

УДК 524.336

ПЫЛЕВАЯ ОБОЛОЧКА ВОКРУГ УГЛЕРОДНОЙ ЗВЕЗДЫ RWLMi

© 2026 А. А. Вахонин^{1,2}, Б. С. Сафонов¹,
И. А. Страхов¹, А. М. Татарников^{1,2*}, В. И. Шенаврин¹

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 20 июня 2025 года; после доработки 24 октября 2025 года; принята к публикации 15 ноября 2025 года

Представлены результаты инфракрасных фотометрических наблюдений углеродной мириды RWLMi в полосах *JHKLM*, выполненных с 1994 г. по 2024 г. На основе наблюдений 17 пульсационных циклов звезды получены новые эфемериды блеска: $JD_{\max} = 2459677^{\text{d}0} + 610^{\text{d}9}E$. Обнаружен синусоидальный тренд среднего уровня блеска с периодом около 7300 дней и амплитудой примерно 1^{m} в полосах *JHK*. Из распределения энергии в спектре в диапазоне длин волн 0.5–100 мкм получена оценка болометрического потока $F_{\text{bol}} = 2.6 \times 10^{-6} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ в максимуме блеска, что соответствует светимости $L_{\max} \approx 8500 L_{\odot}$. Моделирование излучения оболочки RWLMi выполнено с помощью программы RAMDC-3D в приближении сферически симметричной формы с постоянным темпом потери вещества. Основные параметры оболочки: оптическая толщина $\tau_V \approx 12.7$, внутренний радиус $R_{\text{in}} \approx 8 \text{ а.е.}$, внешний радиус $R_{\text{out}} \approx 17000 \text{ а.е.}$, скорость потери массы $\dot{M} = 6 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$.

Ключевые слова: *звезды: AGB и post-AGB — звезды: отдельные: RWLMi — методы: наблюдательные — технические средства: фотометрические — программное обеспечение: средства моделирования*

1. ВВЕДЕНИЕ

RWLMi — долгопериодическая полуправильная переменная типа SRA (Samus' et al., 2017). Она была открыта в ходе Двухмикронного обзора неба (2MASS¹), где получила обозначение CIT 6 как яркий инфракрасный источник с одним из рекордных показателей цвета: $I - K \geq 9^{\text{m}}$ (Ulrich et al., 1966).

Значения периода колебаний блеска RWLMi в разных источниках отличаются. Например, в Samus' et al. (2017) приведен период 640 суток, а в Alksnis (1995) — 628 дней для блеска в красных лучах в интервале после 1987 г. и 605 дней до 1986 г. При этом фотометрическое поведение звезды сильно зависит от длины волны.

RWLMi принадлежит к углеродным звездам асимптотической ветви гигантов (AGB), ее светимость примерно равна $10^4 L_{\odot}$ (Loup et al., 1993). Звезда с высоким темпом теряет массу (средняя скорость потери, согласно Schöier et al. (2002), составляет $5 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$) и окружена плотной

пылевой оболочкой, расширяющейся со скоростью 17 км с^{-1} (Schöier and Olofsson, 2000). Наблюдения, сделанные с дифракционным пределом на телескопе Кеck I в ближнем инфракрасном диапазоне, показывают наличие небольшой асимметричной биполярной туманности. Данное обстоятельство позволило Moppier et al. (2000) предположить, что объект переходит в фазу протопланетарной туманности. На картах распределения излучения молекулы CO было обнаружено присутствие слабых рассеянных дуг на расстоянии $1''$ – $4''$ от центральной звезды. В связи с этим Kim et al. (2015) предположили, что звезда имеет спутник спектрального класса A–F главной последовательности, находящийся на расстоянии более 40 а.е.

Целью нашей работы является определение параметров пылевой оболочки RWLMi. Отличие от предшествующих работ (Schöier et al., 2002; Bogdanov and Taganova, 2005) заключается в том, что в качестве центрального источника излучения вместо абсолютно черного тела мы использовали синтетические спектры углеродных AGB-звезд (Aringer et al., 2009), а также применили собственные спектральные наблюдения в ближнем ИК-диапазоне, длинные ряды ИК-фотометрии в

