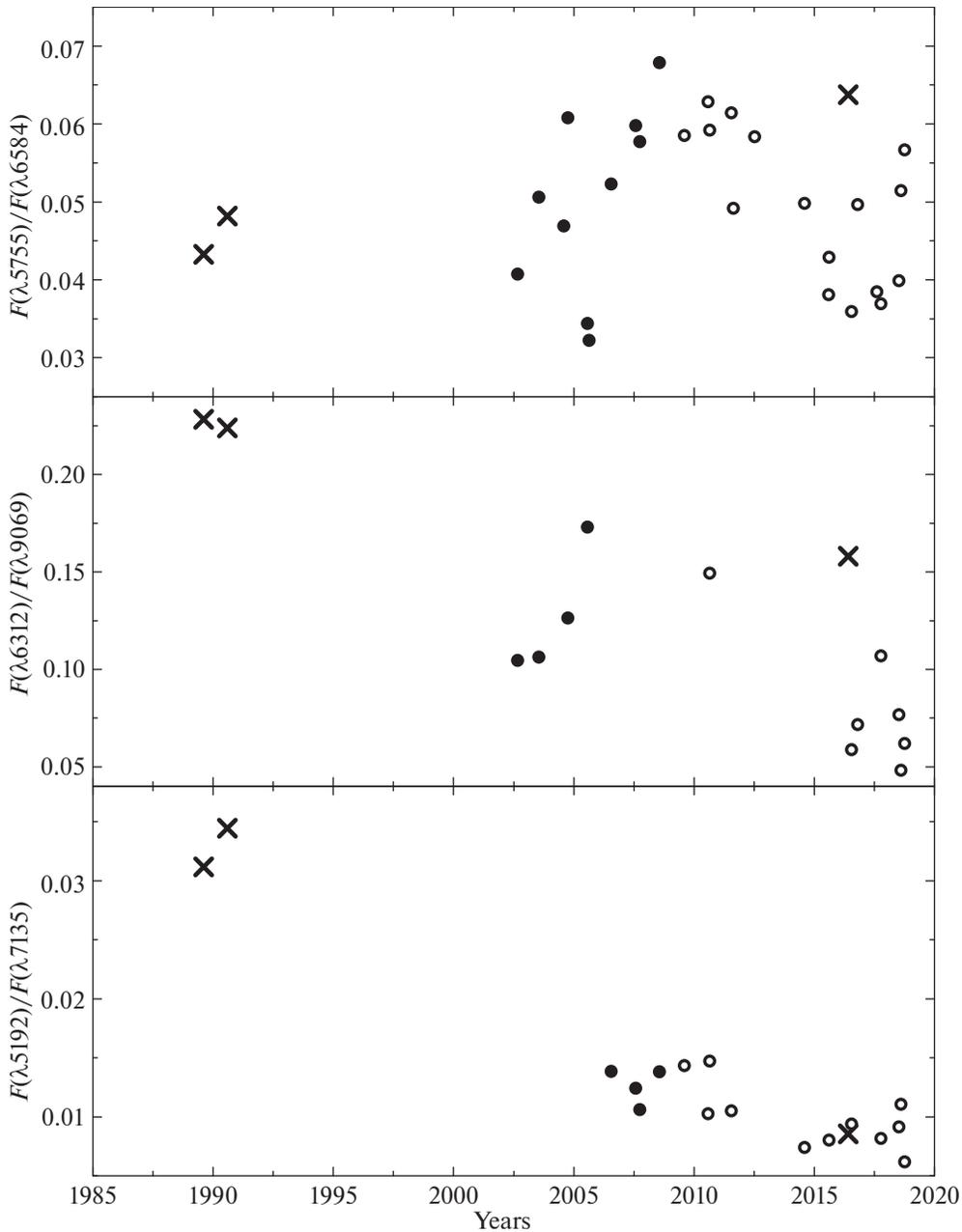


Рис. 9. Изменение со временем наблюдаемых отношений интенсивностей авроральных и небулярных линий [ArIII] $F(\lambda 5192)/F(\lambda 7135)$, [SIII] $F(\lambda 6312)/F(\lambda 9069)$, [NII] $F(\lambda 5755)/F(\lambda 6584)$ по данным разных авторов. Обозначения те же, что и на рис. 4.

