

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ КОМПАКТНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ НЬ 12

© 2021 г. Н. П. Иконникова^{1*}, И. А. Шапошников^{1,2}, В. Ф. Есипов,
М. А. Бурлак¹, В. П. Архипова¹, А. В. Додин¹, С. А. Потанин^{1,2}, Н. И. Шатский¹

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

Поступила в редакцию 22.07.2021 г.

После доработки 05.08.2021 г.; принята к публикации 05.08.2021 г.

Представлены результаты новых спектральных наблюдений низкого разрешения молодой компактной планетарной туманности Нь 12, выполненные в 2011–2020 гг. на телескопах ГАИШ МГУ. В спектральном диапазоне $\lambda 3687$ – 9532 измерены интенсивности более 50 эмиссионных линий туманности, выявлены абсорбционные детали, относящиеся к межзвездной среде, проведен поиск абсорбций, принадлежащих возможному второму компоненту центральной звезды. По бальмеровскому декременту получена оценка коэффициента экстинкции с $(H\beta) = 1.15 \pm 0.07$. Путем анализа карт межзвездного поглощения определено расстояние $D \approx 2400$ пк. Прослежена история спектральных наблюдений Нь 12, начиная с первых спектров, полученных Алленом (1951) в 1945 г. Обнаружены систематический рост относительных интенсивностей небулярных линий [OIII] $\lambda 4959$ и $\lambda 5007$ и ослабление относительной интенсивности авроральной линии [OIII] $\lambda 4363$, что привело к увеличению в ~ 4 раза с 1945 г. по настоящее время отношения наблюдаемых потоков $F(\lambda 4959 + \lambda 5007)/F(\lambda 4363)$. Сохраняет постоянство отношение интенсивностей линий [OIII]/[OII] $F(\lambda 4363)/F(\lambda 3727 + \lambda 3729)$, что свидетельствует о неизменности степени ионизации в среднем для туманности. Получена оценка температуры возбуждающей звезды $T \approx 41\,000$ К. Сделан вывод о том, что основной причиной спектральной переменности является уменьшение электронной температуры и, возможно, электронной концентрации в зоне образования линий [OIII].

Ключевые слова: планетарные туманности, спектральная переменность, Нь 12, параметры газовой оболочки, эволюция.

DOI: 10.31857/S0320010821080027

ВВЕДЕНИЕ

Планетарные туманности (ПТ) — продукт поздней эволюции звезд малых и умеренных масс ($M \sim 0.8$ – $8.0M_{\odot}$). Время жизни таких звезд в пост-асимптотической (post-AGB) стадии эволюции зависит от массы звезды, а также от темпа потери массы на асимптотической ветви гигантов (AGB) и может занимать от 100 до нескольких тысяч лет. Интерес к исследованию наблюдательных проявлений эволюции post-AGB звезд и молодых планетарных туманностей в последнее время существенно возрос, что связано с построением Миллером Бертолами (2016) новых эволюционных моделей, временные шкалы которых в несколько раз короче,

чем у прежних моделей (Вассилиадис, Вуд, 1994; Блекер, 1995).

Уже обнаружено несколько объектов, изменение эмиссионных спектров которых может быть вызвано повышением температуры возбуждающей звезды, что согласуется с идеей быстрой эволюции в post-AGB стадии. Так, компактная ПТ низкого возбуждения Неп 2-260 показала изменение спектра за последние 30 лет: в середине 80-х годов прошлого столетия эмиссионные небулярные линии в ее спектре не обнаруживались (Акер и др., 1991), в 2001 г. поток в линии [OIII] $\lambda 5007$ был равен 5% от потока в линии $H\beta$ (Эскудеро и др., 2004), а в 2012 г. — уже около 7% (Гайдук и др., 2014). Авторы последней работы считают, что усиление небулярных линий связано с повышением степени

*Электронный адрес: ikonnikova@gmail.com

ионизации в туманности из-за роста температуры возбуждающей звезды.

Существуют ПТ, спектральная переменность которых связана не с эволюцией центральной звезды, а с изменением параметров газовой оболочки вследствие отдельного эпизода усиленной потери массы нестационарным ядром туманности. Ярким примером таких ПТ может служить IC 4997, для которой спектральные наблюдения проводятся более полувека (Костякова, Архипова, 2009; Архипова и др., 2020). Остается открытым вопрос о том, что спровоцировало усиление звездного ветра, было ли это событие единичным, повторится ли снова в подобном или ином виде.

Кондратьевой (2005) были обнаружены существенные изменения в двух ПТ: M 1-6 и M 1-11 по результатам 30–35 лет наблюдений. Значительное усиление линий [OIII] и HeI и ослабление линии [SII] (в M1-6), по мнению автора, свидетельствуют об изменении физических условий в туманностях. Разумно предположить, что все наблюдаемые эффекты вызваны увеличением $T_{\text{эф}}$, однако имеющиеся оценки этого звездного параметра не подтверждают данную гипотезу. В случае M 1-11 в 1996 г. были зарегистрированы внезапные увеличения $N_e(\text{SII})$, $T_e(\text{OIII})$ и $T_e(\text{NII})$. Автор предполагает, что эти изменения связаны с какими-то динамическими событиями в туманности.

Целью настоящей работы являлась проверка возможной спектральной переменности молодой компактной ПТ Hb 12.

ПТ Hb 12 (известная также как PNG 111.8-02.8, VV 286, Matryoshka nebula) была открыта Эдвином Хабблом 100 лет назад (Хаббл, 1921). Этот объект характеризуется сложной биполярной структурой и компактными размерами: угловой диаметр наиболее яркой в оптическом диапазоне части туманности составляет порядка 2–3", область слабой H α -эмиссии простирается приблизительно до 13" (Миранда, Сольф, 1989). Квок и Хсия (2007) изучили структуру туманности в линии [NII] по наблюдениям телескопа Хаббл. Позднее Вайтет и др. (2009) создали морфокинематическую модель Hb 12 на основе изображений туманности и длиннощелевой спектроскопии с высоким разрешением. Авторы впервые обнаружили на глубоком изображении Hb 12 в линии [NII] $\lambda 6584$ наличие торцевых узлов и измерили их лучевые скорости ~ 120 км/с. Кларк и др. (2014) представили спектроскопические наблюдения Hb 12 в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне, полученные на телескопе Gemini-North с помощью спектрографа NIFS. Объединив NIFS с системой адаптивной оптики Altair, авторы подробно изучили внутреннюю структуру туманности.

ПТ Hb 12 выделяется пониженной металличностью (Фаундес-Абанс, Масель, 1986; Перинотто, 1991; Хьюнг, Аллер, 1996; Квиттер и др., 2003) и принадлежит тонкому диску Галактики. С учетом данных о химсоставе, расположении в Галактике и кинематических характеристиках Квереза и др. (2007) классифицировали Hb 12 как ПТ типа Pa по Пеймберту (1978).

Центральная звезда, возможно, представляет собой тесную двойную систему с периодом обращения 3.4 ч (Хсия и др., 2006), эффективная температура ядра туманности оценивается в 42 000 К (Прейте-Мартинес, Потташ, 1983).

ПТ Hb 12 имеет значительный избыток излучения в далекой ИК-области и отождествлена с ИК-источником IRAS 23239+5754. Жанг и Квок (1991) построили распределение энергии в спектре объекта в широком диапазоне длин волн от 0.1 до 100 мкм и приписали ИК-избыток излучению пыли с $T_{\text{dust}} = 203$ К. Позднее Янг и др. (2013) исследовали спектр Hb 12 по наблюдениям спутника Spitzer со спектрографом IRC и обнаружили в спектральном диапазоне 9.9–37.2 мкм набор эмиссионных силикатных особенностей с преобладанием энстатита (MgSiO₃).

Основные известные сведения об объекте приведены в табл. 1.

История исследования спектра Hb 12 насчитывает 75 лет с момента, когда 2 июля 1945 г. Лоуренц Аллер получил на Ликской обсерватории первые спектрограммы туманности. В работе Аллера (1951) приведены измерения относительных интенсивностей 16 эмиссионных линий в синей области спектра от 3727 до 5007 Å.

Hb 12 вместе с другими ПТ попадала в различные спектrophотометрические обзоры, а именно: фотоэлектрическая фотометрия 34 планетарных туманностей (О'Делл, 1963), фотографическая и фотоэлектрическая спектrophотометрия голубого участка оптического диапазона спектра для 21 туманности (Калер и др., 1976), фотоэлектрические измерения интенсивностей эмиссионных линий для 36 туманностей (Баркер, 1978), фотоэлектрическая спектrophотометрия 8 компактных туманностей (Ахерн, 1978). Также отметим работу Квиттер и др. (2003), в которой с целью изучения относительного содержания различных элементов в ПТ анализировались спектры 21 объекта, в числе которых была и туманность Hb 12.

Наиболее полное и детальное исследование спектра высокого разрешения Hb 12 в диапазоне 366–1005 нм было проведено Хьюнгом и Аллером (1996). Авторы, в частности, определили физические параметры и химический состав туманности, а также построили ее пространственную модель. Миранда и Сольф (1989) по спектрам высокого

Таблица 1. Основные сведения о планетарной туманности Hb 12

Параметр	Значение	Источник
Экваториальные координаты (J2000)	$\alpha = 23^{\text{h}}26^{\text{m}}14.8^{\text{s}}, \delta = +58^{\circ}10'54.5''$	SIMBAD
Галактические координаты (J2000)	$l = 111^{\circ}88, b = -2^{\circ}85$	SIMBAD
Лучевая скорость	~ -5.0 км/с	SIMBAD
Класс возбуждения	4	Хьюнг, Аллер (1996)
Характеристики центральной звезды	$B = 14^{\text{m}}5, V = 13^{\text{m}}8, \log g = 5.5,$ $R = 3.0R_{\odot}, L = 1200L_{\odot}$	Хьюнг, Аллер (1996)
Скорость расширения центральной области	~ 16 км/с	Миранда, Сольф (1989)
Кинематический возраст	300 лет	Миранда, Сольф (1989)
Масса HII области	$0.05 M_{\odot}$	Миранда, Сольф (1989)

разрешения исследовали кинематическую и геометрическую структуру Hb12.

Лухманом и Риеке (1996) был подробно изучен спектр Hb 12 в ближней ИК-области. Позднее Hb 12 вошла в число 72 ПТ, для которых были получены спектральные наблюдения в диапазоне длин волн 2.5–5.0 мкм с помощью ИК-камеры IRC, установленной на борту спутника AKARI (Осава и др., 2016).

Остается открытым важный вопрос о возможной двойственности ядра туманности. Биполярная структура излучающей оболочки ПТ подразумевает наличие двойной звездной системы как следствие влияния ее гравитационного поля на расширение газа, однако для Hb 12 до сих пор не было получено иных надежных подтверждений существования спутника, кроме работы Хсиа и др. (2006), в которой на основе фотометрических и спектральных наблюдений исследовалась возможная двойственность центральной звезды Hb 12. Авторы упомянутой работы считают наличие второго компонента доказанным и даже приводят оценку его массы и параметров орбиты, однако результаты этого исследования подверглись критике в работе Де Марко и др. (2008).

Настоящая работа посвящена анализу многолетних спектральных наблюдений Hb 12 с целью исследования возможной переменности объекта.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектральные наблюдения ПТ Hb 12 в 2011–2019 гг. проводились на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции (КАС) ГАИШ

МГУ с дифракционным спектрографом с решеткой 600 шт/мм и длиной щелью шириной 4'' в диапазоне 4000–9000 Å. Полный регистрируемый спектр состоит из нескольких перекрывающихся диапазонов. Наблюдения проводились с несколькими экспозициями. Минимальная экспозиция подбиралась таким образом, чтобы сильнейшие линии (H α и [O III] λ 5007) не оказались передержанными. В ночь наблюдения вместе с объектом для дальнейшей абсолютизации его спектров на близкой воздушной массе снималась звезда — вторичный спектрофотометрический стандарт. В качестве приемника излучения применялась матрица ST-402 (размер матрицы: 765 × 510 пикселей, размер пикселя: 9 × 9 мкм). Спектральное разрешение (FWHM) составило 7.4 Å.

