

# ПОЛЯРИЗАЦИЯ И МОДЕЛЬ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ УГЛЕРОДНОГО POST-AGB ОБЪЕКТА IRAS 22272+5435 (V354 LAC)

© 2025 г. Н. П. Иконникова<sup>1\*</sup>, Б. С. Сафонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 08.07.2025 г.

После доработки 19.08.2025 г.; принята к публикации 19.08.2025 г.

Представлены наблюдения углеродного post-AGB-объекта IRAS 22272+5435, выполненные в полосах 550, 625 и 880 нм методом дифференциальной спекл-поляриметрии на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории. Во всех полосах была обнаружена оболочка на расстояниях 1'' от звезды. Инфракрасный (ИК) источник IRAS 22272+5435 связан с полуправильной переменной звездой V354 Lac. Помимо квазипериодической переменности, вызванной пульсациями, в период с 1996 по 2004 г. наблюдалось увеличение блеска в ближнем ИК-диапазоне (KLM), обусловленное дополнительным выбросом пыли (Иконникова и др., 2025). Построены модели околозвездной пылевой оболочки, которые хорошо (в рамках принятых модельных предположений) воспроизводят наблюдаемое распределение энергии в спектре и распределение поляризованного потока в видимом диапазоне. Модель согласуется с наблюдениями, выполненными методом дифференциальной спекл-поляриметрии в 2020 г. Получены следующие параметры звезды и ее пылевой оболочки. Для расстояния  $d = 1410$  пк, полученного на основе данных о параллаксе из GAIA DR3, светимость звезды составляет  $L = 6600 L_{\odot}$ . Пылевая оболочка в нашей модели состоит из четырех компонентов, сформированных изотропным ветром и сверхветром на стадии AGB, а также изотропным ветром и экваториальным выбросом в фазе post-AGB. Массы пыли в этих оболочках составляют  $3 \times 10^{-9}$ ,  $6.9 \times 10^{-7}$ ,  $3 \times 10^{-4}$  и  $1.3 \times 10^{-4} M_{\odot}$  соответственно. Увеличение ИК-потока в 1996–2004 г. объясняется в модели отдельным выбросом пылевого облака массой  $6 \times 10^{-10} M_{\odot}$ , скорость которого оценивается в 60 км/с.

**Ключевые слова:** AGB и post-AGB-звезды, эволюция, поляризация, переменные звезды, пылевые оболочки, IRAS 22272+5435, V354 Lac.

DOI: 10.31857/S0320010825040037

## 1. ВВЕДЕНИЕ

ИК-источник IRAS 22272+5435 представляет собой звезду на поздней стадии эволюции, прошедшую фазу асимптотической ветви гигантов (AGB). Звезды на этой стадии обладают протяженными атмосферами вокруг своих ядер, что делает их спектры схожими со спектрами сверхгигантов. Кроме того, они окружены газопылевыми оболочками, состоящими из вещества, выброшенного во время тепловых импульсов на стадии AGB. Распределение энергии в спектре IRAS 22272+5435 в оптическом и ИК-диапазонах имеет двугорбый вид с двумя максимумами, соответствующими излучению фотосферы звезды и отделившейся пылевой оболочки (Ван дер Вин и др., 1989). ИК-источник IRAS 22272+5435 связан с яркой звездой BD+54°2787=HD 235858=SAO 034504=V354 Lac с координатами  $\alpha = 22^{\text{h}}29^{\text{m}}10^{\text{s}}$ ,  $\delta = +54^{\circ}51'06''$  (2000).

Параметры атмосферы звезды ( $T_{\text{eff}} = 5600$  К,  $\log g = 0.5$ ) были впервые определены Зачем и др. (1995) и впоследствии уточнены в работах Зача и др. (1999), Редди и др. (2002), Клочковой и др. (2009) и Де Смедта и др. (2016). Все полученные оценки демонстри-

руют хорошее согласие между собой, что подтверждает надежность определенных параметров. Химический состав атмосферы IRAS 22272+5435 был детально исследован в ряде работ. В пионерской работе Зача и др. (1995) впервые был обнаружен дефицит железа ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.49$ ) и повышенное содержание  $\alpha$ -элементов. Последующие исследования подтвердили эти особенности и дополнительно обнаружили значительное превышение содержания  $s$ -элементов (Ba, La, Ce, Nd) (Клочкова и др., 2009). Де Смедт и др. (2016) определили содержание 32 элементов и получили уточненные значения металличности ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.77 \pm 0.12$ ) и отношения  $\text{C}/\text{O} = 1.46 \pm 0.26$ . Эти результаты согласуются с типичным химическим составом углеродных post-AGB звезд, демонстрирующих эффекты ядерного синтеза и конвективного перемешивания на предыдущих стадиях эволюции.

Звезда является полуправильной переменной и имеет обозначение V354 Lac в Каталоге переменных звезд (Самусь и др., 2017). Переменность связана с пульсациями с близкими периодами 127–128 и 132–133 сут (Гривняк и др., 2010; Иконникова и др., 2025). Помимо пульсационной активности, наблюдается переменность блеска, обусловленная нестабиль-

\*Электронный адрес: ikonnikova@sai.msu.ru

ностью пылевой оболочки. В частности, по фотометрическим наблюдениям в ближнем ИК-диапазоне в 1996–2004 гг. зарегистрировано повышение блеска, связанное с дополнительным пылевым выбросом (Иконникова и др., 2025).

При исследовании post-AGB звезд большое внимание уделяется их околозвездному окружению. Морфология объекта IRAS 22272+5435 детально изучалась в оптическом (Уэта и др., 2000) и среднем ИК-диапазонах (Мейкснер и др., 1997; Дайал и др., 1998; Уэта и др., 2001). Оболочка хорошо разрешается на изображениях и демонстрирует признаки осевой симметрии и наличие наклонного пылевого тора (или диска). Уэта и др. (2001) обнаружили наряду с оболочкой, сформированной на AGB, проявление выброса с усиленной потерей массы в современную эпоху. Также зарегистрировано излучение молекулы CO (Бухарабал и др., 2001; Гривняк, Бигинг, 2005; Накашима и др., 2012). Согласно этим исследованиям, распределение излучения CO  $J = 2-1$  не соответствует структуре в среднем ИК-диапазоне. Молекулярная оболочка имеет сферически симметричную структуру, простирающуюся до  $20''$ , при этом свидетельств высокоскоростных молекулярных выбросов не обнаружено, а интенсивность основного компонента линии очень близка к профилям, наблюдаемым в оболочках вокруг звезд на стадии AGB.

Пылевые околозвездные оболочки приводят не только к избытку излучения в ближнем ИК-диапазоне, но и к линейной поляризации из-за рассеяния света на пылевых частицах. Поляриметрические исследования IRAS 22272+5435 проводились различными методами в широком спектральном диапазоне. Гледхилл и др. (2001) впервые применили наземную картирующую поляриметрию в ближнем ИК-диапазоне, что позволило обнаружить и получить изображение околозвездной пылевой оболочки. Последующие наблюдения включали: поляриметрию в стандартных полосах BVRI (Партасарати и др., 2005) и UBVR (Акрас и др., 2017) и спектрополяриметрию в видимом диапазоне  $4200-8400 \text{ \AA}$  (Бигинг и др., 2006). Полученные результаты свидетельствуют о слабой поляризации излучения звезды, что типично для объектов на стадии post-AGB с относительно разреженными пылевыми оболочками.

В работе представлены данные новых поляризационных наблюдений, выполненных в 2020 и 2024 гг., а также сравнение этих данных с полученными ранее. Построена модель распределения энергии в спектре звезды для двух ее состояний: спокойного и активного (связанного с эпизодом потери массы). На основе модели определены параметры пылевой оболочки.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения V354 Lac были выполнены с помощью спекл-поляриметра на 2.5-м телескопе Кавказ-

ской горной обсерватории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (КГО ГАИШ МГУ) в режиме быстрой поляриметрии в три даты: 24 октября 2020 г., 11 декабря 2020 г. и 12 октября 2024 г. В качестве детектора в 2020 г. применялась ПЗС-матрица с электронным усилением Andor iXon 897 (Сафонов и др., 2017), в 2024 г. — низкошумящий КМОП Hamamatsu ORCA-quest C15550-20UP в режиме ultra-quiet (Страхов и др., 2023). Угловой масштаб в обоих случаях  $20.6 \text{ мсд/пкс}$ . Применялись среднеполосные фильтры с центральными длинами волн 550, 625 и 880 нм, полуширины фильтров 50, 50 и 70 нм соответственно. Во время наблюдений прибор был установлен в фокусе Нэсмита-2.

В режиме быстрой поляриметрии на детекторе формируется одновременно два изображения объекта в ортогональных поляризациях. Модуляция входящего состояния поляризации выполняется непрерывно вращающейся полуволновой пластинкой, одновременно детектор регистрирует серию изображений объекта длиной порядка нескольких тысяч кадров. Экспозиция одного кадра сравнима с атмосферным временем когерентности, что обеспечивает надежную регистрацию спекл-картины. Дополнительные обстоятельства наблюдений приведены в табл. 1.

Наблюдения были обработаны методом интегральной поляриметрии. Коррекция инструментальной поляризации выполнялась методом, описанным в статье Сафонова и др. (2017). Результаты приведены в табл. 2.