*E-mail: andrew@sai.msu.ru

¹<https://www.ipac.caltech.edu/2mass/overview/about2mass.html>

широком спектральном диапазоне (от 1 до 5 мкм) и задействовали метод МСМС (Markov chain Monte Carlo) для определения оптимальных параметров модели и их апостериорной вероятности.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические инфракрасные наблюдения RW LMi в полосах $JHKLM$ проводились с 1994 г. на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ (КАС) с одноэлементным фотометром на базе InSb-фотоиода. Описание фотометра и калибровки приведено в работе Shenavrin et al. (2011). При наблюдениях в качестве стандарта использовалась звезда BS 4100 ($J = 2^m71$, $H = 2^m27$, $K = 2^m16$, $L = 2^m10$ и $M = 2^m22$). Фильтр J , установленный в криостате фотометра, имеет небольшую «красную утечку» — пропускание вне своей рабочей полосы, но еще в пределах чувствительности приемника. Она сказывается на результатах лишь при наблюдениях объектов, имеющих большие значения $J - M$. Для исследования этого влияния в колесо фильтров криостата в 2022 г. был установлен дополнительный фильтр J' , склеенный из двух стандартных фильтров J . Перемножение кривых пропускания фильтров позволяет ослабить влияние «красной утечки» в несколько десятков раз, незначительно уменьшая полезный сигнал. Сопоставление разностей блеска в полосах J и J' с показателем цвета $J - M$ позволило для $J - M > 7^m$ получить поправки $dJ = 0.116(J - M) - 0.61$. Результаты фотометрических наблюдений с учетом поправки в полосе J приведены в таблице 1. Точность оценок блеска составляет 0^m02 в полосах HKL и 0^m05 в полосах J и M .

Спектральные инфракрасные наблюдения RW LMi в диапазоне длин волн 1–2.45 мкм проводились с камерой-спектрографом ASTRONIRCAM (Nadjir et al., 2017), установленной на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ (Shatsky et al., 2020). Детальное описание спектрального режима работы прибора приведено в статье Zheltoukhov et al. (2020), а процедуры первичной редукции получаемых данных — в работе Tatarnikov et al. (2023). Для получения спектров ярких объектов используется режим кросс-дисперсии, в котором четыре отдельных спектральных порядка — 1.04–1.24 мкм (Y -порядок), 1.15–1.48 мкм (J -порядок), 1.51–1.88 мкм (H -порядок) и 1.78–2.45 мкм (K -порядок) — разбиваются на пары: на один кадр попадают порядки $Y + J$ или $H + K$. В коротковолновой части порядки регистрируются с большим перекрытием по длине волны, а в длинноволновой на перекрывающийся участок попадает сильная полоса поглощения атмосферы. Попарная регистрация диапазонов

позволяет быть уверенным в относительной взаимной калибровке спектров в этих диапазонах. При наблюдениях использовалась узкая входная щель шириной $0''.9$, что обеспечивало спектральную разрешающую силу $R = 1030-1270$, в зависимости от диапазона. Вынос за атмосферу производился с помощью теллурических стандартов — звезд спектрального класса A0V, наблюдавшихся на близкой воздушной массе. Используемые нами далее спектры были получены 24 января 2024 г. и 25 февраля 2024 г. с экспозициями 293 с в диапазонах YJ и 73 с в HK .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 1 представлены результаты ИК фотометрических наблюдений RW LMi, проведенных в период с 1994 по 2023 г. На кривых блеска во всех полосах отчетливо видны колебания блеска с основным периодом, связанные с пульсациями звезды, и долгопериодический тренд, характеризующий плавные изменения среднего уровня блеска. Заметно, что моменты максимумов изменения среднего уровня блеска примерно одинаковы для всех полос. Приблизительная оценка характерного периода этих изменений около 7300 суток (20 лет), полная амплитуда меняется от 1^m-1^m2 в полосах JHK до 0^m2 в полосе M .

Показатели цвета звезды также меняются с пульсационным периодом: чем звезда ярче, тем голубее ее показатели цвета, что характерно для мирид (см., например, Fedotova et al., 2020). На графике изменения показателя цвета $J - K$ (см. рис. 1) выделяется интервал, близкий к дате $JD = 2455700^d$, когда наблюдалось значительное увеличение этого показателя, вызванное глубоким минимумом блеска в полосе J . Этот минимум оказался даже глубже последующих, пришедшихся на период снижения среднего уровня блеска. В целом видно, что долгопериодические изменения показателей цвета носят менее правильный характер, чем изменения блеска.