В 2019 г. была проведена модернизация оборудования, в результате которой на спектрограф вместо объектива Цейсс и матрицы ST-402 были установлены объектив Canon и ПЗС-матрица FLI PL-4022 размером 2048 × 2048 пикселей. В результате практически исчезло виньетирование, расширился одновременно регистрируемый спектральный диапазон, улучшилось качество изображения, увеличилось отношение сигнал/шум, особенно в синей части спектра.

Обработка спектров осуществлялась с помощью стандартной программы CCDOPS, а также программы SPE, созданной в Крымской астрофизической обсерватории (Сергеев, Хайсбергер, 1993). Абсолютная калибровка потоков осуществлялась по спектрам звезды-стандарта из спектрофотометрического каталога Глушневой и др. (1998)

Таблица 2. Журнал наблюдений

Обозначение	Дата	JD	Количество кадров	Экспозиции, с	Стандарт
KAC, Zeiss + ST-402					
11	26 августа 2011	2455800	21	60, 300, 900	BS 8606
15	13 августа 2015	2457248	21	60, 600, 900, 1200	1 Cas
16	5 октября 2016	2457667	19	30, 60, 600, 1200	12 Cas
17	20 августа 2017	2457986	19	60, 300, 1200, 1800	12 Cas
18	8 октября 2018	2458400	10	60, 300, 1800	12 Cas
19	26 июля 2019	2458690	24	30, 60, 120, 600, 1800	BS 8606, HD 211073
KAC, Canon + FLI					
19a	7 августа 2019	2450702	6	30, 300, 600, 1800	BS 8606, τ Cas
19b	1 октября 2019	2458758	5	30, 60, 1800	4 Lac
КГО					
19c	7 ноября 2019	2458795	26	5, 20, 60	BS 8606
20	20 января 2020	2458869	39	1, 3, 5, 30, 60, 300	Hilt600

с привлечением данных из атласа стандартных звездных спектров Пиклеса (1985).

Кроме того, в ноябре 2019 г. и январе 2020 г. были получены спектры в диапазоне 3500–7500 Å на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ с помощью нового двухлучевого спектрографа низкого разрешения (TDS), оснащенного голографическими решетками. В качестве приемников используются камеры Andor Newton 940P с ПЗС E2V CCD42-10 формата 512 × 2048 пикселей. Подробное описание прибора приведено в работе Потанина и др. (2020). Наблюдения проводились с длинной щелью шириной 1".0. Редукция данных включала исправление за нулевой уровень, плоское поле и темновой ток. Из изображения двумерного спектра удалялись следы космических частиц. Для исправления за спектральную чувствительность приемника, пропускание атмосферы и оптики наблюдались спектры стандартов, абсолютное распределение энер-

гии для которых получено из библиотеки¹. Вся обработка проводилась с использованием собственных программ, написанных на языке Python.

Журнал спектральных наблюдений представлен в табл. 2.

Потоки в эмиссионных линиях определялись двумя способами: интегрированием спектрального профиля и аппроксимацией гауссианой (эта методика применялась в основном к блендам и сильным линиям). Сначала эти величины были определены в абсолютных энергетических единицах, затем для удобства были пересчитаны в относительную шкалу $F(H\beta) = 100$. Если в одну дату наблюдений определенная линия была надежно измерена сразу на нескольких кадрах, то полученные значения усреднялись, а ошибка считалась как среднеквадратичное отклонение от среднего в данной выборке. Точность измерения интенсивности отдельной

¹<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

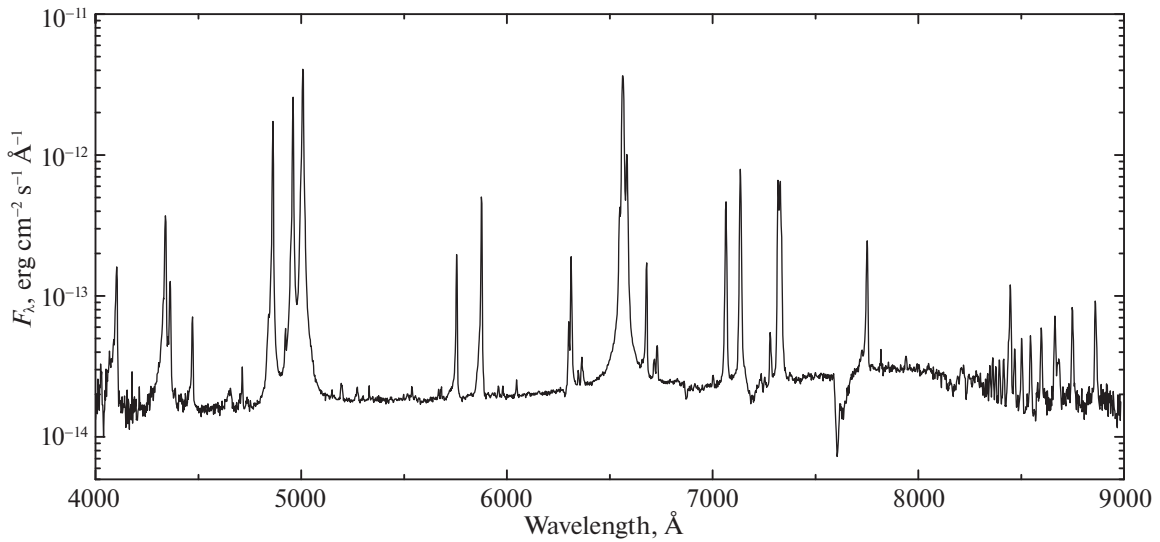


Рис. 1. Спектр Нб 12, полученный на КАС ГАИШ 13 августа 2015 г.

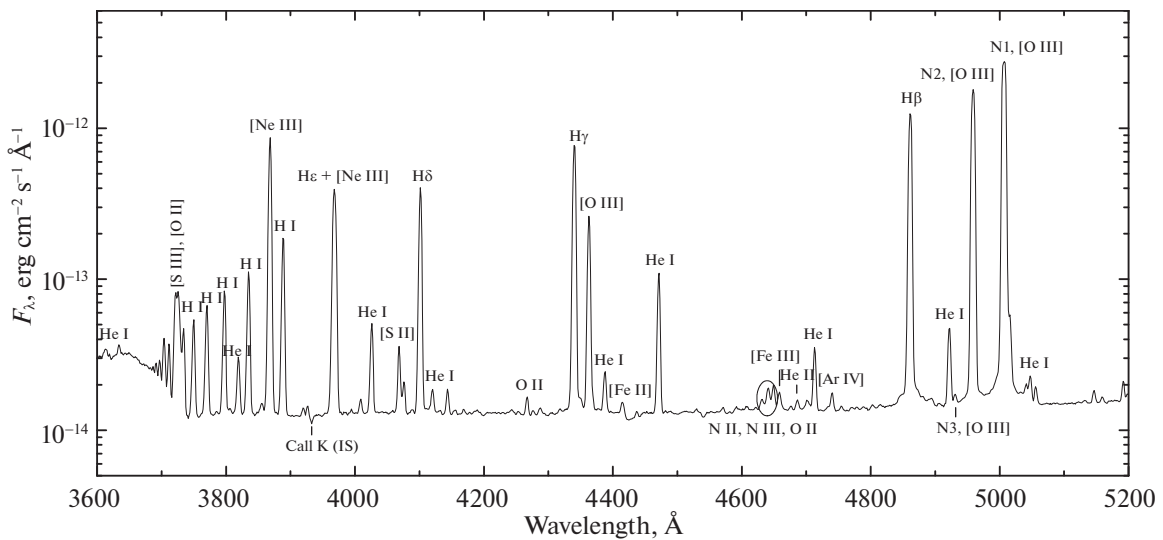


Рис. 2. Фрагмент спектра Нб 12, полученного в КГО 20 января 2020 г. (диапазон длин волн от 3600 до 5200 Å).

линии составила около 10% для спектрограмм, полученных в Крыму до замены объектива, около 7–8% — после замены объектива, и 5–6% — для спектров из КГО.

ОПИСАНИЕ СПЕКТРА

Для каждого набора спектров, полученных на КАС, было отождествлено около 50 эмиссионных линий и измерены их потоки. Наиболее интенсивны небулярные линии дважды ионизованного кислорода [OII] $\lambda 4959$ и $\lambda 5007$, водородные линии серии Бальмера, а также запрещенные линии ионов [OI], [OII], [OIII], [NII], [SII], [ArIII] и рекомбинационные

линии HeI. Кроме того, в спектре присутствуют разрешенные линии OI, OII, NII, NIII. В ближнем ИК-диапазоне сильны линии серии Пашена и запрещенные линии [SIII] (измерены на спектрах 2011, 2017 и 2018 гг.). На отдельных спектрах удалось отождествить и измерить слабые линии [SiII], [SIII], [FeIII] и некоторых других ионов, однако ошибки измерения их интенсивностей довольно велики. Пример спектра, полученного в Крыму, представлен на рис. 1.

По сравнению с техническими возможностями КАС оборудование, установленное на 2.5-м телескопе КГО, позволяет получать спектры с лучшим

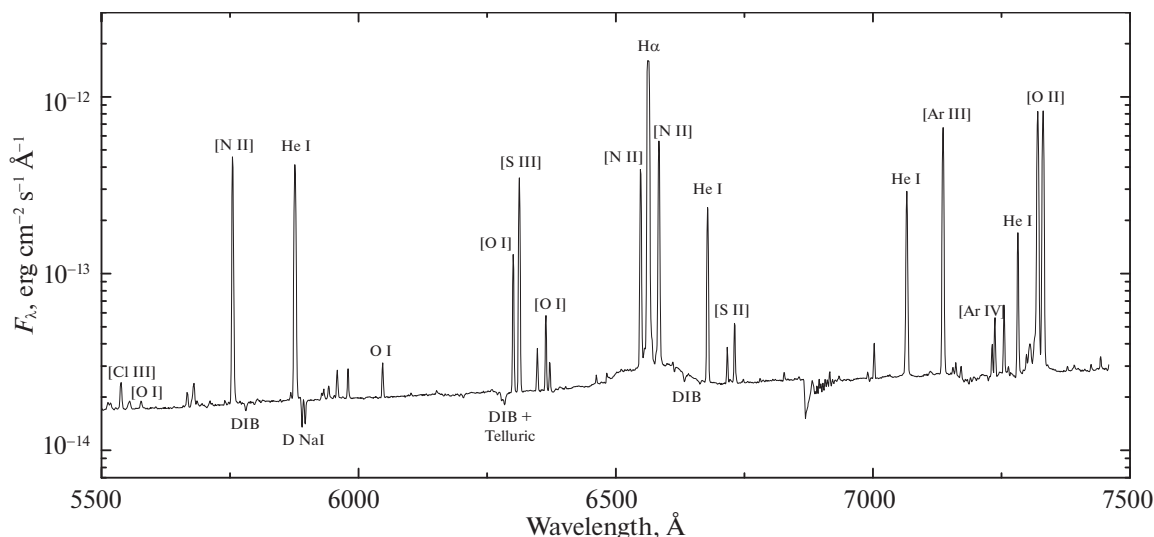


Рис. 3. Фрагмент спектра Hb 12, полученного в КГО 20 января 2020 г. (диапазон длин волн от 5500 до 7500 Å).