Также была выполнена обработка методом дифференциальной спекл-поляриметрии (ДСП), результатом которой является дифференциальная поляризационная видность (ДПВ) (Норрис и др., 2012):

$$\mathcal{R}_Q = \frac{I(f) + Q(f)}{I(f) - Q(f)}, \quad \mathcal{R}_U = \frac{I(f) + U(f)}{I(f) - U(f)}. \quad (1)$$

Здесь  $I(f)$ ,  $Q(f)$ ,  $U(f)$  — Фурье-спектры параметров Стокса,  $f$  — вектор пространственной частоты,  $I(f)$  имеет смысл видности. Заметим, что  $\mathcal{R}$  — комплексная величина. Методика оценки ДПВ по наблюдениям со спекл-поляриметром подробно описана нами в работе Сафонова и др. (2019). Пример измерений ДПВ для V354 Lac приведен на рис. 1. Там же, в пятой колонке, даны изображения в поляризованной интенсивности, восстановленные методом, приведенным в работе Сафонова и др. (2019).

ДПВ показывает ненулевой сигнал на частотах порядка  $2 \times 10^5 \text{ RAD}^{-1}$ . На более высоких частотах, вплоть до  $3 \times 10^6 \text{ RAD}^{-1}$ , значимого отклонения  $\mathcal{R}$  от 1 не наблюдается. В фазе сигнал отсутствует на всех частотах. В пространстве изображений это соответствует оболочке с круговой симметрией с типичным радиусом  $1''$ . На меньших угловых расстояниях от звезды поляризованного излучения не было обнаружено.

**Таблица 1.** Обстоятельства наблюдений методом дифференциальной спекл-поляриметрии. Колонки: дата и время UT, полоса, поле зрения в пкс, поле зрения в угловых секундах, электронное усиление, экспозиция одного кадра в мс, полное время накопления в с, среднее количество фотоэлектронов в кадре

UT	Полоса, нм	FOV, пкс	FOV, ''	EM Gain	t, мс	t <sub>acc</sub>	n <sub>phot</sub> , с
2020-10-24 22:05	550	274	5.64	500	30	176	6.7 × 10 <sup>4</sup>
2020-10-24 22:08	625	256	5.27	500	30	176	9.5 × 10 <sup>4</sup>
2020-10-24 22:12	880	262	5.40	500	30	177	4.9 × 10 <sup>4</sup>
2020-12-11 14:25	550	236	4.86	500	30	207	7.9 × 10 <sup>4</sup>
2020-12-11 14:29	625	210	4.33	500	30	207	1.1 × 10 <sup>5</sup>
2020-12-11 14:33	880	208	4.28	500	30	206	9.8 × 10 <sup>4</sup>
2024-10-12 18:11	550	186	3.83	1	23	210	1.9 × 10 <sup>4</sup>
2024-10-12 18:15	625	184	3.79	1	23	210	2.7 × 10 <sup>4</sup>
2024-10-12 18:19	880	182	3.75	1	23	210	3.0 × 10 <sup>4</sup>

**Таблица 2.** Интегральная поляризация V354 Lac. Колонки: дата и время UT, полоса, степень поляризации p в процентах, угол поляризации χ в градусах, отсчет против часовой стрелки от направления на северный полюс мира

UT	Полоса, нм	p, %	χ, °
2020-10-24 22:05	550	1.46 ± 0.18	20.0 ± 7.0
2020-10-24 22:08	625	1.11 ± 0.18	16.7 ± 9.1
2020-10-24 22:12	880	0.55 ± 0.21	-5.9 ± 22.0
2020-12-11 14:25	550	1.54 ± 0.17	28.3 ± 6.5
2020-12-11 14:29	625	1.24 ± 0.18	25.5 ± 8.3
2020-12-11 14:33	880	0.63 ± 0.21	13.4 ± 18.8
2024-10-12 18:11	550	1.71 ± 0.15	30.7 ± 5.1
2024-10-12 18:15	625	1.41 ± 0.15	26.4 ± 6.1
2024-10-12 18:19	880	0.80 ± 0.15	10.7 ± 10.9

Эти результаты хорошо согласуются с более ранними наблюдениями, представленными в работах Уэты и др. (2000, 2001). Измерения полной поляризации и ДПВ, полученные в три эпохи, совпадают в пределах погрешности, поэтому в дальнейшем анализе мы будем рассматривать только эпоху 2020-10-24, наблюдения в которую имеют наибольшее соотношение сигнал—шум.

### 3. МОДЕЛЬ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ

Моделирование распределения энергии в спектре (SED) V354 Lac проводилось неоднократно, начиная с первой работы Ван дер Вина и др. (1989). По мере получения новых данных в оптическом и ИК-диапазонах, изображений пылевой оболочки, уточнения параметров звезды и расстояния до объекта, исследователи вновь обращались к моделированию SED и получению параметров пылевой оболочки (Щерба и др., 1997; Уэта и др., 2001; Мишра и др., 2016; Тоси и др., 2023).

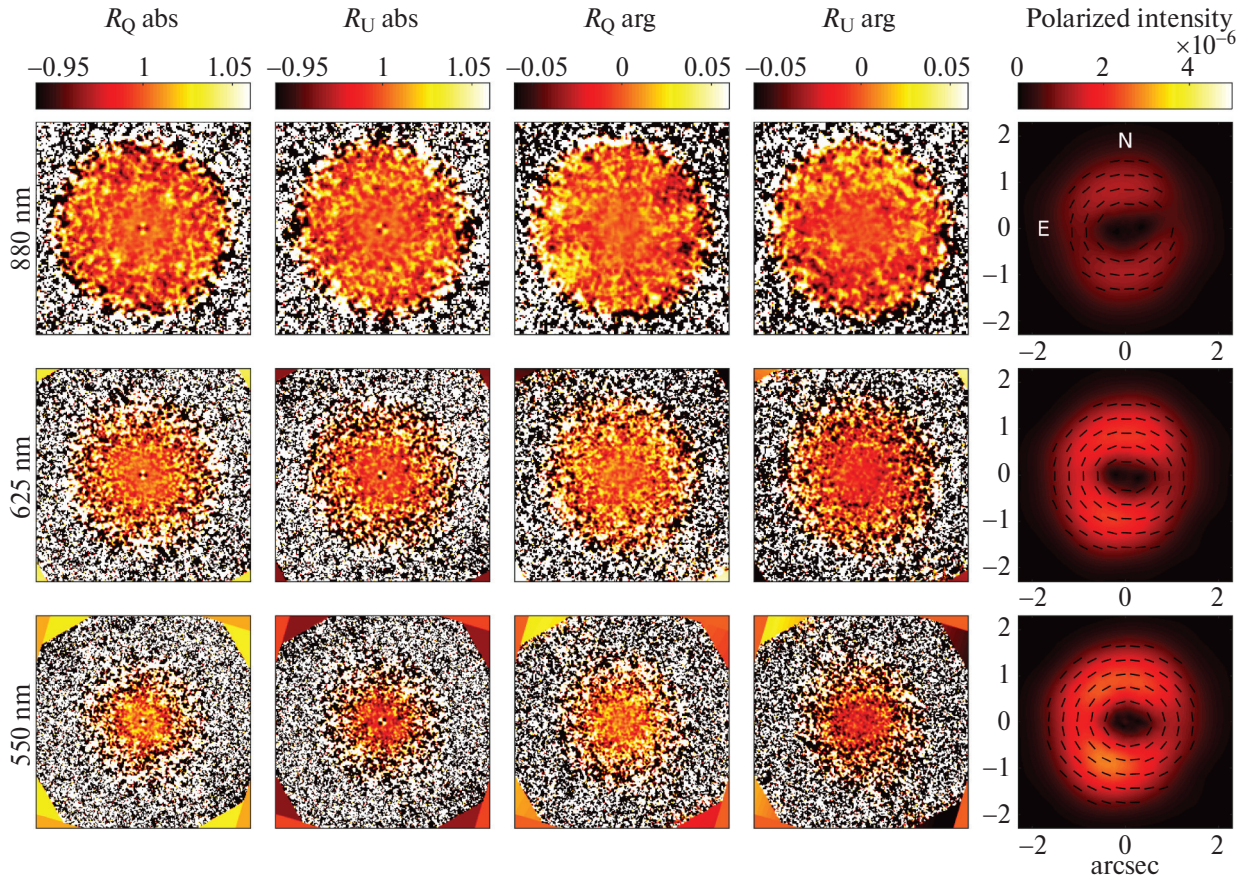
В настоящей работе представлены результаты моделирования пылевой оболочки, полученные на основе архивных данных ИК-обзоров, собственных наблюдений в оптическом и ближнем ИК-диапазонах для двух состояний звезды, а также данных спекл-

поляриметрии. В табл. 3 приведена *UBVJHKLM*-фотометрия для двух эпох: июль 1999 г. (пылевой выброс) и декабрь 2020 г. (спокойное состояние). Перевод звездных величин в потоки проводился с использованием калибровок Страйжиса (1977) для *UBV*-величин и Курниева (1983) для *JHKLM*-величин. В табл. 4 собраны данные из ИК-обзоров, используемые для моделирования распределения энергии в спектре.