Отношение интенсивностей линий [SIII] также близко к своему критическому. Оно характеризует области более высокого возбуждения и дает более высокое значение электронной концентрации $\lg N_e \sim 4.5$. Однако потенциал второй ионизации у хлора ниже, чем у кислорода, поэтому область излучения линий $\lambda 5518, 5538$, возможно, лишь частично совпадает с зоной [OIII]. Постоянство указанных соотношений свидетельствует о том,

что в зонах низкого возбуждения электронная концентрация если и меняется, то ее величина не опускается существенно ниже критического значения ($\lg N_e^{\text{crit}} \sim 3-3.5$ для серы и $\sim 4-4.5$ для хлора).

Рассмотрим, как на диагностической диаграмме менялось положение кривых, представляющих ионы N^+, S^{2+}, O^{2+} и Ar^{2+} . Эти ионы имеют сходную структуру энергетических уровней, но от-

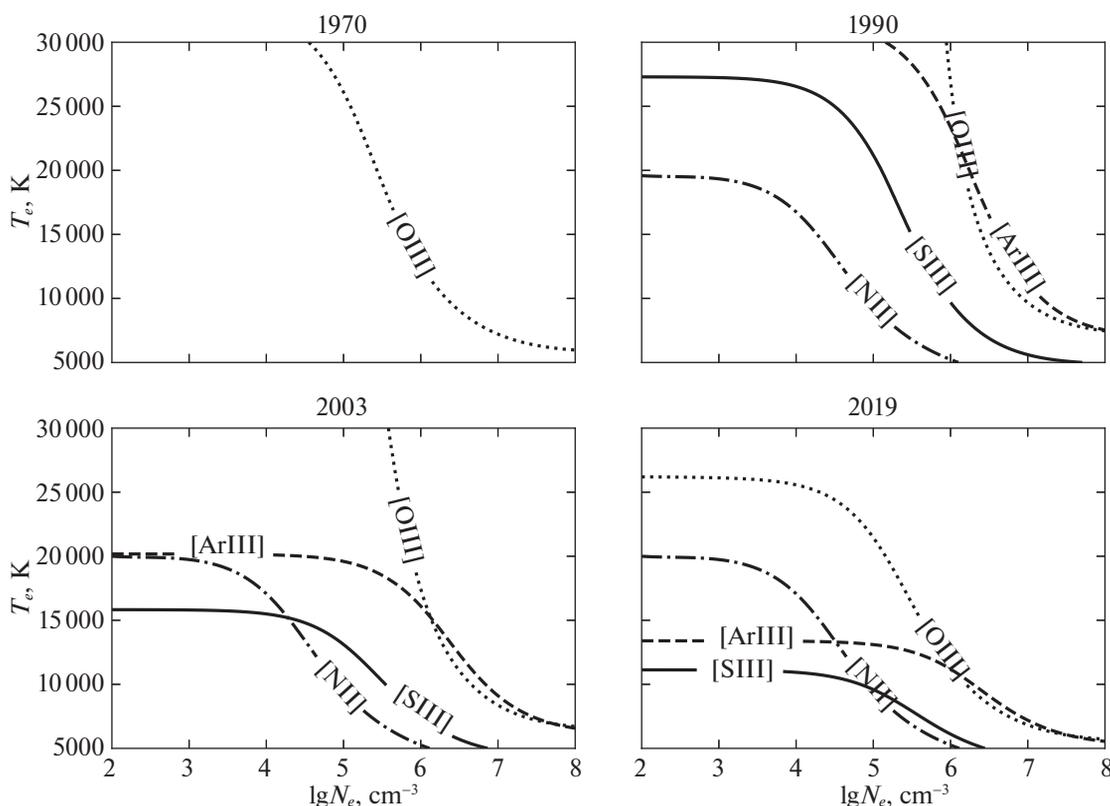


Рис. 10. Диагностические диаграммы N_e – T_e для IC 4997, построенные по усредненным данным разных авторов для 1970, 1990, 2003 и 2019 гг. Все соотношения интенсивностей линий были исправлены за межзвездное покраснение света с $c(H\beta) = 0.35$. Обозначения: сплошная линия — ион [SIII], точечный пунктир — [OIII], штриховой пунктир — [ArIII], штрихпунктирная линия — [NII].