разрешением и более высоким отношением сигнал/шум за меньшее время экспозиций. Синий и красный диапазоны регистрируются одновременно, синий диапазон расширен в коротковолновую сторону. Таким образом, открываются новые возможности для спектрального анализа. На рис. 2 приведен фрагмент полученного в КГО спектра в диапазоне длин волн от 3600 до 5200 Å, а на рис. 3 — фрагмент этого спектра в диапазоне 5500–7500 Å.

На спектрах, полученных в КГО, в синей части ($\lambda < 4000$ Å) преобладают линии бальмеровской серии водорода и линии HeI, присутствуют разрешенные линии OI и запрещенные линии [OII], [SIII] и [NeIII]. Также по этим данным удалось измерить интенсивность слабой линии HeII $\lambda 4686$. На длине волны около $\lambda 4640$ видна группа линий NII, NIII, OII — они, по всей видимости, относятся к центральной звезде и позволяют отнести ее к ядрам ПТ со слабыми эмиссиями в спектре (так называемым *wels*, Weak Emission-Lines Star), выделенным Тылендой и др. (1993) в отдельный подкласс центральных звезд.

Спектрограммы, полученные в КГО, позволили нам измерить высоту бальмеровского скачка и определить электронную температуру туманности (см. соответствующий раздел).

Помимо богатого линейчатого спектра можно увидеть несколько абсорбционных деталей, а именно: межзвездные линии K CaII (рис. 2), D NaI и диффузные межзвездные полосы (DIB) (рис. 3). В связи с этим стоит упомянуть о поиске в спектре Hb 12 абсорбций, которые могут принадлежать холодной звезде — вероятному спутнику центральной.

В работе Хся и др. (2006) приведены три фрагмента спектра Hb 12, на которых такие абсорбции были отождествлены. Мы провели сравнение с нашими данными, полученными в КГО, и не обнаружили обсуждаемых абсорбционных деталей, что в связи с лучшим разрешением во втором случае позволяет констатировать их отсутствие (за исключением, возможно, G-полосы). Таким образом, вопрос о двойственности ядра туманности Hb 12 остается открытым.

В Приложении приведены спектральные данные для Hb 12, полученные в ходе наблюдений в 2011–2020 гг. В первых двух столбцах приведены длина волны (с точностью до 1 Å) и соответствующий ей ион. В столбцах F(year) даны относительные наблюдаемые (без исправления за межзвездное поглощение) интенсивности линий, где под “year” подразумевается отдельный набор данных (см. столбец “Обозначения” в табл. 2).

ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА СО ВРЕМЕНЕМ

Чтобы проследить, как изменялся спектр Hb 12 со временем, мы использовали данные из работ Аллера (1951), О’Делла (1963), Калера и др. (1976), Ахерна (1978), Баркера (1978), Хьюнга и Аллера (1996), Квиттер и др. (2003), Гайдука и др. (2015) и сравнили их с нашими наблюдениями, проведенными на КАС в 2011–2019 гг. и в КГО в 2019–2020 гг.

Hb 12 — компактная ПТ: размер ее самой яркой центральной области не превышает $4''$. В литературе не всегда указывается размер щели либо круговой апертуры, применявшейся при наблюдениях. Для тех случаев, когда эти сведения имеются, очевидно, что туманность полностью попадала

Таблица 3. Наблюдаемые относительные интенсивности эмиссионных линий в спектре H β 12 в шкале $F(\text{H}\beta) = 100$ и логарифм наблюдаемого потока в линии H β в единицах эрг с⁻¹ см⁻²

Источник		Баркер, 1978	Хьюнг, Аллер, 1996	Квиттер и др., 2003	КАС	КГО
Год		1972	1990	1996	2011–2019	2019–2020
λ , Å	Ион					
3727+29	[O II]	10.7	4.75	7.2	–	5.93
3869	[Ne III]	38	38.28	34	–	33.9
4101	H I	18.5	18.79	18	14.4	15.4
4340	H I	33.9	35	33.4	34.3	35.4
4363	[O III]	15.7	15	11.5	9.8	10.1
4471	He I	4.58	4.79	4.2	3.6	4.5
4686	He II	0.3	0.07	–	–	0.14
4861	H I	100	100	100	100	100
4959	[O III]	144	168.27	160	185	188
5007	[O III]	449	566.24	515	577	601
5192	[Ar III]	–	0.31	–	0.41	0.23
5517	[Cl III]	–	0.08	0.1:	–	0.08
5537	[Cl III]	–	0.21	0.2:	0.31	0.30
5755	[N II]	12.2	13.12	12.3	10.4	12.0
5876	He I	29.6	34.28	30.7	28.9	31.6
6300	[O I]	15	2.1	2.8	2.9	2.7
6312	[S III]		13.4	11	8.6	9.0
6363	[O I]	2.41	0.9	1.2	0.98	0.88
6548	[N II]	–	17.22	23.7	–	20.1
6563	H I	752	1013.9	684	663	–
6583	[N II]	68.1	60.81	63.9	74	61
6678	He I	9.59	12.11	9.3	9.9	11
6717	[S II]	0.96	0.3:	0.9	0.62	0.44
6731	[S II]	1.57	1.0:	1.6	1.28	0.88
7065	He I	–	42.85	36.4	34	38.7
7135	[Ar III]	–	72.11	62.8	61	62.6
7320+30	[O II]	124	135.25	118	103	113.7
7751	[Ar III]	–	18.88	18	17.4	–
9069	[S III]	–	124.17	117	105	–
lg(F(H β))	H I	-12.00 ± 0.01	–	-10.96 ± 0.04	-10.94 ± 0.03	-10.92 ± 0.02

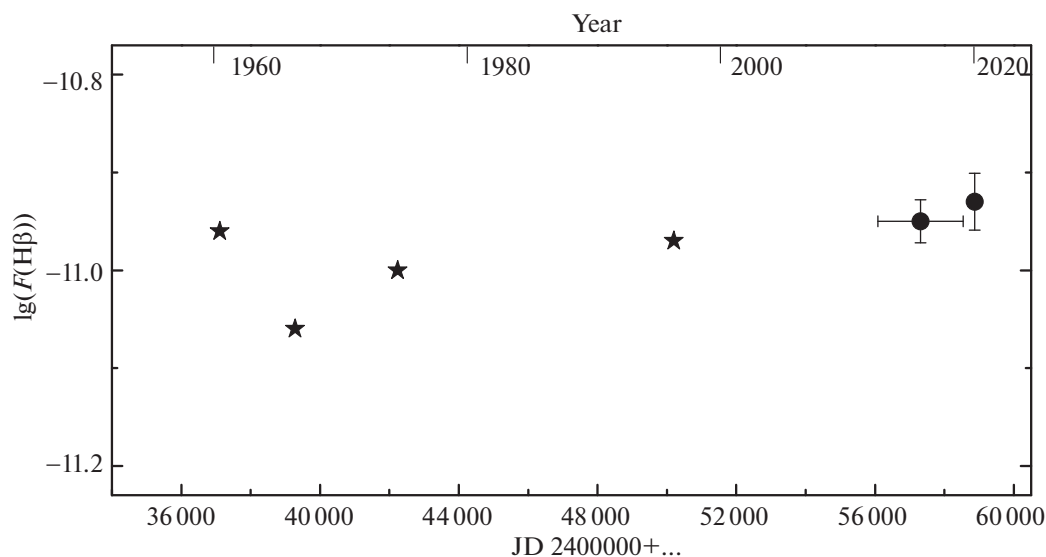


Рис. 4. Зависимость логарифма потока в линии $H\beta$ от времени. Измерения из работы Баркера (1978) ($\lg(F(H\beta)) = -12$) не показаны. Звездочки — данные из литературы, кружки — наши измерения.

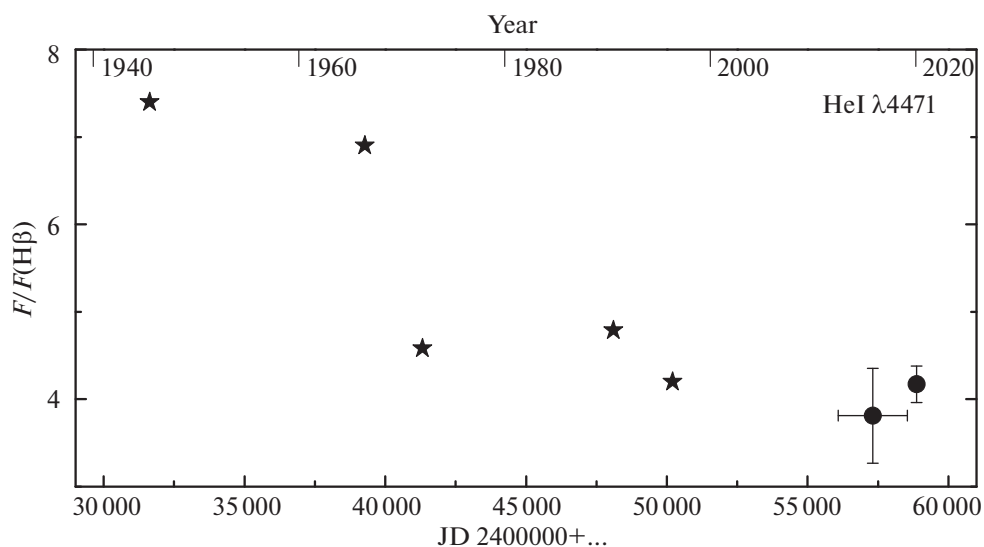


Рис. 5. Изменение со временем наблюдаемых относительных интенсивностей линии $HeI \lambda 4471$. Звездочки — данные из литературы, кружки — наши измерения.

в щель спектрографа. Это относится и к нашим наблюдениям, проведенным в 2011–2019 гг. на КАС. В 2019–2020 гг. спектры были получены в КГО с более узкой щелью, однако квазиодновременные наблюдения 2019 г. на КАС и в КГО показали, что как абсолютный поток в линии $H\beta$, так и относительные интенсивности эмиссионных линий в пределах ошибок измерений находятся в хорошем согласии. Это дает нам право включить в сравнительный анализ данные и за 2019–2020 гг., полученные в КГО.

В табл. 3 дана компилятивная сводка относительных интенсивностей некоторых эмиссионных линий из работ Баркера (1978), Хьюнга и Аллера (1996) и Квиттер и др. (2003) вместе с нашими новыми данными. В столбце КАС приведены усредненные данные, полученные на телескопе ЗТЭ в 2011–2019 гг. В столбце КГО представлены относительные интенсивности линий, измеренные в спектрах за 2019–2020 гг. Помимо этих исследований при анализе изменений в спектре $H\beta$ 12

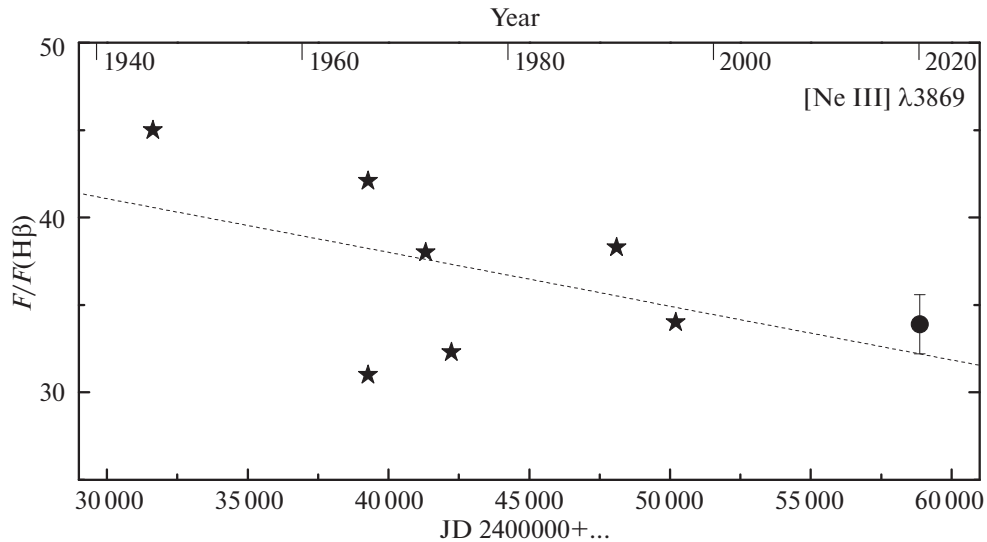


Рис. 6. Изменение со временем наблюдаемых относительных интенсивностей линии $[\text{Ne III}] \lambda 3869 \text{ \AA}$. Звездочки — данные из литературы, кружок — наше измерение. Штриховая линия представляет линейную интерполяцию всех данных.