Средний за весь период наших наблюдений блеск RW LMi составил $\langle J \rangle = 5^m71$, $\langle H \rangle = 3^m49$, $\langle K \rangle = 1^m39$, $\langle L \rangle = -1^m29$, $\langle M \rangle = -2^m17$. Согласно Aringer et al. (2009), для углеродных звезд без околозвездных пылевых оболочек показатель $J - K < 2^m$. Столь большая наблюдаемая величина показателя цвета, $\langle J - K \rangle \approx 4^m3$, указывает или на большое межзвездное поглощение, или на наличие околозвездной пылевой оболочки. Используя расстояние до звезды из Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023) и карту межзвездного поглощения (Green et al., 2019), можно обнаружить, что при расстоянии до RW LMi 323 пк избыток цвета, связанный с межзвездным покраснением, отсутствует. Таким

Таблица 1. Результаты фотометрических *JHKLM*-наблюдений RW LMi в 1994–2023 гг.

JD –2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD –2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD –2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD –2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)
49457.3	6.24	3.86	1.60	–1.30	–2.34	50920.3	6.88	4.55	2.38	–0.63	–1.80	51865.6	5.66	3.19	1.06	–1.55	–2.39	52367.4	4.98	2.66	0.66	–1.86	–2.69
50177.5	6.80	4.47	2.20	–0.77	–1.81	50942.3	6.89	4.60	2.27	–0.70	–1.71	51901.6	5.86	3.46	1.34	–1.31	–2.21	52382.3	5.00	2.68	0.67	–1.83	–2.61
50178.3	6.73	4.48	2.19	–0.79	–1.93	51176.5	5.55	3.19	1.04	–1.69	–2.62	51934.5	6.14	3.73	1.58	–1.10	–2.00	52391.3	5.01	2.69	0.68	–1.81	–2.56
50204.3	6.78	4.45	2.21	–0.72	–1.87	51180.5	5.44	3.16	1.03	–1.73	–2.73	51950.5	6.25	3.82	1.66	–0.99	–1.92	52421.3	5.12	2.79	0.77	–1.77	–2.46
50212.4	6.79	4.47	2.17	–0.77	–1.86	51199.5	5.55	3.16	1.04	–1.74	–2.72	51976.4	6.42	4.06	1.84	–0.84	–1.75	52599.6	6.06	3.67	1.60	–0.90	–1.66
50559.4	5.22	2.96	0.76	–1.90	–2.53	51205.5	5.53	3.25	1.08	–1.66	–2.59	51982.4	6.48	4.05	1.86	–0.87	–1.75	52675.5	5.95	3.62	1.59	–0.81	–1.63
50562.3	5.12	2.91	0.82	–1.85	–2.74	51235.4	5.84	3.43	1.21	–1.63	–2.39	51986.4	6.54	4.17	1.94	–0.84	–1.68	52694.5	5.89	3.59	1.56	–0.84	–1.64
50569.3	5.31	3.07	0.97	–1.69	–2.78	51302.3	6.34	3.90	1.69	–1.20	–2.03	52003.3	6.62	4.18	2.01	–0.67	–1.63	52700.4	5.85	3.57	1.54	–0.84	–1.72
50754.6	6.66	4.32	2.09	–0.77	–1.87	51514.6	7.02	4.56	2.21	–0.67	–1.66	52007.3	6.59	4.16	1.97	–0.75	–1.59	52716.4	5.83	3.54	1.52	–0.87	–1.74
50817.6	6.91	4.65	2.35	–0.57	–1.66	51522.6	7.21	4.70	2.33	–0.56	–1.53	52012.3	6.60	4.16	1.97	–0.78	–1.62	52739.4	5.73	3.44	1.46	–0.91	–1.71
50867.5	7.00	4.66	2.37	–0.55	–1.74	51548.6	6.91	4.47	2.15	–0.72	–1.73	52031.3	6.62	4.21	2.00	–0.69	–1.73	52751.3	5.67	3.38	1.38	–0.98	–1.83
50869.5	7.09	4.64	2.35	–0.62	–1.91	51619.4	6.09	3.66	1.45	–1.36	–2.28	52217.6	5.61	3.27	1.13	–1.40	–2.23	52773.3	5.57	3.32	1.31	–1.09	–1.88
50873.4	7.04	4.64	2.37	–0.60	–1.66	51641.3	5.82	3.40	1.17	–1.55	–2.48	52301.5	5.12	2.80	0.76	–1.82	–2.58	52806.3	5.26	3.00	1.07	–1.36	–2.04
50874.4	7.09	4.67	2.38	–0.60	–1.64	51645.3	5.72	3.31	1.13	–1.58	–2.46	52309.5	5.08	2.78	0.74	–1.80	–2.57	53003.6	4.58	2.31	0.47	–1.90	–2.62
50908.4	6.93	4.59	2.30	–0.67	–1.73	51651.2	5.64	3.21	1.05	–1.66	–2.57	52313.5	5.04	2.75	0.71	–1.82	–2.60	53072.5	4.87	2.54	0.72	–1.64	–2.34
50910.3	6.92	4.53	2.26	–0.68	–1.72	51682.3	5.58	3.18	1.01	–1.71	–2.49	52332.5	5.01	2.69	0.69	–1.84	–2.61	53096.4	5.00	2.73	0.87	–1.52	–2.14
50918.3	6.93	4.56	2.31	–0.68	–1.80	51706.3	5.55	3.13	0.98	–1.72	–2.54	52348.4	4.97	2.67	0.67	–1.86	–2.65	53112.3	5.09	2.83	0.94	–1.45	–2.19