личаются потенциалом ионизации и критической плотностью, и, вероятно, области их излучения не совпадают. На рис. 10 представлены N_e – T_e диаграммы, построенные с помощью пакета PyNeb (Луридиана и др., 2015) для моментов времени, которые разделяют этапы, выделенные по изменениям абсолютных интенсивностей линий [OIII]. Кроме того, что невозможно одной парой значений N_e , T_e объяснить все наблюдаемые соотношения, вид диаграмм указывает на высокое значение электронной концентрации ($\lg N_e \geq 6$), по крайней мере в области излучения линий [OIII]. Для построения диагностических диаграмм все соотношения интенсивностей были исправлены за межзвездное покраснение света с $c(H\beta) = 0.35$. Хьюнг и др. (1994), чьи данные мы использовали для построения диаграммы 1990 г., получили $c(H\beta) = 0.8$. Если исправить диагностические соотношения с этим значением $c(H\beta)$, то все линии сместятся в область больших значений N_e , T_e . Кривые, соответствующие ионам O^{2+} , S^{2+} и Ar^{2+} , с 1990 г. ведут себя сходным образом: смещаются в область меньших значений N_e , T_e . А вот положение кривой для

N^{+} практически не меняется. Вероятно, изменения N_e , T_e не затрагивают зону излучения линий [NII].

Поскольку мы не можем получить абсолютные значения N_e , T_e для выделенных эпох, попробуем определить характер изменения этих параметров. В качестве исходных данных примем изменения абсолютных интенсивностей линий $H\beta$, [OIII] $\lambda 4363$, 4959, а также их отношений, исправленных за межзвездное покраснение. Предположим, что области излучения этих линий характеризуются одинаковыми значениями N_e , T_e , и количество излучающих атомов водорода со временем не меняется. В качестве исходной электронной температуры (в 1970 г.) примем некоторое значение. Далее, по отношению R находим N_e для этого момента времени, а по относительным интенсивностям — относительное содержание иона O^{2+} . Затем по относительному изменению $F(H\beta)$ между первым и вторым моментом времени и по величине R во второй момент времени оцениваем N_e , T_e во второй момент времени, а по относительным интенсивностям — содержание O^{2+} . Та же процедура выполняется при переходе между следующими моментами вре-

Таблица 6. Изменение параметров области излучения линий $H\beta$, [OIII] $\lambda 4363$, 4959 в 1970–2019 гг. в туманности IC 4997

Параметр	1970	1990	2003	2019
T_e , К	8000	11900	9740	7650
N_e , cm^{-3}	5.6(6)	5.3(6)	5.0(6)	5.14(6)
O^{2+}/H^+	4.2(-3)	6.5(-4)	2.18(-3)	6.0(-3)
$F(\lambda 5876)/F(H\beta)$	0.19	0.22	0.20	0.19
T_e , К	10000	16700	12800	9440
N_e , cm^{-3}	2.16(6)	2.3(6)	2.05(6)	2.01(6)
O^{2+}/H^+	7.7(-4)	1.27(-4)	2.4(-4)	1.13(-3)
$F(\lambda 5876)/F(H\beta)$	0.20	0.29	0.23	0.20
T_e , К	12000	22600	16150	12220
N_e , cm^{-3}	1.18(6)	1.4(6)	1.17(6)	1.08(6)
O^{2+}/H^+	2.7(-4)	4.6(-5)	1.5(-4)	4.0(-4)
$F(\lambda 5876)/F(H\beta)$	0.22	0.36	0.28	0.21

мени. В табл. 6 представлены результаты расчетов, выполненных с помощью пакета PyNeb, для нескольких значений исходной электронной температуры: $T_e = 8000, 10\,000, 12\,000$ К. В целом видно, что во всех случаях N_e меняется незначительно, тогда как T_e сначала растет, а потом падает на несколько тысяч градусов.