Для моделирования использовались следующие параметры:

- Расстояние до звезды принято равным 1409.8 пк (Байлер-Джонс и др., 2021) на основе данных о параллаксе из GAIA DR3 (Коллаборация GAIA, 2021).
- Для моделирования излучения звезды с параметрами атмосферы  $T_{\text{eff}} = 5600$  К и  $\log g = 0.5$  (Зач и др., 1995) использовался синтетический спектр сверхгиганта спектрального класса G0 из работы Пиклеса (1998).
- Межзвездное поглощение света принято равным  $A_V = 2.^m5$  (Уэта и др., 2001).





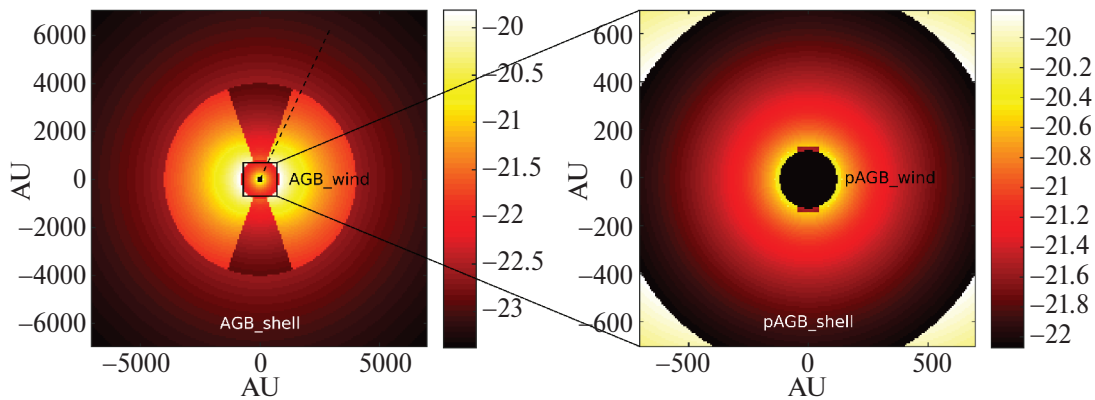
**Рис. 1.** Наблюдения методом ДСП. Строки соответствуют полосам: 880, 625 и 550 нм сверху вниз. Первые четыре колонки содержат компоненты ДПВ:  $|R_Q|$ ,  $|R_U|$ ,  $\arg R_Q$ ,  $\arg R_U$ . По осям отложена пространственная частота, отображаемая область имеет размер  $2D/\lambda$ , где  $D$  — диаметр телескопа,  $\lambda$  — длина волны. Пятая колонка содержит изображение в поляризованной интенсивности, восстановленное методом из работы Сафонова и др. (2019). Единицы — отношение потока в пикселе к полному потоку от звезды. Черточки показывают ориентацию плоскости поляризации. Во всех рисунках север сверху, восток слева.

**Таблица 3.** *UBVJHKLM*-фотометрия для двух эпох: июль 1999 г. и декабрь 2020 г.

MJD	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	Ссылка
51365.5	—	—	—	5.44	4.96	4.55	3.77	3.54	Иконникова и др. (2025)
51368.5	12.58	10.54	8.54	—	—	—	—	—	Архипова и др. (2009)
59188.3	—	—	—	5.44	5.00	4.77	4.46	4.23	Иконникова и др. (2025)
59198.3	12.71	10.52	8.48	—	—	—	—	—	—  —

**Таблица 4.** Данные из ИК-обзоров, используемые для моделирования SED

Телескоп	Длина волны ( $\mu\text{m}$ )	Поток (Jy)	Дата	Ссылка
WISE	3.4, 4.6, 12, 22	3.570, 6.477, 83.619, 301.413	2010	Кутри и др. (2013)
AKARI PSC	9, 18	$31 \pm 2$ , $148.8 \pm 1.3$	2006–2007	Ишихара и др. (2010)
IRAS	12, 25, 60, 100	73.9, 302, 96.6, 41	1983	Хелу и Уолкер (1988)
MSX	8.28, 12.13, 14.65, 21.34	25.07, 87.85, 95.38, 186.6	1996	Иган и др. (2003)
Herschel	70, 160	54.61, 7.37	2009–2013	Мартон и др. (2024)
JCMT	850	0.011, 0.06, 0.11	1996–2005	Ди Франческо и др. (2008)



**Рис. 2.** Разрез плотности пыли в оболочке V354 Lac, модель org. Подписаны компоненты, перечисленные в табл. 5. Прерывистой линией показан луч зрения.

Для моделирования распределения плотности пыли в пространстве был взят эмпирический закон (Мейкснер и др., 1997), уточненный для случая V354 Lac в статье Уэты и др. (2001).

$$\rho(R, \theta) = \begin{cases} \rho_{\text{in}} R^{-B} (1 + E e^{-CR/R_{\text{sw}}}) \times \\ \quad \times (1 + A e^{-CR/R_{\text{sw}}} \sin \theta), & 90^\circ > \theta > \theta_0, \\ D \rho_{\text{in}} R^{-B}, & \theta_0 > \theta. \end{cases} \quad (2)$$

Это осесимметричное распределение моделирует экваториальное увеличение плотности в так называемом сверхветре (superwind), см. рис. 2. Здесь  $R$ ,  $\theta$  — координаты в пространстве модели, радиус и широта, соответственно,  $\rho_{\text{in}}$  — нормировочный коэффициент, вычисляемый из полной массы оболочки,  $\theta_0 = 20^\circ$  — половина угла раскрытия полярного “колдца”,  $R_{\text{sw}}$  — радиус, характеризующий концентрацию сверхветра к экватору.  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  — переменные, определяющие геометрию оболочки. Мы, следуя Уэте и др. (2001), будем полагать их равными  $A = 10$ ,  $B = 2$ ,  $C = 3$ ,  $D = 0.111$ ,  $E = 0$ . Наклонение системы полагается равным  $25^\circ$ , ориентация оси симметрии П.А. =  $135^\circ$ . Плотность, задаваемая уравнением (2), отлична от нуля на расстояниях  $R_{\text{sw, in}} < R < R_{\text{sw, out}}$ .

Уэта и др. (2001), исходя из данных распределения энергии в спектре и собственных изображений оболочки объекта на длинах волн 8.8, 9.8, 11.7 мкм, построили модель оболочки, состоящую из четырех компонентов, условно разделяющихся на две группы. Первая — это крупная оболочка, сброшенная на стадии AGB. Она состоит из сверхветра, описываемого уравнением (2) и добавочного изотропного ветра, плотность в котором убывает обратно пропорционально квадрату расстояния:

$$\rho(R) = \rho_{\text{in}} R^{-F}, R_{\text{shell, in}} < R < R_{\text{shell, out}}. \quad (3)$$

Ветер, описываемый уравнением (2), мы будем обозначать меткой AGB-wind, а уравнением (3) — AGB-shell. Параметры этих компонентов приведены в столбцах 2 и 3 табл. 5.

Вторая группа компонентов, расположенных на значительно меньших расстояниях, была добавлена Уэтой и соавторами (2001) для описания излучения объекта в диапазоне длин волн 7–20 мкм. Эти компоненты также представляют собой экваториально утолщенный (pAGB-wind) и изотропный (pAGB-shell) ветры. Это вещество, теряемое звездой в post-AGB стадии эволюции. Параметры компонентов (pAGB-wind) и (pAGB-shell) приведены в табл. 5 в четвертой и пятой колонках. Массы компонентов, подобранные Уэтой и др. (2001), приведены в табл. 5 (метка модели Ueta-0). Для расчетов оптических свойств пыли Уэта и др. (2001) рассматривали два вида пыли. Мы будем обозначать их ac-small и ac-large (см. табл. 6). В обоих видах пыли распределение пылинок по радиусу — степенное с фактором  $\beta = -3.5$  с минимальным радиусом  $a_{\text{down}} = 1$  нм. Верхняя граница распределения  $a_{\text{up}} = 0.1$  мкм для ac-small и  $a_{\text{up}} = 10$  мкм для ac-large. Компонент оболочки pAGB-shell принимается состоящим из пыли ac-small, а остальные 3 компонента — из пыли ac-large (см. табл. 5).

SED и изображения мы вычисляли, используя моделирование переноса излучения методом Монте-Карло, реализованное в пакете RADMC-3D (Дуллемонд и др., 2012). RADMC-3D учитывает процессы поглощения и рассеяния на пыли, а также ее собственное тепловое излучение. Оптические свойства пыли рассчитывались с помощью программы optool (Доминик и др., 2021). К модельному SED было применено также межзвездное поглощение  $A_V = 2.5$  в соответствии с законом Карделли и др. (1989). Ранее мы применяли RADMC-3D для интерпретации наблюдений звезд на поздних стадиях эволюции в работах Федотьевой и др. (2020), Сафонова и др. (2025).