Таблица 1. (Продолжение)

JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)
53127.3	5.21	2.93	1.05	-1.34	-2.00	54483.6	5.80	3.56	1.57	-0.92	-1.78	55554.6	5.64	3.25	1.09	-1.49	-2.33	56329.5	6.32	4.15	1.99	-0.81	-1.84
53356.6	5.33	3.16	1.26	-1.06	-1.85	54522.4	5.77	3.50	1.49	-1.00	-1.82	55624.4	6.19	3.78	1.58	-1.07	-1.97	56350.4	6.28	4.11	1.94	-0.82	-1.75
53423.5	4.75	2.61	0.73	-1.65	-2.38	54577.3	5.58	3.36	1.38	-1.13	-1.98	55660.3	-	-	-	-0.89	-	56358.4	6.22	4.08	1.92	-0.82	-1.80
53434.4	4.69	2.57	0.56	-1.84	-2.61	54604.3	5.41	3.20	1.21	-1.28	-2.02	55672.3	6.39	4.01	1.80	-0.91	-1.84	56409.3	6.09	3.96	1.79	-0.93	-1.78
53485.3	4.51	2.36	0.48	-1.89	-2.67	54781.6	4.36	2.24	0.41	-2.03	-2.90	55692.3	6.41	4.08	1.83	-0.91	-1.89	56411.3	6.07	3.94	1.78	-0.95	-1.90
53747.5	5.22	2.98	1.07	-1.27	-2.03	54852.5	4.55	2.40	0.54	-1.89	-2.72	55692.3	-	-	-	-0.91	-	56430.3	6.02	3.87	1.74	-0.99	-1.95
53788.5	5.46	3.22	1.28	-1.06	-1.85	54895.4	4.90	2.70	0.82	-1.68	-2.54	55700.3	6.42	4.04	1.79	-0.91	-1.82	56644.6	4.93	2.81	0.74	-1.87	-2.73
53816.4	5.59	3.31	1.38	-0.94	-1.75	54930.3	5.25	3.02	1.05	-1.48	-2.35	55873.6	5.52	3.21	1.05	-1.54	-2.41	56650.5	4.95	2.82	0.74	-1.91	-2.72
53828.4	5.56	3.32	1.37	-0.97	-1.76	54931.3	5.25	3.01	1.07	-1.46	-2.35	55962.5	5.02	2.75	0.66	-1.90	-2.63	56693.4	5.01	2.89	0.82	-1.81	-2.71
53873.3	5.59	3.42	1.42	-0.90	-1.65	54942.3	5.38	3.08	1.12	-1.42	-2.26	56004.4	4.88	2.65	0.58	-1.98	-2.66	56738.3	5.25	3.09	1.00	-1.67	-2.57
54111.5	4.34	2.21	0.40	-1.98	-2.74	54964.3	5.55	3.32	1.30	-1.27	-2.14	56012.3	4.88	2.63	0.58	-1.98	-2.85	56769.3	5.41	3.27	1.19	-1.51	-2.41
54150.5	4.32	2.23	0.37	-1.97	-2.77	54983.3	5.81	3.49	1.45	-1.13	-1.88	56020.3	4.87	2.64	0.56	-1.97	-2.85	56794.3	5.59	3.46	1.35	-1.36	-2.27
54190.4	4.33	2.23	0.40	-1.99	-2.76	55252.4	5.25	2.98	0.92	-1.64	-2.49	56031.3	4.88	2.66	0.56	-1.96	-2.73	56967.6	6.35	4.25	2.04	-0.77	-1.83
54217.3	4.44	2.26	0.47	-1.92	-2.74	55275.4	5.00	2.75	0.72	-1.78	-2.60	56057.3	4.91	2.68	0.62	-1.94	-2.59	57005.7	6.16	4.16	1.99	-0.82	-1.86
54224.3	4.46	2.33	0.47	-1.88	-2.61	55291.3	4.83	2.58	0.61	-1.87	-2.70	56082.3	4.96	2.75	0.70	-1.91	-2.70	57036.5	6.05	4.08	1.92	-0.87	-1.82
54428.6	5.72	3.48	1.51	-0.92	-1.78	55309.3	4.77	2.54	0.57	-1.91	-2.85	56292.5	6.34	4.15	1.96	-0.82	-1.80	57106.3	5.23	3.29	1.19	-1.53	-2.48
54476.6	5.79	-	1.58	-0.90	-1.75	55319.3	4.78	2.53	0.56	-1.92	-2.69	56307.6	6.31	4.12	1.97	-0.80	-1.72	57137.3	5.06	3.08	1.03	-1.67	-2.61