Существенный рост температуры необходим для интерпретации уменьшения абсолютной интенсивности линии $H\beta$ после 1970 г. Невозможно объяснить падение потока в $H\beta$ уменьшением N_e : этому противоречит рост R . С другой стороны, интенсивность запрещенных линий должна расти с увеличением температуры, а мы наблюдаем падение интенсивности небулярных линий после 1970 г., и усиление авроральной линии значительно меньше ожидаемого для такого роста температуры. Для объяснения такого поведения приходится допустить существенное уменьшение числа излучающих ионов O^{2+} (почти в 10 раз), связанное, возможно, с дальнейшей ионизацией кислорода, либо с уменьшением зоны излучения.

Возникает вопрос: чем может быть вызвано увеличение T_e на несколько тысяч градусов? Согласно оценкам Ферланда (1979), если измене-

ние электронной температуры в туманности вызвано изменением ионизирующего потока от центральной звезды Q , то эти изменения связаны следующим образом: $\Delta T_e \simeq 4200 \times \Delta Q/Q$. Так, вариация T_e в пределах 300 К, предложенная Ферландом для объяснения быстрой переменности отношения $F(\lambda 4363)/F(H\gamma)$, требует изменения ионизирующего потока от центральной звезды на 8%. Но наши расчеты указывают на рост температуры на несколько тысяч градусов, что соответствовало бы увеличению количества ионизирующих квантов в разы. Сложно представить себе такой процесс. Вероятно, рост T_e вызван не столько ростом эффективной температуры звезды, ведь степень возбуждения спектра туманности за рассматриваемое время не изменилась, сколько иными процессами, например, взаимодействием звездных ветров.

В табл. 6 также приводятся относительные интенсивности линии HeI $\lambda 5876$, рассчитанные для найденных значений N_e, T_e и $He^+/H^+ = 0.1$. Видно, что при исходной $T_e = 8000$ К относительная интенсивность линии почти не меняется, тогда как при $T_e \geq 10\,000$ К рассчитанное изменение интенсивности качественно совпадает с наблюдаемым, хотя и недостаточно по амплитуде.

Результаты, представленные в табл. 6, носят оценочный характер. Если принять большее межзвездное покраснение ($c(H\beta) > 0.35$), то для объяснения наблюдаемых спектральных изменений потребуется большее по амплитуде увеличение электронной температуры. Если учитывать тот факт, что мы измеряем интегральный поток от туманности, а изменения N_e , T_e затрагивают только некоторую область, то опять же амплитуда изменений получится больше.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Представлены результаты фотометрических наблюдений в оптическом и ближнем ИК-диапазонах, а также спектроскопии низкого разрешения переменной ПТ IC 4997 за период 2009–2019 гг. Новые данные исследуются в совокупности с опубликованными ранее.

По наблюдениям, выполненным в нашей неизменной инструментальной фотометрической системе UBV , мы построили кривую среднегодового интегрального блеска IC 4997 за период с 1970 по 2019 г. Обнаружено длительное глубокое (до 0.5^m в фильтре V) ослабление блеска во всех полосах UBV , начавшееся после 1970 г., минимум блеска около 1985 г. и его возвращение к 2019 г. в исходное состояние в полосах B и U . Блеск в полосе V , однако, продолжал расти вплоть до 2019 г. В 2019 г. получены новые фотометрические наблюдения IC 4997 в ближнем ИК-диапазоне в полосах $JHKL$. Обнаружено ослабление блеска туманности к 2019 г. по сравнению с эпохой 1999–2006 гг., наиболее значительное — в полосе L . Показано, что долговременные вариации блеска в оптическом и ИК-диапазонах обусловлены, в основном, изменением вклада переменных эмиссионных линий туманности.

После исключения вклада эмиссий в полосы B и V показатель цвета суммарного континуума $B - V$ IC 4997 с учетом межзвездного поглощения оказался слишком красным для суммы звездного и газового континуумов, что может указывать на присутствие еще одного вкладчика в непрерывный спектр в этом диапазоне (спутника центральной звезды?), хотя и с низкой вероятностью. Следует отметить, что IC 4997 заподозрена не только в двойственности ядра, но также внесена Биром и Сокером (2017) в список планетарных туманностей, заподозренных как тройные звездные системы (= *maybe triple class*) с вероятностью, равной 0.33.