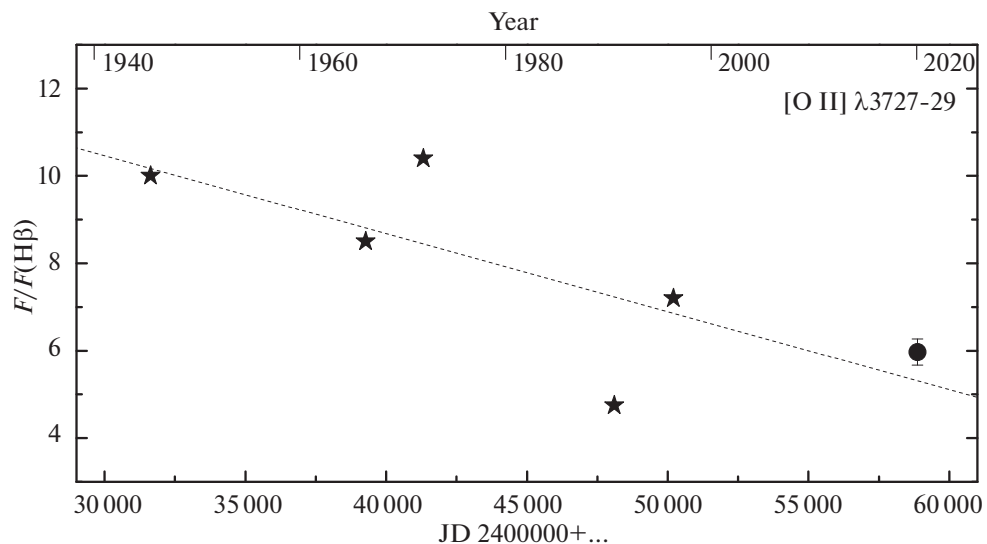


Рис. 7. Изменение со временем наблюдаемых относительных интенсивностей дублета $[\text{O II}] \lambda 3727-29$. Звездочки — данные из литературы, кружок — наше измерение. Штриховая линия представляет линейную интерполяцию всех данных.

принимались во внимание данные всех работ, перечисленных в начале раздела.

Рассмотрим, как ведет себя со временем абсолютный поток в линии $\text{H}\beta$ (рис. 4). В целом можно сказать, что поток в этой линии за время наблюдений не изменился, однако на графике заметен некоторый провал, который, если принимать во внимание измерения Баркера (1978), мог достигнуть порядка величины. Он не обнаруживает видимой корреляции с изменениями относительных интенсивностей других эмиссионных линий, и поэтому его природа остается неясной.

Анализируя данные, представленные в табл. 3, можно сделать вывод, что относительная интенсивность линий нейтрального гелия $\lambda 5876$, $\lambda 6678$ и $\lambda 7065$ не изменяется значительно в течение рассматриваемого периода (с первой половины 70-х годов прошлого века по настоящее время). Данные для $\text{He I } \lambda 4471$ имеются для более длительного временного интервала, начиная с 1945 г. (Аллер, 1951), и они свидетельствуют о возможном уменьшении относительной интенсивности этой линии (рис. 5). Эмиссионная линия ионизованного гелия $\text{He II } \lambda 4686$ в спектре $\text{H}\beta$ 12 слаба, и она

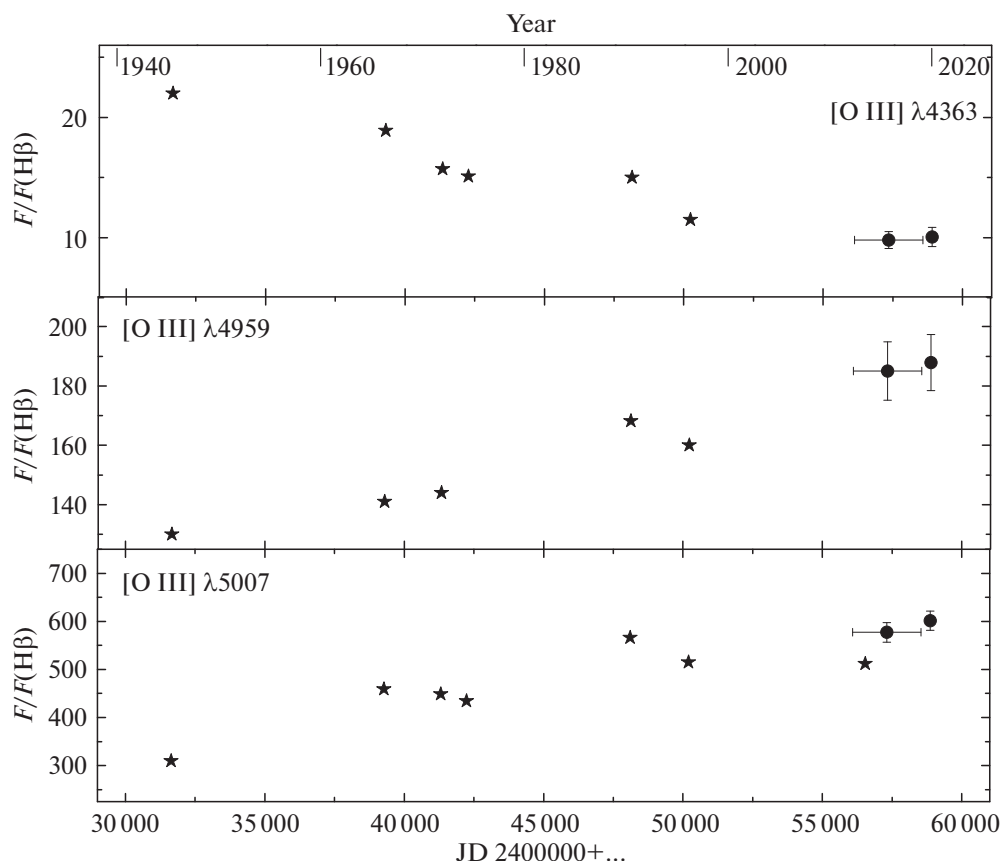


Рис. 8. Изменение со временем для наблюдаемых потоков в линиях иона O^{+2} . Звездочки — данные из литературы, кружки — наши измерения.

была измерена лишь Баркером (1978) и Хьюнгом и Аллером (1996). На спектрах, полученных в КГО, нам удалось довольно надежно измерить эту линию. Что касается поведения $He II \lambda 4686$, то за небольшой интервал времени пока не выявлено изменений, выходящих за пределы погрешностей. Ожидается, что по мере эволюции центральной звезды линии ионизованного гелия будут усиливаться.

Рассмотрим поведение запрещенных линий. Относительные интенсивности линий $[Ar III] \lambda 7135$ и $\lambda 7751$, а также запрещенной линии $\lambda 6312$ иона S^{+2} , по-видимому, пока сохраняют постоянство. С осторожностью стоит отнестись к возможной зависимости интенсивности от времени для запрещенных линий $[O I] \lambda 6300$ и $\lambda 6363$ из-за сильного разброса данных, полученных разными авторами.

За время спектральных наблюдений относительная интенсивность линии $[Ne III] \lambda 3869$ (рис. 6) несколько ослабла, однако эти оценки также имеют значительный разброс.

На рис. 7 приведен график зависимости относительных интенсивностей линий дублета $[O II] \lambda 3727$

и $\lambda 3729$. Ввиду близости этих линий в большинстве работ, в которых исследовался спектр $H\beta 12$, в том числе и в настоящей, эти линии измерены в сумме. На графике, несмотря на значительный разброс точек, можно выделить нисходящий тренд. Похожую картину показывает поведение и ИК-дублета $[O II] \lambda 7320$ и $\lambda 7330$ (см. табл. 3).

Особого внимания заслуживает поведение запрещенных линий $[O III]$, а именно, небулярных линий $\lambda 5007$ и $\lambda 4959$, а также авроральной линии $\lambda 4363$. Эти линии — одни из самых сильных и надежно измеряемых и они более других чувствительны к изменению параметров газовой оболочки и центральной звезды. По всей видимости, за рассматриваемый период имеет место, во-первых, возрастание относительных интенсивностей линий $\lambda 4959$ и $\lambda 5007$ и, во-вторых, уменьшение отношения $F(\lambda 4363)/F(H\beta)$. На рис. 8 приведен график зависимости для относительных наблюдаемых потоков линий $[O III]$ от эпохи наблюдений, наглядно иллюстрирующий эту тенденцию.

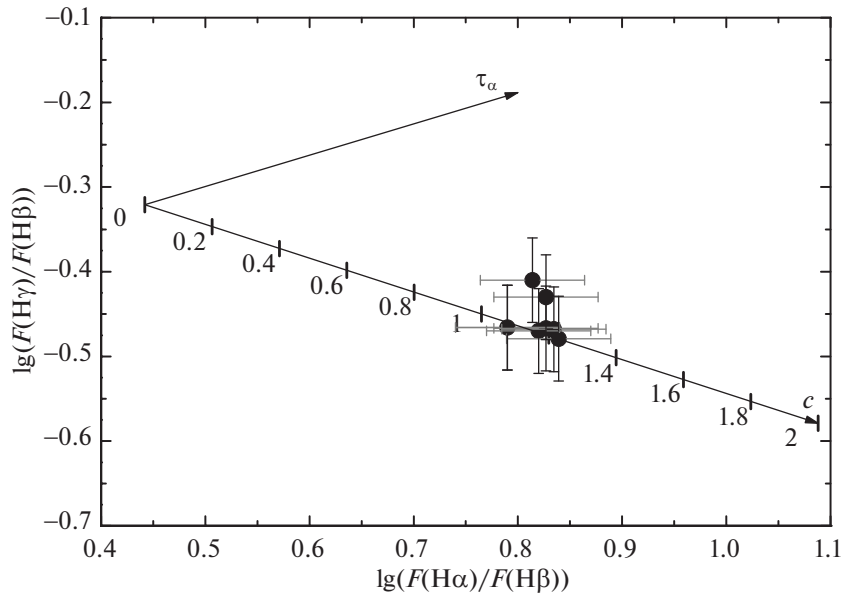


Рис. 9. Зависимость логарифма отношения $F(H\gamma)/F(H\beta)$ от логарифма отношения $F(H\alpha)/F(H\beta)$. Верхняя стрелка задает направление смещения точек по мере роста оптической толщи в линии $H\alpha$, согласно Каприотти (1964), нижняя — соответствует закону межзвездного покраснения света, согласно Ситону (1979). Закрытыми кружками представлены результаты, полученные в данной работе.