Таблица 1. (Продолжение)

JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	JD -2400000	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)
57441.4	5.92	3.92	1.82	-1.05	-1.87	58910.3	6.10	4.04	1.85	-1.01	-2.00	59265.4	6.01	3.93	1.73	-1.09	-1.97	59744.3	5.11	-	-	-	-
57485.3	6.25	4.23	2.08	-0.78	-1.67	58921.4	5.98	3.91	1.72	-1.12	-2.12	59301.3	6.42	4.26	2.02	-0.86	-1.81	59896.6	6.31	4.15	1.89	-0.98	-1.80
57529.3	6.39	4.35	2.21	-0.69	-1.60	58925.3	5.88	3.84	1.70	-1.18	-2.16	59305.3	6.45	4.32	2.07	-0.85	-1.76	59896.6	6.62	-	-	-	-
58125.5	6.56	4.43	2.23	-0.67	-1.66	58934.4	5.73	3.68	1.57	-1.28	-2.22	59314.3	6.45	4.37	2.12	-0.82	-1.74	59947.7	6.68	4.53	2.19	-0.72	-1.57
58213.3	6.42	4.31	2.09	-0.78	-1.77	58948.3	5.44	3.42	1.32	-1.44	-2.40	59326.4	6.56	4.44	2.18	-0.74	-1.61	59947.7	7.00	-	-	-	-
58232.3	6.38	4.28	2.07	-0.80	-1.79	58963.3	5.27	3.27	1.16	-1.60	-2.45	59362.3	6.75	4.56	2.31	-0.66	-1.56	59985.4	6.72	4.56	2.23	-0.66	-1.69
58253.3	6.36	4.26	2.06	-0.85	-1.71	58965.3	5.24	3.22	1.14	-1.61	-2.53	59540.7	5.58	3.56	1.40	-1.35	-2.25	59985.4	7.08	-	-	-	-
58520.4	4.82	2.83	0.79	-1.85	-2.72	58969.3	5.20	3.18	1.08	-1.67	-2.67	59622.5	4.75	2.77	0.74	-1.90	-2.69	60028.4	6.65	4.53	2.17	-0.72	-1.70
58600.3	5.36	3.31	1.22	-1.52	-2.38	58971.3	5.18	3.16	1.06	-1.66	-2.54	59663.4	4.61	2.67	0.65	-1.96	-2.82	60028.4	7.03	-	-	-	-
58798.6	6.60	4.47	2.21	-0.71	-1.68	58972.3	5.15	3.12	1.04	-1.69	-2.55	59663.4	4.94	-	-	-	-	60068.3	6.56	4.44	2.10	-0.76	-1.71
58824.6	6.48	4.39	2.15	-0.75	-1.71	58980.3	5.05	3.05	0.98	-1.74	-2.55	59697.3	4.67	2.64	0.61	-2.03	-2.78	60068.3	6.88	-	-	-	-
58861.7	6.47	4.34	2.12	-0.76	-1.70	59000.3	4.98	2.91	0.87	-1.81	-2.60	59697.3	4.90	-	-	-	-	60247.6	4.98	2.86	0.74	-1.90	-2.64
58874.5	6.38	4.31	2.09	-0.83	-1.81	59010.3	4.95	2.92	0.88	-1.83	-2.57	59708.3	4.66	2.70	0.64	-1.94	-2.85	60247.6	5.23	-	-	-	-
58889.5	6.33	4.26	2.04	-0.86	-1.86	59161.7	5.16	3.09	0.99	-1.72	-2.55	59708.3	4.92	-	-	-	-	60308.5	4.89	2.77	0.67	-1.96	-2.76
58897.4	6.30	4.18	1.94	-0.96	-1.93	59187.6	5.34	3.27	1.14	-1.57	-2.43	59712.4	4.74	2.69	0.65	-1.99	-2.73	60308.5	5.15	-	-	-	-
58898.4	6.28	4.21	1.96	-0.95	-1.95	59198.6	5.42	3.33	1.22	-1.51	-2.33	59712.4	4.94	-	-	-	-						
58905.4	6.26	4.12	1.92	-0.96	-1.91	59217.5	5.55	3.50	1.36	-1.42	-2.30	59744.3	4.91	2.81	0.78	-1.87	-						