В наблюдаемом SED присутствуют выраженные эмиссионные особенности на длинах волн ~8, 12 и 27 мкм (рис. 3). Они могут быть связаны с излучением мелких углеродных частиц размером ~1–10 Å, относящихся к классу полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). ПАУ ответственны за ха-

Таблица 5. Параметры компонентов оболочки

Параметр	post-AGB		AGB	
	Экваториальный выброс pAGB-wind	Изотропный ветер pAGB-shell	Сверхветер AGB-wind	Изотропный ветер AGB-shell
Внутренний радиус, а.е.	120	140	800	4000
Внешний радиус, а.е.	140	800	4000	19300
Метка модели, ссылка	Ueta-0 (Уэта и др., 2001)			
Вид пыли	ac-large	ac-large	ac-large	ac-small
Масса пыли, $M_{\odot}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$
Светимость звезды, $L_{\odot}$	13000			
Метка модели, ссылка	Ueta-M (Уэта и др., 2001), воспроизведение SED			
Вид пыли	ac-large	ac-large	ac-large	ac-small
Масса пыли, $M_{\odot}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-7}$	$7.7 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$
Светимость звезды, $L_{\odot}$	5280			
Метка модели, ссылка	org, данная работа			
Вид пыли	ac-large	ac-large	org-small	org-small
Масса пыли, $M_{\odot}$	$3 \times 10^{-9}$	$6.9 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$
Светимость звезды, $L_{\odot}$	6600			

Таблица 6. Параметры видов пыли, используемых нами при моделировании;  $\beta$  — показатель степени в распределении пылинок по размерам,  $a_{up}$  — верхняя граница распределения пылинок по размерам

Метка	$\beta$	$a_{up}$ , МКМ	Вещество
ac-large	-3.5	10	Аморфный углерод (Зубко и др., 1996)
ac-small	-3.5	0.1	Аморфный углерод (Зубко и др., 1996)
org-small	-3.9	0.18	Тугоплавкая органика (Хеннинг, Стогниенко, 1996)

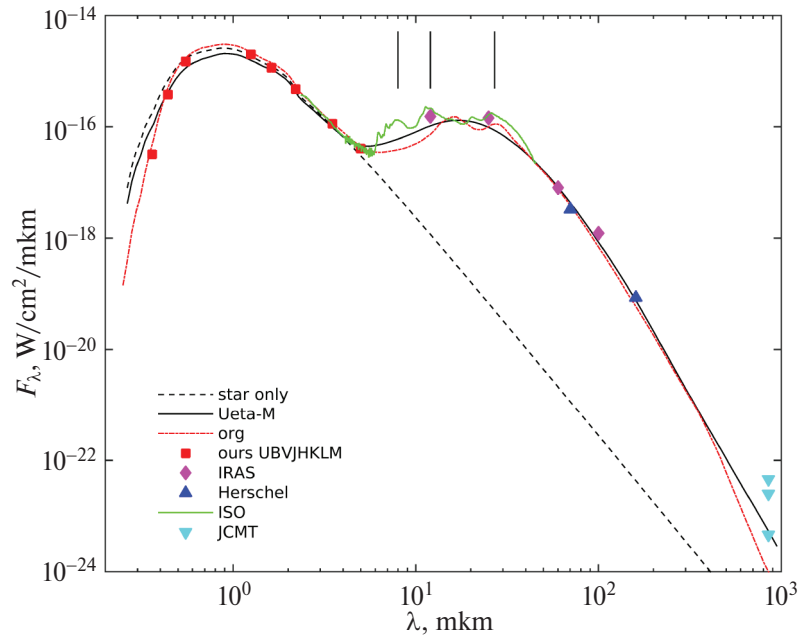
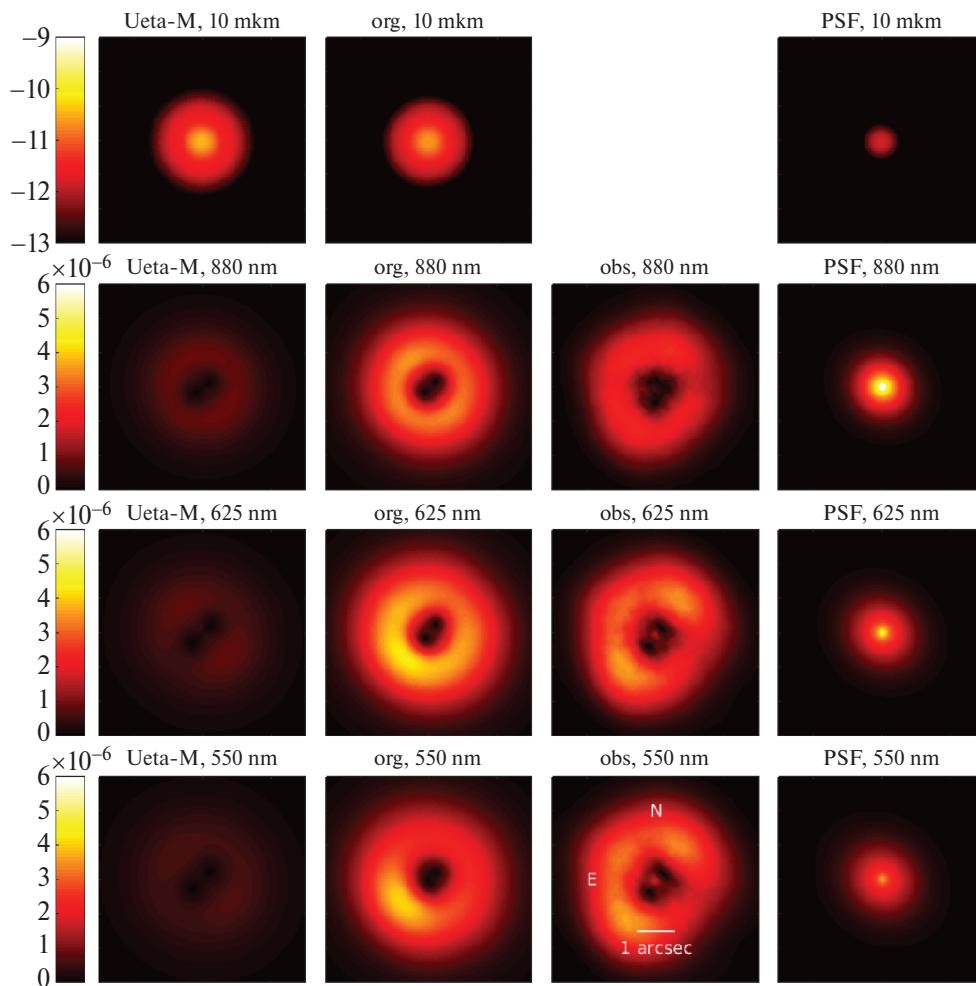


Рис. 3. Сравнение наблюдаемого и модельных SED V354 Lac. Символы — наблюдения, зеленая сплошная линия — спектр ISO, черная штриховая линия — звезда без оболочки, черная сплошная — модель Ueta-M, красная штрихпунктирная — модель org. Вертикальные сплошные линии показывают эмиссионные линии, см. обсуждение в тексте.





**Рис. 4.** Сравнение изображений оболочки V354 Lac. Верхний ряд — неполяризованное излучение на длине волны 10 мкм. Единицы — логарифм интенсивности в эрг/см<sup>2</sup>/Гц/стер. Нижние три ряда — поляризованная интенсивность в единицах потока на пиксель 20 × 20 мсд, деленного на полный поток от звезды. Первая колонка — модель Ueta-M (модель Уэты и др. (2001) с модифицированными массами), вторая — модель org (модель, предлагаемая в данной работе), третья — наблюдения. На всех панелях север вверху, восток слева. Поле зрения 4.6'' × 4.6''. Четвертая колонка: функция рассеяния точки, с которой было свернуто изображение.

рактерные ИК-эмиссионные линии (3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 мкм), возникающие из-за колебаний C–H и C–C связей. В отличие от крупных пылевых частиц, нагрев и охлаждение РАН происходят дискретно (через квантовые процессы). Наличие аномалий в дальнем ИК-диапазоне, таких как особенности на 21 и 30 мкм, также связывают с излучением мелких РАН-подобных частиц. Моделирование подобных особенностей в спектре V354 Lac ранее проводилось в работе Щербы и др. (1997), где успешно удалось воспроизвести эмиссию на 21 и 30 мкм. Уэты и др. (2001) не учитывали наличие в спектре эмиссионных деталей в ИК-спектре звезды, мы также будем при моделировании SED использовать континуум между линиями.

Для достижения совпадения моделированного и наблюдаемого SED нам пришлось модифицировать массы компонентов pAGB-shell, AGB-wind, AGB-shell, их новые значения приведены в блоке

Ueta-M табл. 5. Частично расхождение можно объяснить тем, что мы принимаем другое расстояние до объекта (у Уэты и др. (2001)  $d = 1600$  пк, в нашей работе  $d = 1409.8$  пк). Но различие все равно остается довольно большим.

На рис. 4 в первой колонке приведены изображения оболочки, соответствующие модели Ueta-M. Верхняя панель — изображение в полной (неполяризованной) интенсивности в полосе 10 мкм. На этой длине волны доминирует тепловое излучение пыли, как внутренних оболочек, так и внешних. Три нижние — рассеянное поляризованное излучение в трех полосах видимого диапазона. Как можно видеть, во всех трех полосах видимого диапазона интенсивность рассеянного излучения, предсказываемая моделью, в несколько раз меньше, чем наблюдаемая (третья колонка рис. 4).

Для устранения этого расхождения мы предположили, что пыль во внешней части оболочки состо-

ит из органических соединений (метка вида пыли *org-small*, табл. 6). В пользу этой гипотезы говорит наличие эмиссионных линий в спектре, как было отмечено выше. В качестве материала пыли была взята тугоплавкая углеродная органика (*refractory organics*) (Поллак и др., 1994; Хеннинг, Стогниенко, 1996). Эти соединения имеют температуру испарения 400–500 К, и поэтому могут существовать во внешних частях оболочки, где типичные температуры пылинок 100–200 К.