По новым и опубликованным ранее данным на интервале времени 1970–2019 гг. прослежено изменение абсолютных и относительных интенсивностей некоторых эмиссионных линий, принадлежащих туманности, а также диагностических

соотношений. За период 2010–2018 гг. величина $\lambda 4363/H\gamma$ уменьшалась, продолжая тенденцию, начатую около 1990 г., и к 2019 г. вернулась к значению, наблюдавшемуся в 1960–1970 гг. За все время наблюдений это отношение описало волну с размахом около 0.45 в логарифмическом представлении и характерным временем порядка 50–60 лет.

По новым и архивным данным прослежена эволюция абсолютной интенсивности линии $H\beta$: выделяются период более высоких значений до 1980 г., затем ослабление примерно в полтора раза и сохранение на постоянном уровне с тенденцией к увеличению до 2000–2005 гг., а затем более выраженный рост. Изменение абсолютной интенсивности небулярной линии [OIII] $\lambda 4959$ в 1960–2019 гг. в общих чертах сходно с вариацией потока в $H\beta$, но имеет большую амплитуду ($F_{\max}/F_{\min} \geq 2$). В 2010–2019 гг. абсолютная интенсивность линии [OIII] $\lambda 4959$ существенно не менялась, вернувшись к значениям, наблюдавшимся до начала ее ослабления. Абсолютная интенсивность авроральной линии [OIII] $\lambda 4363$ после 1960 г. росла с примерно постоянной скоростью, достигла максимума около 2000–2005 гг., увеличившись более, чем в 2 раза, а потом началось ослабление, которое продолжается и в настоящее время.

Также мы восстановили ход относительных интенсивностей некоторых других спектральных линий. В частности, была прослежена переменность в линии HeI $\lambda 5876$ на интервале 1960–2019 гг.: увеличение ее относительной интенсивности почти в 2 раза, а затем уменьшение и возвращение на прежний уровень.

По диагностическим соотношениям для линий [SII] и [SIII] были получены нижние оценки электронной концентрации для внешней оболочки IC 4997: $\lg N_e \sim 4$ и $\lg N_e \sim 4.5$ соответственно. В 2010–2019 гг. отношения оставались постоянными в пределах точности измерений и имели значения, близкие к критическим.

Положения диагностических кривых для ионов N^+ , S^{2+} , O^{2+} и Ar^{2+} на диаграмме N_e, T_e указывают, во-первых, на наличие в туманности зон, характеризующихся разными значениями электронной температуры и концентрации, а во-вторых, — на изменение этих величин со временем. По крайней мере, во внутренней области туманности наблюдался сначала рост одного или обоих параметров (в 1970–1990 гг.), а потом — уменьшение (до настоящего времени). Имея данные о вариациях абсолютных интенсивностей линий $H\beta$, [OIII] $\lambda 4363$, 4959 и предполагая, что параметры N_e, T_e для областей излучения этих линий одинаковы, мы оценили масштаб этих изменений. Причиной основных особенностей спектральной переменности IC 4997 мы считаем вариацию электронной

температуры в центральной части туманности, которая, вероятно, вызвана не столько изменением ионизирующего потока от ядра туманности, сколько переменным звездным ветром и процессами, связанными с ним. В целом спектральные изменения за период 1960–2019 гг. можно интерпретировать как наблюдательное следствие отдельного эпизода усиленной потери массы нестационарным ядром туманности. Остается открытым вопрос о том, что спровоцировало усиление звездного ветра, было ли это событие единичным, повторится ли снова в подобном или ином виде.

Авторы посвящают эту статью памяти старшего научного сотрудника ГАИШ доктора физ.-мат. наук Е.Б. Костяковой (1924–2013).