ВАХОНИН и др.

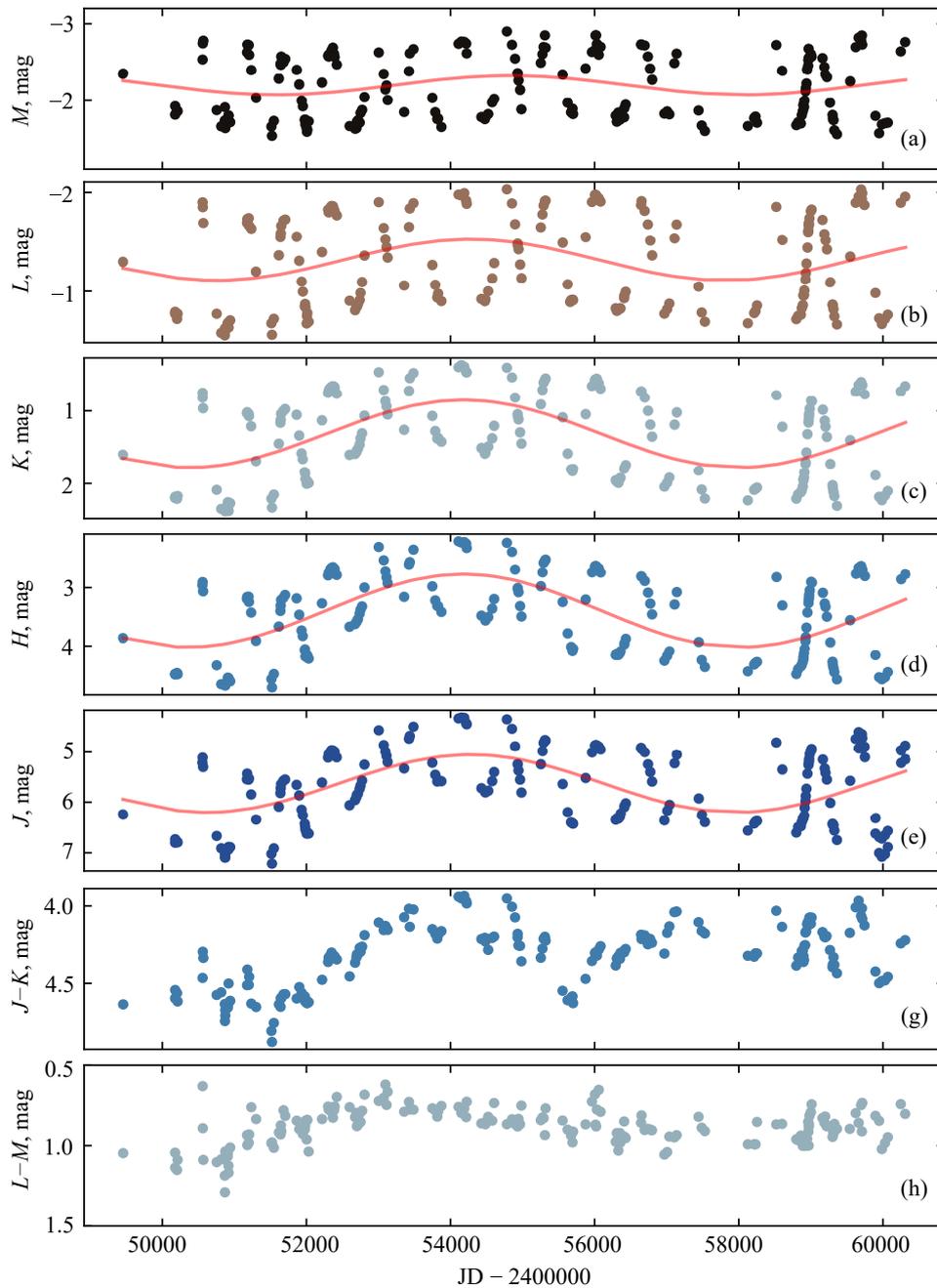


Рис. 1. Кривые изменения блеска в полосах M (a), L (b), K (c), H (d), J (e) и показателей цвета $J - K$ (f), $L - M$ (g) RWLMi, полученные в КАС в период 2019–2023 гг. Красные кривые — аппроксимация долгопериодического тренда синусоидой, параметры которой определены с помощью МНК.

образом, большой показатель цвета обусловлен поглощением излучения центральной углеродной звезды веществом околозвездной пылевой оболочки.

В Общем каталоге переменных звезд (General Catalogue of Variable Stars, GCVS²⁾) (Samus' et al., 2017) доступна информация об эфемеридах

²⁾<http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/intr.htm>