ОЦЕНКИ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА И РАССТОЯНИЯ

В настоящей работе определение межзвездного поглощения света было основано на сравнении теоретических значений относительных интенсив-

Таблица 4. Коэффициенты экстинкции и абсолютные потоки в линии $H\beta$ (в единицах эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$), рассчитанные по результатам каждого проведенного наблюдения

JD	$\alpha(H\beta)$	$\lg(F(H\beta))$
2455800	1.17	-10.90
2457248	1.22	-10.92
2457667	1.16	-10.94
2457986	1.23	-10.95
2458400	1.18	-10.92
2458690	1.17	-10.97
2450702	1.01	-10.98
2458758	1.11	-10.95
2458795	1.13	-10.91
2458869	1.08	-10.94

ностей водородных линий серий Бальмера и Пашена с наблюдаемыми. Коэффициент экстинкции $\alpha(H\beta)$ был определен с использованием около 12–15 линий для каждого набора спектров, а именно, с применением оптических линий серии Бальмера для всех спектров и дополнительно ультрафиолетовых линий этой серии (для спектров из КГО) или линий серии Пашена (для спектров, полученных на КАС). Теоретические интенсивности бальмеровских и пашеновских линий по отношению к $H\beta$ были взяты по данным работы Хаммера и Стори (1987) для следующих параметров: $T_e = 10\,000 \text{ K}$, $N_e = 10\,000 \text{ см}^{-3}$.

Кривые межзвездного покраснения $f(\lambda)$ были использованы в аппроксимации из работы Карделли и др. (1989), где величина R отношения полного поглощения к селективному принималась равной 3.2. Исправление проводилось с использованием известной формулы

$$\lg I(\lambda) - \lg F(\lambda) = c(H\beta)f(\lambda),$$

где $F(\lambda)$ и $I(\lambda)$ есть соответственно наблюдаемая и исправленная интенсивности линии, а $f(\lambda)$ обозначает используемый закон межзвездного покраснения.

В других работах межзвездное поглощение могло учитываться иными методами: с помощью определения различными способами непосредственно избытка цвета $E(B - V)$, путем сравнения радиоконтинуума с излучением водородных линий

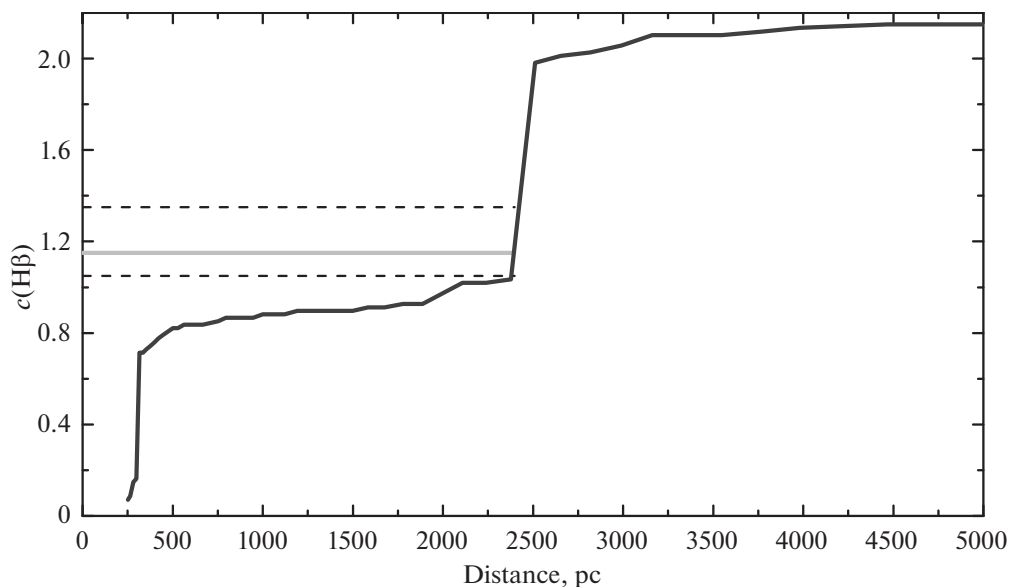


Рис. 10. Зависимость величины коэффициента экстинкции от расстояния в направлении Нб 12 по данным Грина и др. (2019) (чёрная линия). Серая линия соответствует среднему значению коэффициента экстинкции $c(H\beta) = 1.15$ по нашим данным. Штриховые линии ограничивают диапазон значений $c(H\beta)$ из литературы.

(Прейте-Мартинес, Потташ, 1983) или же с использованием большего или меньшего числа линий серий Бальмера и Пашена. Например, в работе Квиттер и др. (2003) исправление за покраснение проводилось с использованием только отношения $H\alpha$ к $H\beta$. Для сравнения, приведем здесь значения коэффициента $c(H\beta)$ для Нб 12 у других авторов: $c(H\beta) = 1.13$ (Баркер, 1978), $c(H\beta) = 1.25$ (Руди и др., 1993), $c(H\beta) = 1.35$ (Хьюнг, Аллер, 1996), $c(H\beta) = 1.05$ (Квиттер и др., 2003).

В табл. 4 приведены средние значения коэффициента экстинкции $c(H\beta)$ вместе с логарифмом абсолютного потока в линии $H\beta$ для каждой даты наблюдений. Среднее значение $c(H\beta)$ по всем нашим данным за 2011–2020 гг. составляет 1.15 ± 0.07 .

В условиях высокой плотности газа в туманности (по оценкам Хьюнга, Аллера (1996), ее значение в центральных областях может достигать величины $2 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$), помимо собственно вычисления коэффициента экстинкции, необходимо изучить вопрос о возможном самопоглощении в спектральных линиях водорода, поскольку наличие этого явления может сильно исказить результат учета межзвездного поглощения. Мы следовали процедуре, описанной в работе Бурлак и Есипова (2009), в применении к ПТ IC 4997. На рис. 9 приведен график зависимости логарифма отношения $F(H\gamma)/F(H\beta)$ от логарифма отношения $F(H\alpha)/F(H\beta)$. На график нанесены значения, полученные для каждого набора проведенных наблюдений. Видно, что точки группируются вблизи ли-

нии, соответствующей нулевому самопоглощению, а их разброс не превышает погрешности измерения.

Отдельно стоит обсудить вопрос об оценке расстояния до объекта.

Как известно, определение расстояния до ПТ является открытой проблемой. На настоящий момент для этих объектов все еще не разработано универсальной шкалы расстояний. Различные статистические и полуэмпирические методы определения расстояний до ПТ плохо согласуются между собой, и для отдельных объектов такие оценки могут расходиться в несколько раз.

Галактические ПТ в большинстве своем являются протяженными объектами, что затрудня-

Таблица 5. Оценки расстояния до Нб 12 из литературы

D , пк	Источник
6700	Джонсон и др. (1979)
3030	Кингсбург, Барлоу (1992)
2236	Кан и др. (1992)
8110	Жанг (1993)
2880	Филлипс (2002)
10460	Филлипс (2004)
2260 ± 680	Фрю и др. (2016)

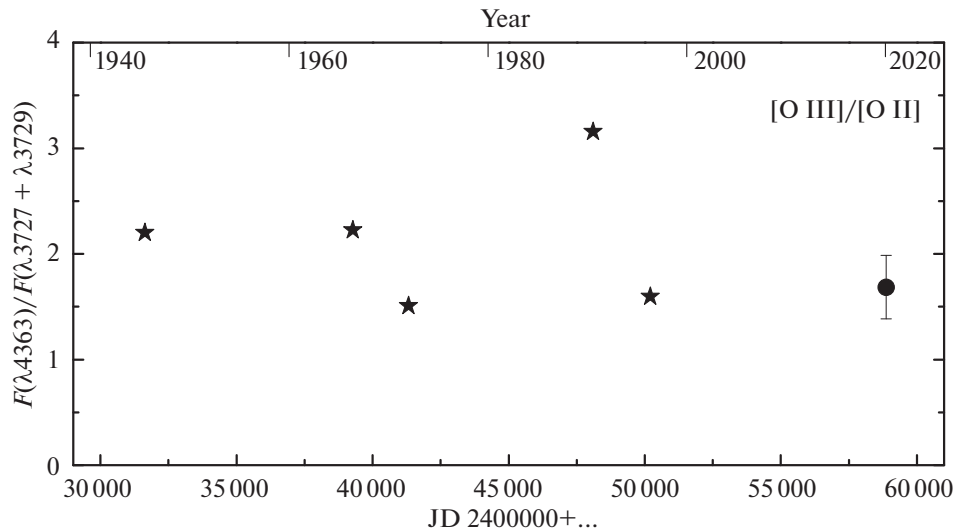


Рис. 11. Отношение интенсивностей линий [OIII] $\lambda 4363$ и [OII] ($\lambda 3727 + \lambda 3729$). Звездочки — данные из литературы, кружок — наше измерение.

ет измерение параллакса и вычисление расстояния классическим геометрическим методом. Тем не менее исследователи ПТ связывают большие надежды с миссией Gaia (Браун и др., 2018). Уже получены первые результаты. Так, Гонзалес-Сантамария и др. (2019) из общей выборки из 1571 ПТ с параллаксами в Gaia DR2 получили надежные расстояния для 211 объектов, а Черная и Уолтон (2021) представили обновленный каталог расстояний для ПТ, основанный на данных Gaia EDR3 (Браун и др., 2020). Для ПТ H β 12 параллакс пока не измерен.

Еще один перспективный метод определения расстояния основан на знании межзвездного поглощения света в направлении на объект. Доступность новых фотометрических обзоров, таких как IPHAS (фотометрический H α -обзор INT/WFC) (Дрю и др., 2005), дают возможность использовать так называемый метод экстинкции для определения расстояний до большого количества объектов. Джамманко и др. (2011) применили этот метод к выборке из 137 ПТ. Авторами были тщательно изучены характеристики метода и основные источники ошибок. Имеющиеся в литературе данные, дополненные новыми наблюдениями, позволили определить расстояния для 70 ПТ. Для H β 12 в этой работе получена довольно неопределенная оценка $D < 1000$ пк.

Мы решили оценить расстояние до H β 12, зная коэффициент экстинкции для туманности и используя карты межзвездного поглощения, построенные по данным нескольких больших обзоров (Грин и др., 2019). Эти карты позволяют определить расстояние до объекта в зависимости от

избытка цвета $E(g - r)$ в фотометрической системе SDSS. Мы пересчитали избыток цвета $E(g - r)$ в полное поглощение в полосе V как $A_V = (E(g - r) - 0.03)/0.269$ (Грин и др., 2019), а затем — в коэффициент экстинкции по формуле $c(H\beta) = 1.46A_V/R$, где $R = 3.2$.

На рис. 10 изображен полученный график зависимости $c(H\beta)$ от расстояния в направлении H β 12, показаны среднее значение $c(H\beta) = 1.15$ по нашим данным и диапазон $c(H\beta)$ от 1.05 (Квиттер и др., 2003) до 1.35 (Хьюнг, Аллер, 1996) из литературы. Сравним полученное нами значение расстояния $D \approx 2400$ пк с данными других авторов. Расстояние до H β 12 определялось неоднократно. В табл. 5 представлены некоторые оценки с указанием источника.

Наша оценка D ближе всего к оценкам Кана и др. (1992) и Фрю и др. (2016). На рис. 10 видно, что в направлении на H β 12 на расстояниях >2500 пк имеет место резкое возрастание величины поглощения, обусловленное наличием газопылевого межзвездного облака, поэтому расстояние до ПТ H β 12 не может превышать значение 2500 пк, и оценки, приведенные в работах Кингсбурга и Барлоу (1992) и, особенно, Джонсона и др. (1979), Жанга (1993) и Филлипса (2004), следует считать завышенными.

ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, мы имеем несомненные изменения в спектре H β 12 за всю историю спектральных наблюдений этого объекта. Постараемся теперь на основе полученных данных дать им интерпретацию.