При проведении исследований широко использовались базы данных ADS, SIMBAD, VIZIER.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акер и др. (A. Acker, J. Koppen, B. Stenholm, and G. Jasiewicz), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **80**, 201 (1989).
2. Акер и др. (A. Acker, J. Marcout, F. Ochsenbein, B. Stenholm, R. Tylenda, and C. Schön), *The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, Parts I, II*, (1992).
3. Аллер (L.H. Aller), *Astrophys. J.* **93**, 236 (1941).
4. Аллер, Калер (L.H. Aller and J.B. Kaler), *Astrophys. J.* **140**, 621 (1964).
5. Аллер, Лиллер (L.H. Aller and W. Liller), *MNRAS* **132**, 337 (1966).
6. Аллер, Уокер (L.H. Aller and M.F. Walker), *Astrophys. J.* **161**, 917 (1970).
7. Ахерн (F.A. Ahern), *Astrophys. J.* **223**, 901 (1978).
8. Архипова В.П., Костякова Е.Б., Носкова Р.И., Письма в *Астрон. журн.* **20**, 122 (1994) [V.P. Arhipova et al., *Astron. Lett.* **20**, 99 (1994)].
9. Бир, Сокер (E. Bear and N. Soker), *MNRAS* **837**, L10 (2017).
10. Бурлак М.А., Есипов В.Ф., Письма в *Астрон. журн.* **36**, 792 (2010) [M.A. Burlak and V.F. Esipov, *Astron. Lett.* **36**, 752 (2010)].
11. Вайтлок (P.A. Whitelock), *MNRAS* **213**, 59 (1985).
12. Воронцов-Вельяминов Б.А., *Астрон. журн.* **37**, 994 (1960).
13. Воронцов-Вельяминов Б.А., Костякова Е.Б., Докучаева О.Д., Архипова В.П., *Астрон. журн.* **42**, 464 (1965).
14. Воронцов-Вельяминов Б.А., Костякова Е.Б., Докучаева О.Д., Архипова В.П., *Тр. ГАИШ* **40**, 57 (1970).
15. Гайдук и др. (M. Hajduk, P.A.M. van Hoof, and A.A. Zijlstra), *Astron. Astrophys.* **573**, A65 (2015).
16. Глушневa и др. (I.N. Glushneva, V.T. Doroshenko, T.S. Fetisova, T.S. Khruzina, E.A. Kolotilov, L.V. Mossakovskaya, S.L. Ovchinnikov, and I.B. Voloshina), *VizieR Online Data Catalog III/208* (1998).
17. Гомес и др. (Y. Gómez, L.F. Miranda, J.M. Torrelles, L.F. Rodríguez, and J.A. López), *MNRAS* **336**, 1139 (2002).
18. Гурздян Г.А., *Астрон. журн.* **35**, 520 (1958).
19. Джонсон и др. (H.L. Johnson, R.I. Mitchel, B. Iriarte, and W.Z. Wisniewski), *Comm. Lunar and Planet. Lab.* **4**, 99 (1966).
20. Жиллетт и др. (F.C. Gillett, R.F. Knacke, and W.A. Stein), *Astrophys. J.* **163**, L57 (1971).
21. Касассус и др. (S. Casassus, L.-A. Nyman, C. Dickinson, and T.J. Pearson), *MNRAS* **382**, 1607 (2007).
22. Костякова Е.Б., *Астрон. журн.* **47**, 989 (1970).
23. Костякова Е.Б., Письма в *Астрон. журн.* **16**, 1085 (1990) [E.V. Kostyakov, *Astron. Lett.* **16**, 389 (1990)].
24. Костякова Е.Б., *Тр. ГАИШ* **62**, 143, (1991).
25. Костякова Е.Б., Письма в *Астрон. журн.* **25**, 457 (1999) [E.V. Kostyakov, *Astron. Lett.* **25**, 389 (1999)].
26. Костякова Е.Б., Архипова В.П., *Астрон. журн.* **86**, 1237 (2009).
27. Костякова и др. (E.B. Kostyakova, V.P. Arkipova, and M.V. Savel'eva.), *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege, 6 Ser.*, **5**, 473 (1973).
28. Ленцуни и др. (P. Lenzuni, A. Natta, and N. Panagia), *Astrophys. J.* **345**, 306 (1989).
29. Лиллер, Аллер (W. Liller and L.H. Aller), *Sky and Tel.* **16**, 222 (1957).
30. Лиллер, Аллер (W. Liller and L.H. Aller), *Proc. Nat. Acad. Sci.* **49**, 695 (1963).
31. Луридиана и др. (V. Luridiana, C. Morisset, and R.A. Shaw), *Astron. Astrophys.* **573**, 42 (2015).
32. Лютый В.М., *Сообщ. ГАИШ* **172**, 30 (1971).
33. Марколино, де Араужо (W.L.F. Marcolino and F.X. de Araújo), *Astron. J.* **126**, 887 (2003).
34. Марколино и др. (W.L.F. Marcolino, F.X. de Araújo, H.V.M. Junior, and E.S. Duarte), *Astron. J.* **134**, 1380 (2007).
35. Мензел и др. (D.H. Menzel, L.H. Aller, and M.H. Hebb), *Astrophys. J.* **93**, 230 (1941).
36. Миранда и др. (L.F. Miranda, J.M. Torrelles, and C. Eiroa), *Astrophys. J.* **461**, L111 (1996).
37. Миранда, Торреллес (L.F. Miranda and J.M. Torrelles), *Astrophys. J.* **496**, 274 (1998).
38. Натта, Панаджиа (A. Natta and N. Panagia), *Astrophys. J.* **248**, 185 (1981).
39. О Делл (C.R. O Dell), *Astrophys. J.* **138**, 1018 (1963).
40. Озава и др. (R. Ohsawa, T. Onaka, I. Sakon, M. Matsuura, and H. Kaneda), *Astron. J.* **151**, 93 (2016).
41. Паркер и др. (Q.A. Parker, I.S. Bojičić, and D.J. Frew), *J. Phys.: Conf. Ser.* **728**, article id. 032008 (2016).
42. Паздерска и др. (B.M. Pazderska, M.P. Gawroński, R. Feiler, M. Birkinshaw, I.W.A. Browne, R. Davis, A.J. Kus, K. Lancaster, S.R. Lowe, E. Pazderski, M. Peel, and P.N. Wilkinson), *Astron. Astrophys.* **498**, 463 (2009).
43. Пейдж (T.L. Page), *Astrophys. J.* **96**, 78 (1942).
44. Пиклс (A.J. Pickles), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 863 (1998).