Благодаря своим оптическим свойствам, пылинки, состоящие из тугоплавкой органики, нагреваются до меньших температур, чем пылинки из аморфного углерода, что вызывает смещение максимума в спектре в длинноволновую часть спектра. Данный эффект можно скомпенсировать уменьшением верхней границы распределения размеров частиц в компоненте оболочки *AGB-wind* до 0.18 мкм, что помогает увеличить температуру пыли. Итоговая модель (метка *org*, последняя строчка табл. 5) имеет одинаковый состав и распределение пыли по размерам в обоих компонентах *AGB* оболочки (*AGB-wind* и *AGB-shell*). Таблица 7 содержит параметры распределения пыли в пространстве для построенной модели.

Модельные спектр и изображения, соответствующие модели *org*, представлены на рис. 3 и 4 соответственно. SED вне эмиссионных линий воспроизводится хорошо, в модельном SED даже есть намек на линию 27 мкм, присутствующую в наблюдениях. Однако две другие эмиссии не воспроизводятся. Поляризованная интенсивность теперь хорошо согласуется с уровнем интенсивности в наблюдениях во всех трех рассмотренных полосах. Также модель описывает общую зависимость поляризованной интенсивности от расстояния до звезды.

Наблюдения показывают отклонение яркости оболочки от центральной симметрии. В юго-западном направлении поляризованная интенсивность на 40% меньше, чем в юго-восточном и северо-западном. Моделирование не предсказывает этого падения, более того, изображение, ожидаемое из моделирования, должно иметь ось симметрии на  $PA = 135^\circ$ . Формальная минимизация невязки показывает, что модель, соответствующая наклонению  $15^\circ$  и  $PA = 30^\circ$ , показывала бы лучшее совпадение (см. приложение). Однако не исключено, что потемнение оболочки связано с эффектами неоднородности освещенности – затенения внешней оболочки неоднородностями внутренней. Оценки наклона и позиционного угла, выполненные Уетой и др. (2001) по данным среднего ИК-диапазона, меньше зависят от вариаций освещенности и более надежны, чем наши. Дальнейшее уточнение модели оболочки возможно в будущем на основе новых данных высокого углового разрешения, в частности, с применением адаптивной оптики.

На длине волны 10 мкм вид оболочки в модели *org* изменился мало по сравнению с *Ueta*, так что мож-

**Таблица 7.** Параметры модели оболочки V354 Лас покомпонентно.  $M$  — масса компонента. Остальные параметры описаны в разделе 3

Параметр	Значение
<i>AGB-wind</i>	
$M, M_\odot$	$3 \times 10^{-4}$
$R_{SW,in}, \text{a.e.}$	800
$R_{SW}, \text{a.e.}$	4000
$R_{SW,out}, \text{a.e.}$	4000
$\theta_0, ^\circ$	20
$A$	10
$B$	2
$C$	3
$D$	0.111
$E$	0
<i>AGB-shell</i>	
$M, M_\odot$	$1.3 \times 10^{-4}$
$R_{shell,in}, \text{a.e.}$	4000
$R_{shell,out}, \text{a.e.}$	19333
$F$	2
<i>pAGB-wind</i>	
$M, M_\odot$	$3 \times 10^{-9}$
$R_{SW,in}, \text{a.e.}$	120
$R_{SW}, \text{a.e.}$	140
$R_{SW,out}, \text{a.e.}$	140
$\theta_0, ^\circ$	20
$A$	10
$B$	2
$C$	3
$D$	0.111
$E$	0
<i>pAGB-shell</i>	
$M, M_\odot$	$6.9 \times 10^{-7}$
$R_{shell,in}, \text{a.e.}$	180
$R_{shell,out}, \text{a.e.}$	800
$F$	2

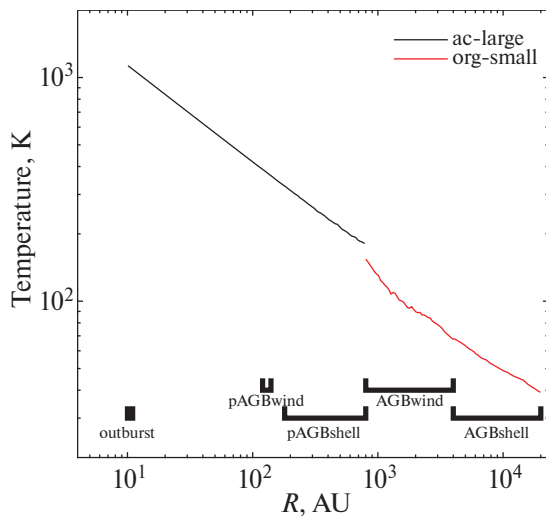
но ожидать, что первая модель будет воспроизводить также и изображения Уэты и др. (2001), полученные в среднем ИК-диапазоне. К сожалению, количественное сравнение с изображениями Уэты и др. (2001) не представляется возможным из-за отсутствия доступа к исходным данным.

Зависимость температуры пыли в оболочке от расстояния до звезды представлена на рис. 5.

### 3.1. Эпизод формирования пыли в 1996–2004 гг.

На рис. 6 представлены кривые блеска V354 Лас в фотометрических полосах  $J, H, K, L$  и  $M$ , полученные по данным наблюдений 1991–2024 гг. (Иконни-





**Рис. 5.** Зависимость температуры пыли в оболочке от расстояния до звезды в плоскости, перпендикулярной оси симметрии оболочки. Черная линия соответствует пыли ac-large, красная — org-small. Внизу графика показаны интервалы расстояний на которых присутствуют различные элементы оболочки.

кова и др., 2025). На графике серым цветом выделен период повышения блеска объекта, наблюдавшийся в 1996–2004 гг. Как можно видеть, амплитуда повышения яркости составила 0.6–0.7<sup>m</sup> в полосах *L*, *M*. Кривая блеска имеет выраженный подъем, плато и спад. Подъем был более резким, чем спад. Длительность всего явления составила ~2000<sup>d</sup>. Отметим, что значимого изменения потока в видимом диапазоне в это время зафиксировано не было.

На рис. 7 представлен SED в эпоху максимума блеска в полосах *L*, *M*. Для модельного описания SED мы добавили в модель org, обсуждавшуюся в предыдущем пункте, пылевое облако вблизи звезды. Параметры облака следующие: внутренний радиус 10 а.е., внешний радиус 11 а.е., масса  $6 \times 10^{-10} M_{\odot}$ . Облако мы предположили состоящим из той же пыли ac-large, что и внутренние компоненты оболочки. Как можно видеть из рис. 7, при этих параметрах SED хорошо описывается. Воспроизводится рост излучения в полосах *KLM*, при этом не возникает значимого поглощения в видимом диапазоне.

Температура пыли во внутреннем облаке составляет ~1000 К, что соответствует температуре ее сублимации. Угловой размер внутреннего облака при наблюдении с Земли равен 7 миллисекундам дуги — это существенно меньше углового разрешения 2.5-м телескопа даже в наиболее коротковолновом диапазоне.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ

### 4.1. Поляризация

Объект IRAS 22272+5435 демонстрирует сложную картину поляризации, изученную в различных

спектральных диапазонах. Согласно классификации Трамелла и др. (1994), он относится к классу 2, для которого характерна собственная поляризация, превышающая межзвездный вклад. Спектрополяриметрические наблюдения в октябре 1991 г. ( $\lambda 3000\text{--}5500 \text{ \AA}$ ) и в октябре 1992 г. ( $\lambda 4700\text{--}7300 \text{ \AA}$ ) выявили постоянную степень поляризации  $P(\lambda) \sim 1.67\%$  с позиционным углом  $\sim 44.^\circ 7$ , незначительный поворот угла ( $5^\circ$ ), исчезающий после учета межзвездной компоненты ( $\sim 1.7\%$ ), спектральную зависимость  $P(\lambda)$ , не описываемую законом Серковского.

Последующие исследования выявили переменность поляризации: Бигинг и др. (2006) по спектрополяриметрическим наблюдениям в диапазоне  $\lambda 4200\text{--}8400 \text{ \AA}$  в 2000 г. зафиксировали  $\langle P \rangle = 2.54\%$  и  $\chi = 10.8^\circ$ , при этом, по их мнению, резкое изменение угла относительно данных Трамелла и др. (1994) ( $\chi = 138^\circ$ ) указывает на переменную внутреннюю компоненту. Однако, следует отметить, что  $\chi = 138^\circ$  относится к наблюдаемым данным. Исправление за межзвездную составляющую приводит к значению  $\chi \sim 44.^\circ 7$ .

Наблюдения 1989 г. в *BVRI* из работы Партасарати и др. (2005) показали рост поляризации в синей области, подтверждающий рассеяние как основной механизм. Акрас и др. (2017) по данным 2012 г. (*UBVRI*) выявили плавное уменьшение поляризации от  $\sim 1.5\%$  (*U*) до  $\sim 0\%$  (*I*) при постоянном угле поляризации ( $55^\circ\text{--}60^\circ$ ). Межзвездный вклад оценен в 1.13%.

Поляризационные карты (Гледхилл и др., 2001, *J*-диапазон) обнаружили: центрально-симметричное распределение, свидетельствующее об изотропном освещении пылевой оболочки; асимметричное кольцо рассеянного света (ярче на юго-западе) с прямоугольным гало и признаки двух наложенных эллиптических структур, образующих характерную прямоугольную форму.