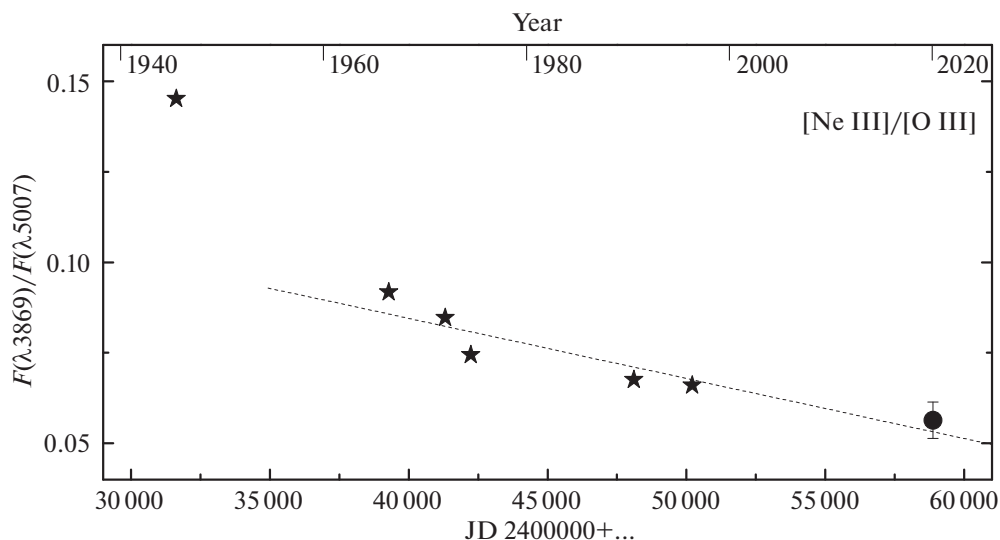


Рис. 12. Отношение интенсивностей линий [Ne III] $\lambda 3869$ и [O III] $\lambda 5007$. Звездочки — данные из литературы, кружок — наше измерение. Штриховая линия — линейная интерполяция данных без учета измерений Аллера (1951).

Изначально ожидалось, что изменения эмиссионного спектра туманности могли быть вызваны эволюцией центральной звезды. В ряде работ основным индикатором изменения температуры ядра туманности выступают небулярные линии иона O^{+2} . Так, Гайдук и др. (2015) исследовали эволюционные изменения относительной интенсивности линии [O III] $\lambda 5007$ в спектрах 20 ПТ. Для отдельных объектов авторы обнаружили увеличение со временем $F(\lambda 5007)/F(H\beta)$ и связали его с ростом температуры ионизирующего источника.

Для Hb 12 мы обнаружили рост отношения $F(\lambda 5007)/F(H\beta)$ в ~ 1.9 раза за 75 лет.

Для оптически толстых ПТ низкого возбуждения Калер (1978) предложил эмпирические соотношения, которые связывают относительные интенсивности линий $I(\lambda 5007)[O III]/I(H\beta)$ и $I(\lambda 3869)[Ne III]/I(H\beta)$ и температуру центральной звезды. Мы сравнили получаемые по предложенным формулам температуры, взяв за основу данные настоящей работы и архивные данные работы Аллера (1951). Картина получается противоречивая: в случае линии [O III] определяемая таким методом температура показывает рост за 75 лет от $T_* \approx 35\,000$ К до $T_* \approx 44\,000$ К, в то время как значения $I(\lambda 3869)[Ne III]/I(H\beta)$ приводят к более высоким оценкам температуры и соответствуют ее уменьшению от $T_* \approx 56\,000$ К в 1945 г. до $T_* \approx 49\,500$ К в 2020 г.

Ввиду возникшего противоречия температура центральной звезды была дополнительно определена нами методом энергетического баланса (Прейте-Мартинес, Потташ, 1983; Потташ, 1987).

Этот метод основан на идее энергетического равновесия между излучением звезды и окружающей газовой туманности и требует подсчета интенсивности всех линий небулярного спектра, механизм возбуждения которых связан со столкновениями. Мы получили на основе наших данных температуру около 41 000 К, что согласуется с оценкой в 42 000 К из работы Прейте-Мартинеса и Потташа (1983) почти 40-летней давности. Таким образом, возрастание температуры центральной звезды за время спектральных исследований Hb 12 пока остается под вопросом.

В поддержку неизменности температуры ионизирующего источника выступает отношение интенсивностей линий [O III] $\lambda 4363$ /[O II] ($\lambda 3727 + \lambda 3729$), которое характеризует степень ионизации в среднем по туманности. Для Hb 12 его значение, по видимому, остается без изменения на протяжении последних 75 лет, а разброс данных связан с ошибками наблюдений и неоднородностью наблюдательного материала у разных авторов (рис. 11).

Более очевидной причиной спектральной переменности представляется изменение параметров газовой оболочки. Рассмотрим наиболее характерные отношения интенсивностей линий, которые отражают физические условия в туманности.

Для зоны высокого возбуждения Hb 12 Хьюнг и Аллер (1996) получили значения параметров $N_e = 5 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 13\,600$ К. Как было показано Ахерном (1975), в случае высокой электронной концентрации ($N_e > 10^5 \text{ см}^{-3}$) отношение интенсивностей небулярных линий [Ne III] $\lambda 3869$ и [O III]

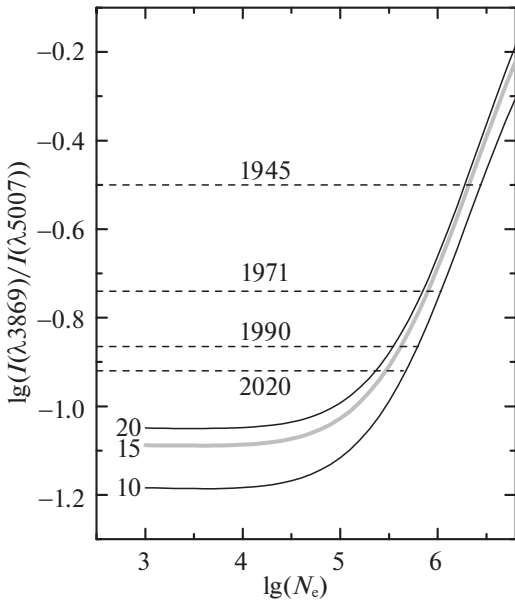


Рис. 13. Зависимость логарифма отношения $I(\lambda 3869)/I(\lambda 5007)$ от электронной концентрации. Данные 1945 г. — Аллер (1951), 1971 г. — Баркер (1976), 1990 г. — Хьюнг и Аллер (1996), 2020 г. — настоящая работа.

$\lambda 5007$ слабо зависит от T_e в интервале 10 000–20 000 К и потому может служить индикатором N_e .

На рис. 12 показано изменение со временем отношения интенсивностей этих линий по данным из литературы и нашим новым наблюдениям. С момента первых наблюдений в 1945 г. до середины 60-х годов прошлого века величина $F(\lambda 3869)/F(\lambda 5007)$ уменьшилась в ~ 1.6 раза, в последующие годы наблюдалось не такое резкое

Таблица 6. Значение $R = I(\lambda 4959 + \lambda 5007)/I(\lambda 4363)$

Год	R	Источник
1945	13.3	Аллер (1951)
1966–1967	20.8	Калер и др. (1976)
1971	24.9	Баркер (1978)
1990	32.0	Хьюнг и Аллер (1996)
1996	38.7	Квиттер и др. (2003)
2011–2019	51.1	Настоящая работа
2019–2020	52.1	Настоящая работа

падение этого отношения, а данные удовлетворительно описываются линейным уравнением.

На рис. 2 в работе Ахерна (1975) приведены теоретические зависимости $\lg(I(\lambda 3869)/I(\lambda 5007))$ от $\lg N_e$ для среднего для ПТ значения содержания ионов $N(\text{NIII})/N(\text{OIII}) = 0.22$.

Мы построили подобную диаграмму (рис. 13) при некоторых фиксированных температурах (отмечены цифрами в единицах 1000 К) с использованием коэффициентов излучения из базы *Nebulio*, упомянутой в работе Джаннини и др. (2015). Для построения теоретических кривых принималось отношение ионных содержаний $N(\text{NIII})/N(\text{OIII}) = 0.184$ по данным для Hb 12 из работы Хьюнга и Аллера (1996).

На рис. 13 мы нанесли исправленные за поглощения данные, относящиеся к Hb 12 за 1945, 1971, 1990 и 2020 гг. и получили оценки N_e для разных эпох. Так, если принимать для Hb 12 диапазон значений $T_e = 10\,000\text{--}15\,000$ К, то для первой эпохи $\lg N_e \simeq 6.3\text{--}6.4$, а для 2020 г. $\lg N_e \simeq 5.5\text{--}5.7$, что указывает на падение электронной концентрации в ~ 5 раз за 75 лет. Столь существенное изменение N_e трудно объяснить лишь расширением газовой оболочки. При скорости расширения туманности $V_{\text{exp}} \sim 16$ км/с (Миранда, Сольф, 1989) ее размер за 75 лет увеличится на 25%, что приведет к уменьшению электронной концентрации не более, чем на 60%. Следует однако учитывать, что центральная область туманности имеет сложную структуру и включает также высокоскоростные биполярные выбросы (Кларк и др., 2014).

Рассмотрим диагностическое соотношение, которое связывает небулярные и авроральную линии иона O^{+2} .

Рисунок 14 иллюстрирует изменение со временем отношения наблюдаемых потоков $F(\lambda 4959 + \lambda 5007)/F(\lambda 4363)$ линий [OIII]. График показывает систематическое увеличение его значения: за 75 лет величина $F(\lambda 4959 + \lambda 5007)/F(\lambda 4363)$ возросла в ~ 4 раза.

Мы исправили наблюдаемые потоки линий иона O^{+2} за поглощение с $\alpha(\text{H}\beta) = 1.15$ и привели в табл. 6 значения $R = I(\lambda 4959 + \lambda 5007)/I(\lambda 4363)$ по данным из литературы и собственным наблюдениям. Несомненное увеличение R свидетельствует об изменении параметров зоны формирования линий [OIII].

Предположим, что электронная концентрация не менялась за все время спектральных наблюдений. Примем для нее значение $N_e = 5 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ из работы Хьюнга и Аллера (1996). Оценим T_e для разных эпох, используя программу 5Level (Де Робертис и др., 1987). Получено, что электронная температура уменьшилась от 22 000 К в 1945 г.

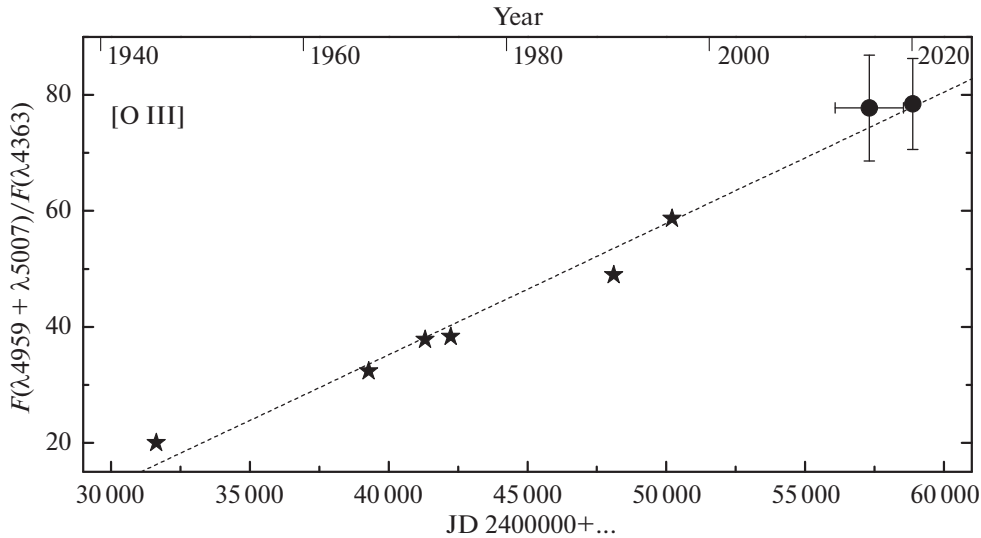


Рис. 14. Зависимость отношения наблюдаемых потоков линий [OIII] от времени: звездочки — данные из литературы, кружки — наши измерения. Штриховая линия представляет линейную интерполяцию всех данных.