45. Потташ и др. (S.R. Pottasch, B. Baud, D. Beinteme, J. Emerson, H.J. Habing, S. Harris, J. Houck, R. Jennings, and P. Marsden), *Astron. Astrophys.* **138**, 10 (1984).
46. Пургатхофер (A.T. Purgathofer), *Circ. IAU* **3258** (1978).
47. Пургатхофер, Столл (A.T. Purgathofer and M. Stoll), *Astron. Astrophys.* **99**, 218 (1981).
48. Сахаи и др. (R. Sahai, M.R. Morris, and G. Villar), *Astron. J.* **141**, 134 (2011).
49. Струве, Свингс (O. Struve and P. Swings), *Astrophys. J.* **93**, 356 (1941).
50. Таранова О.Г., Шенаврин В.И., *Письма в Астрон. журн.* **33**, 657 (2007) [O.G. Taranova and V.I. Shenavrin, *Astron. Lett.* **33**, 584 (2007)].
51. Уайт (M.L. White), *Astrophys. J.* **115**, 71 (1952).
52. Фейбельман и др. (W.A. Feibelman, R.W. Hobbs, C.W. Mc Cracken, and L.W. Brown), *Astrophys. J.* **231**, 111 (1979).
53. Ферланд (G.J. Ferland), *MNRAS* **188**, 669 (1979).
54. Хилтнер и др. (W.A. Hiltner, B. Iriarte, and M.L. Johnson), *Astrophys. J.* **127**, 539 (1958).
55. Хромов Г.С., *Астрон. журн.* **38**, 809 (1961).
56. Хьюнг, Аллер (S. Hyung and L.H. Aller), *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **90**, 413 (1993).
57. Хьюнг и др. (S. Hyung, L.H. Aller, and W.A. Feibelman), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **93**, 465 (1994).