Таким образом, данные, представленные в литературе, позволяют сделать вывод о том, что поляризация IRAS 22272+5435 имеет внутреннее происхождение и обусловлена рассеянием в сложной многослойной оболочке. Структура оболочки представляет собой сочетание изотропного освещения (центрально-симметричная поляризация) и анизотропного пылевого распределения (тороид + прямоугольное гало). Переменность  $P(\lambda)$  и  $\chi$  подтверждает динамику оболочки, требующую дальнейшего мониторинга.

Наши измерения интегральной поляризации также показали падение доли поляризации при переходе к более длинным волнам. Восстановленные методом дифференциальной спекл-поляриметрии изображения в поляризованной интенсивности демонстрируют оболочку с азимутальной картиной поляризации, что служит подтверждением наблюдения отражательной туманности. Характерные размеры —  $1''$  и морфология рассеивающего облака согласуются с данными Гледхилла и др. (2001). Значимого различия между

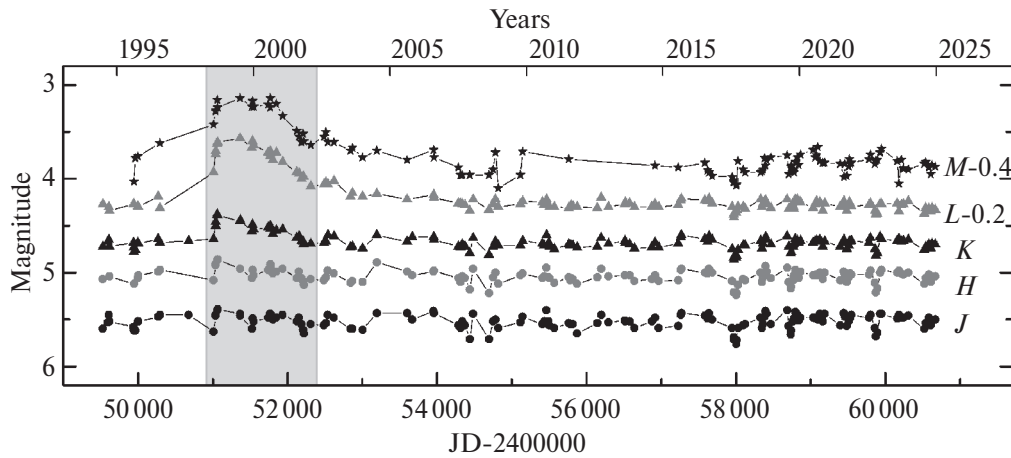


Рис. 6. Кривые блеска V354 Lac в ближнем ИК-диапазоне за 1991–2024 гг. по данным из работы Иконниковой и др. (2025). Серым цветом выделен период повышенного блеска.

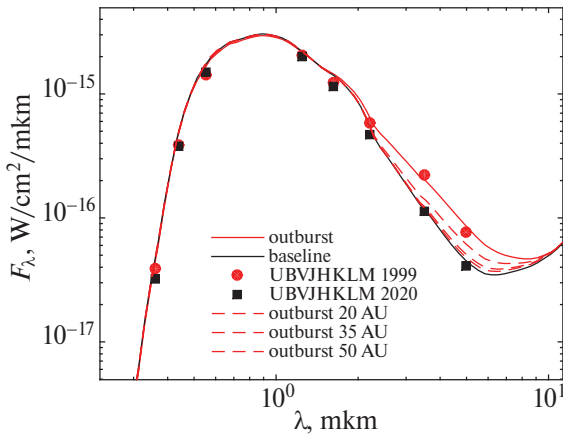


Рис. 7. Модель SED в максимуме повышения блеска (красная сплошная линия), включающая внутреннюю пылевую оболочку радиусом 10 а.е., для сравнения также приведена модель в “спокойном состоянии” (черная сплошная линия). Красные кружки — фотометрия, полученная в 1999 г., черные квадраты — в 2020 г. Красные штриховые линии, показывают модели с радиусом внутренней оболочки 20, 35 и 50 а.е., сверху вниз.

наблюдениями, выполненными 2020-10-24 и 2024-10-12, не наблюдается.

#### 4.2. Модель пылевой оболочки

Моделирование спектрального распределения энергии объекта IRAS 22272+5435 проводилось в рамках нескольких исследований, каждое из которых внесло важный вклад в понимание структуры и эволюции этого объекта. В работе Уэты и др. (2001) была предложена модель, описывающая пылевую оболочку как систему из двух концентрических компонентов: компактной тороидальной сверхветровой зоны и более протяженной асимметричной AGB-ветровой оболочки с биконическими полостями. Эта модель,

подробно рассмотренная в разделе “Модель пылевой оболочки”, стала основой для наших исследований.

Особое внимание инфракрасным спектральным особенностям на 21 и 30 мкм уделили Щерба и др. (1997). Их модель прозрачной (оптически тонкой) оболочки, состоящей из разнородной пыли (РАН-молекул, аморфного углерода и сульфидов), успешно объяснила наблюдаемые спектральные характеристики. Важным выводом этой работы стало подтверждение преобладания аморфного углерода над графитом, а также роль миниатюрных РАН-подобных частиц размером менее 10 Å в формировании дискретных ИК-особенностей.

Дальнейшее изучение 21-мкм особенности провели Мишра и др. (2016) с использованием кода расчета переноса излучения “2-DUST”. Их анализ показал, что эта особенность требует наличия значительного ультрафиолетового излучения, что объясняет ее отсутствие у типичных AGB-звезд. Исследователи предположили, что носителями 21-мкм особенности являются специфические углеродные частицы, отличные от стандартных пылинок, и установили корреляцию между ИК-особенностями и процессами потери массы в AGB-фазе.

Более современное исследование, проведенное Тоси др. (2023), охватило 19 углеродных post-AGB объектов, включая IRAS 22272+5435. Используя фотометрические данные из различных каталогов, спектры SWS/ISO и параллаксы Gaia DR3, авторы определили ключевые параметры объекта: светимость  $6000 L_{\odot}$ , состав пыли (90% углерода и 10% карбида кремния), оптическую толщину  $\tau_{10} = 0.0087$ , температуру пыли 250 K, а также расстояние пылевой оболочки от центра звезды ( $\sim 1.9 \times 10^5 R_{*}$ ) и скорость потери массы на завершающей стадии AGB-фазы ( $\sim 1.5 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ ). Тоси др. (2023) не приводят вида распределения пыли в пространстве, что делает невозможным воспроизведение их модели.

При интерпретации наших наблюдений мы отталкивались от модели Уэты и др. (2001), описывающей тепловое излучение пыли — интегральный спектр и изображения в среднем ИК-диапазоне. Однако аморфный углерод, предлагаемый Уетой и др. (2001) в качестве материала пыли во всех компонентах оболочки, предсказывает уровень рассеянного излучения оболочки в несколько раз меньший, чем показали наши наблюдения методом дифференциальной спекл-поляриметрии. Предположение о том, что пыль во внешних частях оболочки (далее 800 а.е. от звезды) состоит из тугоплавкой органики, позволяет удовлетворительно объяснить спектр теплового излучения и картину рассеянного излучения в видимом диапазоне.

Еще одна причина, чтобы отвергнуть аморфный углерод как вещество пыли во внешней части оболочки, — это наличие широких эмиссионных линий в районе 8–30 мкм в наблюдаемом спектре. Аморфный углерод показывает спектр, лишенный деталей. Напротив, тугоплавкая органика, рассмотренная нами, показывает значимое отклонение спектра от абсолютно черного тела. Тем не менее, детально структура линий не воспроизводится, их объяснение должно стать предметом будущих исследований минералогии пыли.

Согласно нашей модели, светимость V354 Лас составляет  $L = 6600 L_{\odot}$ . Звезда имеет пониженную металличность  $[\text{Fe}/\text{X}] = -0.77$  (Де Смедт и др., 2016), что соответствует  $Z \approx 0.0026$ , и эффективную температуру  $T_{\text{eff}} = 5600 \text{ K}$  (Зач и др., 1995). На диаграмме Герцшпрунга–Рессела положение V354 Лас с этими параметрами лучше всего соответствует эволюционной модели с начальной массой  $M_{\text{ZAMS}} = 1 M_{\odot}$  и массой после окончания “сверхветра” на AGB  $M_{\text{f}} = 0.55 M_{\odot}$  (Миллер, Бертолами, 2016).

#### 4.3. Модель пылевого выброса 1996–2004 гг.

Обращает на себя внимание, что кривая блеска во время эпизода выброса пыли имела значительные по протяженности стадии роста и плато — в сумме  $\approx 500^d$ . Для объяснения этой особенности необходимо предположить, что все это время в оболочке звезды формировалась новая пыль. Действительно, облако пыли постоянной массы, удаляющееся от звезды, на всех длинах волн должно показывать только падение потока со временем. Таким образом, располагая полной массой вновь сформированной пыли, можно оценить темп потери массы по пыли во время выброса в  $\approx 4 \times 10^{-10} M_{\odot}/\text{г}$ .

В то время как характерное время роста кривой блеска позволяет получить оценку темпа потери массы, по характерному времени ее спадания  $\approx 700^d$  можно оценить скорость удаления пыли от звезды. Подобные оценки, вообще говоря, требуют количественного моделирования динамики пыли в атмосфере звезды, подобного проделанному Сидерудом и др. (2025).