до 10 650 К в 2020 г. Для момента наблюдений Хьюнга и Аллера (1996) в 1990 г. получено значение $T_e \approx 13\,000$ К. Если для последних десятилетий (1990–2020 гг.) электронная температура имеет вполне приемлемые значения, то для эпохи первых наблюдений (1945–1966 гг.) T_e чрезвычайно высока и для ее уменьшения требуется увеличить электронную концентрацию.

Как было показано выше, температура центральной звезды на протяжении последних 40 лет сохраняет постоянство, поэтому пока не ясна причина значительных изменений параметров внутренней области ПТ.

Поскольку параметры газовой оболочки Нб 12 с использованием диагностических диаграмм определялись неоднократно (см., в частности, Хьюнг, Аллер, 1996; Квиттер и др., 2003), а диагностические соотношения $F(\lambda 6548 + \lambda 6583)/F(\lambda 5755)$ [NII], $F(\lambda 6717)/F(\lambda 6731)$ [SII], $F(\lambda 7135 + \lambda 7751)/F(\lambda 5191)$ [ArIII] определяются не вполне уверенно, здесь мы этот метод применять не будем. Однако в нашей работе впервые для туманности был измерен бальмеровский скачок, что позволило оценить T_e в зоне свечения водорода.

Электронная температура газа может быть вычислена в соответствии с формулой (Лиу и др., 2001)

$$T_e(BJ) = 368 \left(1 + 0.259 \frac{\text{He}^+}{\text{H}^+} + 3.409 \frac{\text{He}^{2+}}{\text{H}^+} \right) \times \left(\frac{BJ}{I(\text{H}11)} \right)^{-3/2},$$

где He^+/H^+ и $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$ выражают относительные содержания в туманности нейтрального и ионизованного гелия соответственно, BJ есть величина бальмеровского скачка, определяющаяся как разность плотности интенсивности непрерывного спектра туманности до и после скачка, а $I(\text{H}11)$ обозначает интенсивность в линии водорода $\lambda 3771$. Для Нб 12 на спектре, полученном в КГО в 2020 г., был измерен бальмеровский скачок, и его величина составила $BJ = 7.06 \times 10^{-13}$ эрг см^{-2} с^{-1} \AA^{-1} . Исправленная за поглощение интенсивность линии $I(\text{H}11)$ равна 7.60×10^{-12} эрг см^{-2} с^{-1} , относительное содержание нейтрального гелия по данным Хьюнга и Аллера (1996) составляет $\text{He}^+/\text{H}^+ = 7.04 \times 10^{-5}$, а содержание ионизованного гелия пренебрежимо мало. Расчет по указанной формуле дает значение $T_e(BJ) \approx 12\,980$ К.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты спектральных наблюдений в 2011–2020 гг. молодой компактной ПТ Нб 12. Измерены абсолютные потоки линии $\text{H}\beta$ и получены относительные интенсивности около 50 эмиссионных линий туманности в диапазоне $\lambda 3687$ – 9532 .

По линиям водородных серий Бальмера и Пашена был найден коэффициент экстинкции $c(\text{H}\beta)$, позволивший провести редукцию данных за межзвездное покраснение и оценить расстояние до туманности путем анализа карт межзвездного поглощения в Галактике.

По новым и опубликованным ранее данным изучено поведение потока в линии $H\beta$ и относительных интенсивностей отдельных линий за время спектральных наблюдений Hb 12 с 1945 по 2020 гг. Обнаружен ряд вероятных трендов, наиболее значительным из которых представляется усиление относительных интенсивностей небулярных линий и ослабление авроральной линии иона O^{+2} .

Рост со временем относительной интенсивности линии [OIII] $\lambda 5007$ мог быть связан с увеличением температуры ионизирующего источника. Однако поведение относительной интенсивности линии [NIII] $\lambda 3869$, которая не обнаружила усиления, а показала ниспадающий тренд, не поддерживает эту гипотезу. Кроме того, оценка температуры ядра туманности, выполненная методом энергетического баланса, $T_* \approx 41\,000$ К практически совпадает с определением почти 40-летней давности (Прейте-Мартинес, Потташ, 1983).

Таким образом, сделан вывод о том, что переменность спектра Hb 12 обусловлена прежде всего изменением параметров туманности, а не эволюцией центральной звезды в post-AGB стадии.

Отношение потоков суммы небулярных линий к авроральной иона O^{+2} $R = I(\lambda 5007 + \lambda 4959)/I(\lambda 4363)$ показало линейный тренд, а его значение увеличилось в 4 раза с 1945 по 2020 гг. Получены оценки электронной температуры для разных эпох. Показано, что значение T_e уменьшается со временем. Не исключается уменьшение и электронной концентрации в зоне образования линий [OIII]. Остается открытым вопрос о причинах изменения параметров внутренней области ПТ.

По результатам измерений бальмеровского скачка была определена электронная температура туманности в зоне свечения линий H γ .

Кроме того, полученные в КГО спектры исследовались на наличие абсорбционных деталей, которые могли бы относиться к спектру холодного спутника центральной звезды. Следы компаньона обнаружены не были.

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акер и др. (A. Acker, B. Raytchev, J. Koeppen, and B. Stenholm), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 237 (1991).
2. Архипова В.П., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Есипов В.Ф., Шенаврн В.И. Письма в *Астрон. журн.* **46**, 100 (2020) [*V.P. Arhipova, et al., Astron. Lett.* **46**, 100 (2020)].
3. Аллер (L. Aller), *Astrophys. J.* **113**, 125 (1951).
4. Ахерн (F. Ahern), *Astrophys. J.* **197**, 635 (1975).
5. Ахерн (F. Ahern), *Astrophys. J.* **223**, 901 (1978).
6. Баркер (T. Barker), *Astrophys. J.* **219**, 914 (1978).
7. Блекер (T. Blöcker), *Astron. Astrophys.* **299**, 755 (1995).
8. Браун и др. (A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al. (Gaia Collab.)), *Astron. Astrophys.* **616**, 10 (2018).
9. Браун и др. (A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevey, D.W. Evans, et al. (Gaia Collab.)), arXiv: 2012.01533 (2020).
10. Бурлак М.А., Есипов В.Ф., Письма в *Астрон. журн.* **36**, 792 (2010) [*M.A. Burlak, et al., Astron. Lett.* **36**, 752 (2010)].
11. Вайтет и др. (N.M.H. Vaytet, A.P. Rushton, M. Lloyd, J.A. López, J. Meaburn, T.J. O'Brien, D.L. Mitchell, and D. Pollacco), *MNRAS* **398**, 385 (2009).
12. Вассилиадис, Вуд (E. Vassiliadis and P.R. Wood), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **92**, 125 (1994).
13. Гайдук и др. (M. Hajduk, P.A.M. van Hoof, K. Gesicki, A.A. Zijlstra, S.K. Górny, and M. Gładkowski), *Astron. Astrophys.* **567**, A15 (2014).
14. Гайдук и др. (M. Hajduk, P.A.M. van Hoof, and A.J. Zijlstra), *Astron. Astrophys.* **573**, A65 (2015).
15. Глушнева 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).
16. Гонзалес-Сантамария и др. (I. González-Santamaría, M. Manteiga, A. Manchado, A. Ulla, and C. Dafonte), *Astron. Astrophys.* **630**, A150 (2019).
17. Грин и др. (G.M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, and D. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **887**, 93 (2019).
18. Де Марко и др. (O. De Marco, T.C. Hillwig, and A.J. Smith), *Astron. J.* **136**, 323 (2008).
19. Де Робертис и др. (M.M. De Robertis, R.J. Dufour, and R.W. Hunt), *JRASC* **81** (1987).
20. Джаннини и др. (T. Giannini, S. Antonucci, B. Nisini, F. Bacciotti, and L. Podio), *Astrophys. J.* **814**, 52 (2015).

21. Джамманко и др. (C. Giammanco, S.E. Sale, R.L.M. Corradi, M.J. Barlow, K. Viironen, L. Sabin, M. Santander-Garcia, D.J. Frew, et al.), *Astron. Astrophys.* **525**, A58 (2011).
22. Джонсон и др. (H.M. Johnson, B. Balick, and A.R. Thompson), *Astrophys. J.* **233**, 919 (1979).
23. Дрю и др. (J.E. Drew, R. Greimel, M.J. Irwin, A. Aungwerojwit, M.J. Barlow, R.L.M. Corradi, J.J. Drake, B.T. Gänsicke, et al.), *MNRAS* **362**, 753 (2005).
24. Жанг (C.Y. Zhang), *Astrophys. J.* **410**, 239 (1993).
25. Жанг, Квок (C.Y. Zhang and S. Kwok), *Astron. Astrophys.* **237**, 479 (1991).
26. Калер (J.B. Kaler), *Astrophys. J.* **220**, 887 (1978).
27. Калер и др. (J.B. Kaler, L.H. Aller, and S.J. Czyzak), *Astrophys. J.* **203**, 636 (1976).
28. Кан и др. (J.H. Cahn, J.B. Kaler, and L. Stanghellini), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **94**, 399 (1992).
29. Каприотти (E.R. Capriotti), *Astrophys. J.* **140**, 632 (1964).
30. Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
31. Квереза и др. (C. Quireza, H.J. Rocha-Pinto, and W.J. Maciel), *Astron. Astrophys.* **475**, 217 (2007).
32. Квиттер и др. (K.B. Kwitter, R.B.C. Henry, and J.B. Milingo), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 80 (2003).
33. Квок, Хсиа (S. Kwok and C.H. Hsia), *Astrophys. J.* **660**, 341 (2007).
34. Кингсбург, Барлоу (R.L. Kingsburg and M.J. Barlow), *MNRAS* **257**, 317 (1992).
35. Кларк и др. (D.M. Clark, J.A. López, M.L. Edwards, and C. Winge), *Astron. J.* **148**, 98 (2014).
36. Кондратьева (L.N. Kondratyeva), *Astron. and Astrophys. Transactions* **24**, 291 (2005).
37. Костякова Е.Б., Архипова В.П., *Астрон. журн.* **86**, 1237 (2009).
38. Лиу и др. (X.-W. Liu, S.-G. Luo, M.J. Barlow, I.J. Danziger, P.J. Storey), *MNRAS* **327**, 141 (2001).
39. Лухман, Риеке (K.L. Luhman and G.H. Rieke), *Astrophys. J.* **461**, 298 (1996).
40. Миллер Бертолами (M.M. Miller Bertolami), *Astron. Astrophys.* **588**, A25 (2016).
41. Миранда, Сольф (L.F. Miranda and J. Solf), *Astron. Astrophys.* **244**, 353 (1989).
42. О'Делл (C.R. O'Dell), *Astrophys. J.* **138**, 293 (1963).
43. Осава (R. Ohsawa, T. Onaka, I. Sakon, M. Matsuura, and H. Kaneda), *Astron. J.* **151**, 93 (2016).
44. Пеймберт (M. Peimbert), *Planetary Nebulae, Observation and Theory* (Ed. Y. Terzian, Dordrecht: Reidel), *IAU Symp.* **76**, 215 (1978).
45. Перинотто (M. Perinotto), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **76**, 687 (1991).
46. Пиклес (A.J. Pickles), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **59**, 33 (1985).
47. Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В. и др., *Письма в Астрон. журн.* **46**, 894 (2020) [S.A. Potanin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 837 (2020)].
48. Потташ (S.R. Pottasch), *Планетарные туманности* (М.: Мир, 1987).
49. Прейте-Мартинес, Потташ (A. Preite-Martinez and S.R. Pottasch), *Astron. Astrophys.* **126**, 31 (1983).
50. Руди и др. (R.J. Rudy, G.S. Rossano, P. Erwin, R.C. Puetter, and W.A. Feibelman), *Astrophys. J.* **105**, 1002 (1993).
51. Сергеев, Хайсбергер (S.G. Sergeev and F. Heisberger), *A Users Manual for SPE*. Wien (1993).
52. Ситон (M.J. Seaton), *MNRAS* **187**, 73 (1979).
53. Тыленда и др. (R. Tylenda, A. Acker, and B. Stenholm), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **102**, 595 (1993).
54. Фаундес-Абанс, Масьель (M. Faúndez-Abans and W.J. Maciel), *Astron. Astrophys.* **158**, 228 (1986).
55. Филлипс (J.P. Phillips), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **139**, 199 (2002).
56. Филлипс (J.P. Phillips), *MNRAS* **353**, 589 (2004).
57. Фрю и др. (D.J. Frew, Q.A. Parker, and I.S. Bojčić), *MNRAS* **455**, 1459 (2016).
58. Хаббл (E. Hubble), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **33**, 174 (1921).
59. Хаммер, Стори (D.G. Hummer and P.J. Storey), *MNRAS* **224**, 801 (1987).
60. Хсиа и др. (C.H. Hsia, W.H. Ip, and J.Z. Li), *Astrophys. J.* **131**, 3040 (2006).
61. Хьюнг, Аллер (S. Hyung and L. Aller), *MNRAS* **278**, 551 (1996).
62. Чернай, Уотсон (N. Chornay and N.A. Walton), *arXiv:2102.13654v1* (2021).
63. Эскудеро и др. (A.V. Escudero, R.D.D. Costa, and W.J. Maciel), *Astron. Astrophys.* **414**, 211 (2004).
64. Янг и др. (B.W. Jiang, Ke Zhang, A. Li, and C.M. Lisse), *Astrophys. J.* **765**, 72 (2013).