Не подвергая сомнению ценность такого моделирования, оценим грубо скорости удаления пыли, предполагая, что после формирования ее масса не менялась, а движение от звезды происходило с постоянной скоростью.

Мы вычислили SED объекта при постоянной массе и толщине пылевого слоя для нескольких значений его внутреннего радиуса: 20, 35 и 50 а.е. Результаты можно видеть на рис. 7. Уже начиная с внутреннего радиуса 35 а.е., следы пылевого слоя в SED практически исчезают на фоне мощного излучения внешних частей оболочки. Таким образом, можно сказать, что пылевой слой преодолел 25 а.е. за 700 дней, что соответствует скорости 60 км/с.

До сих пор столь высокие скорости в оболочке V354 Лас не наблюдались. Скорость расширения протяженной оболочки, сброшенной на стадии AGB, оценивалась разными авторами по наблюдениям молекулы CO. В сводке данных, представленной Хэ и др. (2014) на основе более ранних исследований Вудворта и др. (1990), Омона и др. (1993), Нери и др. (1998), Гривняка и Бигинга (2005), скорость расширения находится в диапазоне 9.1–11.8 км/с. Хэ и др. (2014) получили значение  $v_{\text{exp}} = 10.1 \text{ км/с}$ , а Цю и др. (2024) —  $7.5 \pm 0.7 \text{ км/с}$ . С другой стороны, связанное с переходом к стадии post-AGB уменьшение радиуса звезды и увеличение температуры ее поверхности вызывает увеличение терминальной скорости звездного ветра, достаточное, чтобы объяснить наблюдаемую скорость удаления облака (Ламерс и Казинелли, 1999; Кртижка и др., 2020).

Устойчивые высокоскоростные выбросы пыли и газа наблюдаются в ряде случаев у двойных post-AGB звезд. Если звезда имеет компаньона (например, белый карлик или маломассивную звезду), его гравитация может формировать аккреционные диски и джеты, выбрасывающие пыль с высокой скоростью. Примером таких объектов могут служить CRL 618, CRL 2688 (Хэ и др., 2014).

В случае V354 Лас эпизод усиленной потери массы наблюдался короткое время единожды более 20 лет назад. В работе Иконниковой и др. (2025) обсуждаются причины этого явления. Этот 8-летний эпизод формирования пылевой оболочки согласуется с более ранними наблюдениями: данные Гривняка и др. (1994) за 1990–1991 гг. показали резкие изменения в спектрах CO, что авторы связали с ударными процессами при выбросе массы, а наблюдения Уэты и др. (2000–2001) в среднем ИК-диапазоне зафиксировали максимальную фазу развития пылевой оболочки.

Анализ показывает, что традиционные механизмы образования пыли, связанные с пульсационной активностью (Зач и др., 2009, 2016), не могут полностью объяснить масштаб события 1996–2004 гг. В качестве возможного объяснения рассматривается гипотеза о наличии звезды-спутника, где дополнительное пылеобразование происходит в зоне взаимодействия звезд-

ных ветров — аналогично процессам в двойных системах типа Вольфа–Райе: WR 137 (Питт и др., 2023) и WR 140 (Вильямс и др., 1978). Однако в отличие от периодических событий у WR-звезд, у V354 Лас подобный эпизод зафиксирован лишь единожды, что может указывать на большой орбитальный период (>20 лет). Данные Гривняка и др. (2017) о долгопериодических вариациях лучевой скорости (возможный период ~36 лет) косвенно поддерживают эту гипотезу, предполагая существование маломассивного компаньона (~0.36  $M_{\odot}$ ) на расстоянии ~11 а.е.

Таким образом, наблюдаемые особенности V354 Лас могут отражать сложное сочетание эволюционных процессов в post-AGB фазе и возможного влияния двойственности системы. Окончательное подтверждение этой гипотезы потребует дальнейших долгосрочных мониторинговых наблюдений в ИК-диапазоне и уточнения кинематических параметров системы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены распределения поляризованного потока в окрестностях IRAS 22272+5435 (V354 Лас), полученные методом дифференциальной спекл-поляриметрии в полосах 550, 625 и 880 нм с помощью спекл-поляриметра на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. В три наблюдательные эпохи во всех трех полосах было зафиксировано наличие оболочки в виде кольца с характерным радиусом 1'', окружающего звезду. Оболочка показывает азимутальную картину поляризации, что говорит о том, что ее излучение генерируется при рассеянии света центральной звезды на пыли. Внутри кольца, вплоть до расстояний 50–80 миллисекунд дуги, рассеивающее вещество не было обнаружено.

Базируясь на работе Уеты и др. (2001), мы построили модель, согласованно описывающую распределения поляризованного потока и интегрального спектра объекта в диапазоне длин волн от 360 нм до 850 мкм. В этой модели оболочка отражает историю вариаций темпа потери массы звездой по мере ее перехода со стадии AGB на стадию post-AGB и представляется в виде суммы четырех компонентов, разделяющихся на две группы. Первая группа — это более старая оболочка, сброшенная в ходе стадии AGB, — так называемый сверхветер и сферическое истечение, они имеют массы  $3 \times 10^{-4}$  и  $1.3 \times 10^{-4} M_{\odot}$  соответственно. Именно внутренний край сверхветра образует яркую туманность, видимую в отраженном свете как кольцо радиусом 1''. Также AGB-сверхветер и оболочка влияют на вид интегрального спектра объекта в дальнем ИК-диапазоне.

Вторая группа — это сверхветер и сферическое истечение на расстояниях от 120 до 800 а.е. от звезды, сброшенные уже на стадии post-AGB. Массы этих компонентов оцениваются в  $3 \times 10^{-9}$  и  $6.9 \times 10^{-7} M_{\odot}$

соответственно. Эти величины ограничены в основном поведением спектра теплового излучения пыли в диапазоне 5–20 мкм, поскольку в видимом диапазоне рассеянное излучение post-AGB оболочки не разрешается в нашем эксперименте.

Мы показали, что для согласованного описания рассеянного излучения в видимом диапазоне и интегрального теплового спектра необходимо допустить, что пыль в AGB компонентах оболочки по своим оптическим свойствам ближе к тугоплавкой органике, чем к аморфному углероду. Эту гипотезу подтверждает наличие эмиссионных линий в спектре объекта на длинах волн 8–30 мкм.

Мы также построили простую модель вспышки, наблюдавшейся у объекта в 1996–2004 гг. в ближнем ИК-диапазоне. Показано, что изменение спектра, сопровождавшее вспышку, может быть объяснено выбросом  $6 \times 10^{-10} M_{\odot}$  пыли в течение ~500 дней. Характер спада кривой блеска согласуется с гипотезой, что эта пыль начала удаляться от звезды с постоянной скоростью ~60 км/с. Хотя природа вспышки остается загадкой, она предоставляет уникальную возможность проследить движение вещества в атмосфере звезды при быстрых эволюционных изменениях — переходе с AGB стадии на post-AGB.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### КАРТА НЕВЯЗКИ В КООРДИНАТАХ НАКЛОНЕНИЕ–ПОЗИЦИОННЫЙ УГОЛ

Нормированная невязка — сумма квадратов отклонений модельной дифференциальной поляризационной видности от наблюдаемой, деленная на количество рассматриваемых точек. Мы вычисляли невязку в диапазоне частот от 0 до  $0.05 \times 2D/\lambda$ . Для расчета невязки мы зафиксировали все параметры на значениях, соответствующих модели org, см. раздел “МОДЕЛИРОВАНИЕ”. Варьировались лишь наклонение и позиционный угол. Результирующая карта представлена на рис. 8.

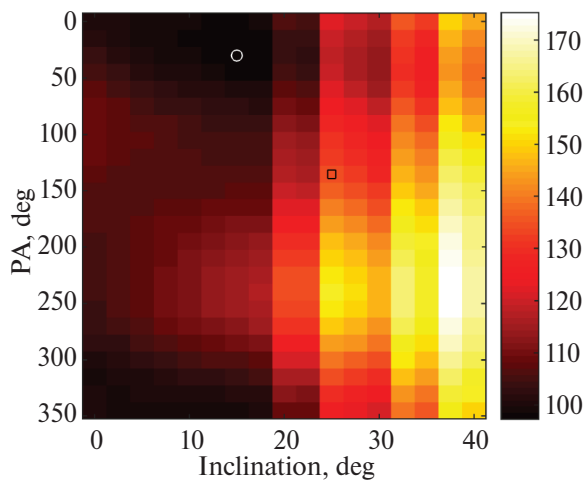
## БЛАГОДАРНОСТИ

Б.С. Сафонов (поляриметрические наблюдения и моделирование пылевой оболочки) и Н.П. Иконникова (анализ данных и написание статьи) благодарят за поддержку Российский научный фонд (грант 23-12-00092).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.





**Рис. 8.** Карта невязки модели и наблюдений методом дифференциальной спекл-поляриметрии на длине волны 625 нм. По горизонтальной оси отложено наклонение, по вертикальной — позиционный угол. Черным квадратом отмечено положение, соответствующее параметрам, найденным Уетой и др. (2001): наклонение 25°, позиционный угол 135°. Белым кружком — формальный минимум: наклонение 15°, позиционный угол 30°.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акрас и др. (S. Akras, J.C. Ram' rez V'elez, N. Nanouris, et al.), *MNRAS* **466**, 2948 (2017).
- Архипова и др. (V. Arkhipova, N. Ikonnikova, and G. Komissarova), *Peremennye Zvezdy* **29**, 1 (2009).
- Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al.), *Astron. J.* **161**, 147 (2021).
- Бигинг и др. (J.H. Biegging, G.D. Schmidt, P.S. Smith, and B.D. Oppenheimer), *Astrophys. J.* **639**, 1053 (2006).
- Бухаррабал и др. (V. Bujarrabal, A. Castro-Carrizo, J. Alcolea, and C. S'anchez Contreras), *Astron. Astrophys.* **377**, 868 (2001).
- Ван дер Вин и др. (W.E.C.J. van der Veen, H.J. Habing, and T.R. Geballe), *Astron. Astrophys.* **226**, 108 (1989).
- Вильямс и др. (P.M. Williams, D.H. Beattie, T.J. Lee, J.M. Stewart, and E. Antonopoulou), *MNRAS* **185**, 467 (1978).
- Вудсворт и др. (A.W. Woodworth, S. Kwok, and S.J. Chan), *Astron. Astrophys.* **228**, 503 (1990).
- Гледхилл и др. (T.M. Gledhill, A. Chrysostomou, J.H. Hough, and J.A. Yates), *MNRAS* **322**, 321 (2001).
- Гривняк и Бигинг (B.J. Hrivnak and J.H. Biegging), *Astrophys. J.* **624**, 331 (2005).
- Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, W. Lu, R.E. Maupin, and B.D. Spitzbart), *Astrophys. J.* **709**, 1042 (2010).
- Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, G. Van de Steene, H. Van Winckel, J. Sperauskas, D. Bohlender, and W. Lu), *Astrophys. J.* **846**, 96 (2017).
- Дайял и др. (A. Dayal, W.F. Hoffmann, J.H. Biegging, et al.), *Astrophys. J.* **492**, 603 (1998).
- Де Смедт и др. (K. De Smedt, H. Van Winckel, D. Kamath, et al.), *Astron. Astrophys.* **587**, A6 (2016).
- Ди Франческо и др. (J. Di Francesco, D. Johnstone, H. Kirk, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **175**, 277 (2008).
- Доминик и др. (C. Dominik, M. Min, and R. Tazaki), *Astrophys. Source Code Library*, ascl:2104.010 (2021).
- Дуллемонд и др. (C.P. Dullemond, A. Juhasz, A. Pohl, et al.), *Astrophys. Source Code Library*, ascl:1202.015 (2012).
- Зац и др. (L. Zacs, V.G. Klochkova, and V.E. Panchuk), *MNRAS* **275**, 764 (1995).
- Зац и др. (L. Zacs, M.R. Schmidt, and R. Szczerba), *MNRAS* **306**, 903 (1999).
- Зац и др. (L. Zacs, J. Sperauskas, F.A. Musaev, O. Smirnova, T.C. Yang, W.P. Chen, and M. Schmidt), *Astrophys. J.* **695**, L203 (2009).
- Зац и др. (L. Zacs, F.A. Musaev, B. Kaminsky, Y. Pavlenko, A. Grankina, J. Sperauskas, and B.J. Hrivnak), *Astrophys. J.* **813**, id. 3 (2016).
- Зубко и др. (V.G. Zubko, V. Mennella, L. Colangeli, and E. Bussoletti), *MNRAS* **282**, 1321 (1996).
- Иган и др. (M.P. Egan, S.D. Price, K.E. Kraemer, et al.), *VizieR Online Data Catalog V/114* (2003).
- Иконникова Н.П., Шенаврин В.И., Комиссарова Г.В., Бурлак М.А., Письма в Астрон. журн. **51**, 83 (2025) [N.P. Ikonnikova et al., *Astron. Lett.* **51** (2025)].
- Ишихара и др. (D. Ishihara, T. Onaka, H. Kataza, et al.), *Astron. Astrophys.* **514**, A1 (2010).
- Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
- Кутри и др. (R.M. Cutri, E.L. Wright, T. Conrow, et al.), *VizieR Online Data Catalog II/328* (2013).
- Клочкова и др. (V.G. Klochkova, V.E. Panchuk, and N.S. Tavolgenskaya), *Astrophys. Bull.* **64**, 155 (2009).
- Коллаборация GAIA (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, id. A1, 20 (2021).
- Кртижка и др. (J. Krticka, J. Kubat, and I. Krtickova), *Astron. Astrophys.* **635**, A173 (2020).
- Курниф (J. Koornneef), *Astron. Astrophys.* **128**, 84 (1983).
- Ламерс, Казинелли (H.J.G.L.M. Lamers and J.P. Cassinelli), *Introduction to Stellar Winds*, 1 (1999).
- Мартон и др. (G. Marton, I. Gezer, M. Madar'asz, et al.), *Astron. Astrophys.* **688**, A203 (2024).
- Мейкснер и др. (M. Meixner, C.J. Skinner, J.R. Graham, et al.), *Astrophys. J.* **482**, 897 (1997).
- Миллер Бертолами (M.M. Miller Bertolami), *Astron. Astrophys.* **588**, 25 (2016).
- Мишра и др. (A. Mishra, A. Li, and B.W. Jiang), *Astrophys. J.* **825**, 68 (2016).
- Накашима и др. (J. Nakashima, N. Koning, N.H. Volgenau, et al.), *Astrophys. J.* **759**, 61 (2012).
- Нери и др. (R. Neri, C. Kahane, R. Lucas, V. Bujarrabal, and C. Loup), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **130**, 1 (1998).
- Норрис и др. (B.R.M. Norris, P.G. Tuthill, M.J. Ireland, et al.), *Nature* **484**, 220 (2012).
- Омон и др. (A. Omont, C. Loup, T. Forveille, P. te Lintel Hekkert, H. Habing, and P. Sivagnanam), *Astron. Astrophys.* **267**, 515 (1993).
- Паргасарати и др. (M. Parthasarathy, S.K. Jain, and G. Sarkar), *Astron. J.* **129**, 2451 (2005).
- Пиклес (A.J. Pickles), *Publ. Astron. Soc. Pac.* **110**, 863 (1998).

43. Питт и др. (M.J. Peatt, N.D. Richardson, P.M. Williams, N. Karnath, V.I. Shenavrin, R.M. Lau, A.F.J. Moffat, and G. Weigelt), *Astrophys. J.* **956**, 109 (2023).
44. Поллак и др. (J.B. Pollack, D. Hollenbach, S. Beckwith, et al.), *Astrophys. J.* **421**, 615 (1994).
45. Редди и др. (B.E. Reddy, D.L. Lambert, G. Gonzalez, and D. Yong), *Astrophys. J.* **564**, 482 (2002).
46. Самусь и др. (N.N. Samus', E.V. Kazarovets, O.V. Durlевич, et al.), *Astron. Rep.* **61**, 80 (2017).
47. Сафонов и др. (B.S. Safonov, P.A. Lysenko, and A.V. Dodin), *Astron. Lett.* **43**, 344 (2017).
48. Сафонов и др. (B. Safonov, P. Lysenko, M. Goliguzova, and D. Cheryasov), *MNRAS* **484**, 5129 (2019).
49. Сафонов и др. (B.S. Safonov, S.G. Zheltoukhov, A.M. Tatarnikov, et al.), *Astron. J.* **169**, 140 (2025).
50. Сидеруд и др. (E. Siderud, K. Eriksson, S. Hofner, and S. Bladh), *Astron. Astrophys.* **697**, A52 (2025).
51. Страйжис В.Л., *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Мокслас, 1977).
52. Страхов и др. (I.A. Strakhov, B.S. Safonov, and D.V. Cheryasov), *Astrophys. Bull.* **78**, 234 (2023).
53. Тоси и др. (S. Tosi, D. Kamath, F. Dell'Agli, et al.), *Astron. Astrophys.* **673**, A41 (2023).
54. Траммелл и др. (S.R. Trammell, H.L. Dinerstein, and R.W. Goodrich), *Astron. J.* **108**, 984 (1994).
55. Уэта и др. (T. Ueta, M. Meixner, and M. Bobrowsky), *Astrophys. J.* **528**, 861 (2000).
56. Уэта и др. (T. Ueta, M. Meixner, P.M. Hinz, et al.), *Astrophys. J.* **557**, 831 (2001).
57. Федотьева и др. (A.A. Fedoteva, A.M. Tatarnikov, B.S. Safonov, et al.), *Astron. Lett.* **46**, 38 (2020).
58. Хэ и др. (J.H. He, R. Szczerba, T.I. Hasegawa, and M.R. Schmidt), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **210**, 26 (2014).
59. Хелоу, Уокер (G. Helou and D.W. Walker), *Infrared Astron. Satellite (IRAS) Catalogs and Atlases* **7**, 1 (1988).
60. Хеннинг, Стогниенко (T. Henning and R. Stognienko), *Astron. Astrophys.* **311**, 291 (1996).
61. Цю и др. (J.J. Qiu, Y. Zhang, J.-I. Nakashima, J.-S. Zhang, F. Li, D.-R. Lu, X.-D. Tang, X.-L. Yu, and L.-W. Jia), *Astron. J.* **167**, 91 (2024).
62. Щерба и др. (R. Szczerba, A. Omont, K. Volk, P. Cox, and S. Kwok), *Astron. Astrophys.* **317**, 859 (1997).