Приложение: спектральные данные для Нб 12

Таблица 7. Наблюдаемые интенсивности эмиссионных линий, выраженные в единицах $F(H\beta) = 100$, которые были получены в ходе наблюдений на КАС в 2011–2019 гг.

λ , Å	Ион	F(11)	F(15)	F(16)	F(17)	F(18)	F(19)	F(19a)	F(19b)
4101	H I	12.3	18.3	14.2	—	15.8	11.3	—	—
4340	H I	33.9	33.2	34.1	37.2	34.0	31.1	39.1	34.2
4363	[O III]	10.0	9.6	9.4	10.4	9.5	9.18	12.4	8.4
4471	He I	3.68	4.08	3.41	3.40	3.37	3.91		
4387	He I	—	—	—	—	—	—	0.69	—
4713	He I	0.66	0.71	0.76	—	—	1.59	0.96	0.91
4861	H I	100	100	100	100	100	100	100	100
4920	He I	—	—	—	—	—	—	2.0	0.99
4959	[O III]	183	181	189	181	186	203	183	167
5007	[O III]	574	564	586	571	584	629	570	522
5147	[Fe IV]	—	—	—	—	—	0.14	—	—
5159	[Fe II]	—	—	—	—	—	0.12	—	—
5192	[Ar III]	0.44	0.27	—	—	0.37	0.60	0.47	0.31
5270	[Fe III]	0.37	—	—	—	—	0.61	0.38	0.44
5517	[Cl III]	—	—	—	—	0.16	—	—	—
5537	[Cl III]	—	0.26	0.29	—	0.40	0.30	0.36	0.24
5577	[O I]	0.89	0.39	0.43	0.78	—	0.42	0.16	0.30
5666	N II	—	—	0.16	—	—	—	—	—
5680	N II	—	—	0.28	—	—	0.17	0.59	0.29
5755	[N II]	10.7	9.15	11.7	9.67	9.70	8.65	11.2	8.42
5876	He I	28.0	27.4	31.5	26.8	30.3	24.2	29.3	23.2
5959	O I	—	0.23	0.35	—	0.21	0.19	0.43	0.24
5979	Si II	—	0.18	0.27	—	0.20	0.24	0.39	0.17
6048	O I	—	0.31	0.40	0.26	0.26	0.23	0.38	0.24
6300	[O I]	4.63	2.43	2.91	2.93	3.29	2.47	2.91	2.45
6312	[S III]	8.02	8.56	8.40	7.88	8.55	7.69	9.54	7.48
6347	Si II	—	0.39	0.45	0.32	—	0.33	0.43	0.27
6363	[O I]	0.77	0.99	1.20	0.77	0.92	0.70	1.40	0.81
6563	H I	662	690	671	671	683	—	641	626
6584	[N II]	65.0	71.0	95.0	79.0	80.0	84.5	73.2	62.8
6678	He I	9.98	9.05	10.53	8.80	9.60	8.67	10.8	7.98

Таблица 7. Окончание

λ , Å	Ион	F(11)	F(15)	F(16)	F(17)	F(18)	F(19)	F(19a)	F(19b)
6717	[S II]	0.62	0.55	0.64	0.57	0.99	0.43	0.58	0.77
6731	[S II]	1.21	1.17	1.29	1.28	1.24	0.96	1.62	1.46
7002	O I	—	—	0.25	—	—	0.23	0.58	0.22
7065	He I	34.73	33.12	33.35	36.65	32.70	23.5	39.2	26.7
7135	[Ar III]	63.07	60.27	60.18	64.11	60.29	43.1	69.0	47.8
7236	C II	—	—	0.85	—	0.85	0.46	—	0.74
7253	O I	0.76	0.52	0.52	—	0.85	0.40	0.61	0.70
7281	He I	3.45	2.97	2.97	—	5.08	3.14	3.48	2.55
7325	[O II]	126	97.56	98.1	98	97	71.0	120.1	79.9
7376	?	—	—	—	—	—	—	0.26	—
7467	N I?	—	—	—	—	—	—	0.23	—
7751	[Ar III]	21.06	15.63	15.63	19.51	17.6	11.3	17.4	—
8323	H I	—	0.06	0.11	0.12	0.20	0.15	—	—
8334	H I	—	0.23	0.20	0.24	0.28	0.24	—	—
8346	H I	—	0.50	0.58	0.54	0.44	0.55	—	—
8361	He I	1.17	0.93	1.03	0.96	1.10	0.96	—	—
8375	H I	0.68	0.61	0.68	0.57	0.57	0.67	—	—
8392	H I	1.04	0.94	1.05	0.88	0.74	0.81	—	—
8413	H I	1.08	1.09	1.09	1.11	1.09	0.84	—	—
8442	H I/O I	10.4	8.45	7.63	7.77	9.63	7.05	10.2	—
8467	H I	2.19	1.77	1.42	1.56	1.71	1.44	—	—
8502	H I	2.87	2.24	2.19	1.95	2.22	2.02	2.82	—
8545	H I	3.22	2.41	2.30	2.17	2.67	2.53	3.12	—
8598	H I	3.65	3.11	2.35	2.59	3.34	2.43	4.16	—
8665	H I	5.40	4.19	5.11	3.82	4.33	3.36	3.50	—
8750	H I	6.32	4.51	4.06	4.57	5.20	3.64	5.27	—
8862	H I	8.19	5.65	5.36	6.07	—	4.51	6.02	—
9015	H I	10.9	—	7.05	7.31	—	5.24	7.89	—
9069	[S III]	119	—	—	82.7	102	—	92.9	—
9229	H I	—	—	—	11.64	—	—	—	—
9532	[S III]	—	—	—	198	—	—	—	—

Таблица 8. Наблюдаемые интенсивности эмиссионных линий, выраженные в единицах $F(H\beta) = 100$, которые были получены в ходе наблюдений на 2.5-м телескопе КГО 7 ноября 2019 г. и 20 января 2020 г.

$\lambda, \text{\AA}$	Ион	F(19c)	F(20)	$\lambda, \text{\AA}$	Ион	F(19c)	F(20)
3687	H I	—	0.54	5273	[Fe III]	0.31	0.23
3692	H I	—	0.60	5299	O I	—	0.10
3697	H I	—	0.67	5513	O I	—	0.07
3705	He I	0.75	1.20	5517	[Cl III]	—	0.08
3712	H I	0.74	1.05	5537	[Cl III]	—	0.30
3726	[SIII]/[OII]	6.12	5.75	5555	O I	—	0.14
3734	H I	1.16	1.41	5577	[O I]	—	0.12
3750	H I	—	1.89	5667	N II	—	0.32
3771	H I	—	2.34	5680	N II	—	0.19
3798	H I	—	3.06	5755	[N II]	10.5	12.1
3819	He I	1.07	0.84	5868	Si II	—	0.04
3835	HI/HeI	4.02	4.04	5876	He I	26.8	31.6
3869	[Ne III]	31.8	33.9	5932	N II	—	0.12
3889	H I	7.01	7.33	5942	N II	—	0.20
3967	[Ne III]	18.2	20.6	5958	O I	0.30	—
4009	[NeIII]/HI	—	0.19	5978	Si II	0.28	0.23
4026	He I	—	1.68	6048	O I	0.58	0.33
4069	[S II]	1.16	0.97	6300	[O I]	0.86	2.69
4076	[S II]	—	0.33	6312	[S III]	8.97	10.6
4101	H I	15.3	15.4	6347	Si II	0.42	0.42
4121	He I	0.32	0.28	6363	[O I]	0.86	0.91
4144	He I	0.29	0.24	6371	Si II	0.30	0.26
4340	H I	35.4	33.3	6461	N II	0.11	0.07
4363	[O III]	10.5	10.1	6481	N II	0.11	0.10
4388	He I	0.57	0.53	6548	[N II]	21.2	19.9
4414	[Fe II]	—	0.26	6563	H I	—	—
4471	He I	4.49	4.17	6584	[N II]	65.9	61.3
4631	N II	—	0.15	6678	He I	11.0	11.8
4641	N III	—	0.34	6717	[S II]	0.65	0.44
4649	O II	—	0.31	6731	[S II]	1.31	0.88
4676	O II	—	0.04	7002	O I	0.48	0.39
4686	He II	—	0.14	7065	He I	38.7	39.0

Таблица 8. Окончание

λ , Å	Ион	F(19c)	F(20)	λ , Å	Ион	F(19c)	F(20)
4701	[Fe III]	—	0.24	7136	[Ar III]	62.6	67.0
4713	He I	1.13	0.93	7155	[Fe II]	—	0.10
4740	[Ar IV]	0.19	0.22	7161	He I	—	0.11
4861	H I	100	100	7172	[Ar IV]	0.17	0.16
4921	He I	1.58	1.49	7232	C II	—	0.36
4932	[O III]	—	0.15	7236	[Ar IV]	1.44	0.75
4959	[O III]	186	188	7254	O I	1.10	0.98
5007	[O III]	598	601	7281	He I	2.76	3.26
5047	Si II	0.28	0.29	7307	O III?	1.05	1.13
5056	Si II	0.25	0.22	7319	[O II]	57.4	65.1
5147	[Fe IV]	0.22	0.18	7330	[O II]	46.3	52.6
5191	[ArIII]/[NI]	0.21	0.25	7377	[Ni II]	—	0.08
5197	[N I]	—	0.12	7444	N II	—	0.13
5263	[Fe II]	0.16	0.08				