RWLMi: $JD_{\max} = 2441880^d + 640^d E$. Они были определены Alksnis and Khozov (1975) по наблюдениям всего трех пульсационных циклов в начале 1970-х годов и устарели. Позже в работе Alksnis (1995) по наблюдениям в оптическом диапазоне длин волн была получена другая оценка периода: $P = 628^d$. Результаты фотометрических наблюдений в КАС позволяют уточнить период. Для этого мы использовали программу WinEFK (автор

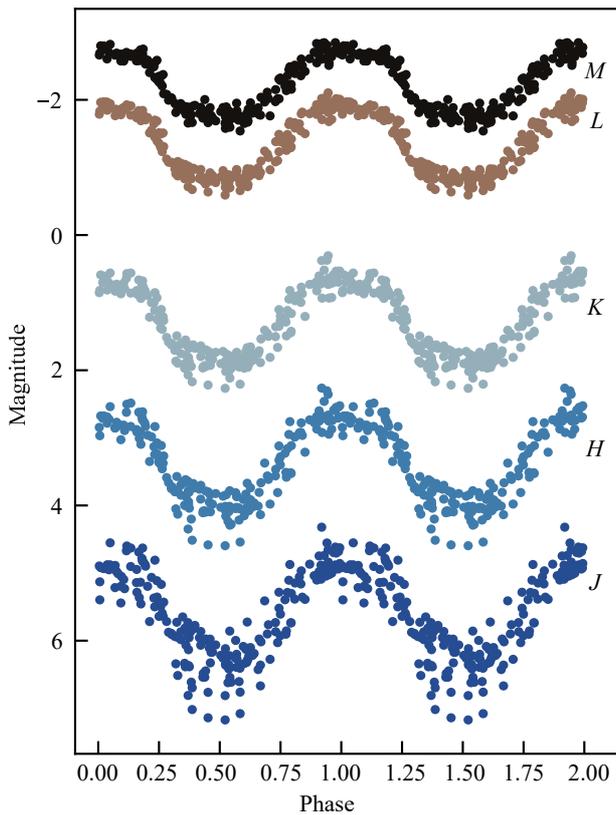


Рис. 2. Фазовые кривые RW LMi в полосах J , H , K , L , M , свернутые с периодом $610^{\text{d}}9$ с вычтенным вкладом долговременной переменности.

В. П. Горанский). В итоге были рассчитаны следующие эфемериды: $\text{JD}_{\text{max}} = 2459677^{\text{d}}0 + 610^{\text{d}}9E$. При этом минимум приходится на фазу $\varphi \approx 0.5$. Фазовые кривые приведены на рис. 2.

4. КОМПИЛЯЦИЯ SED

Определение параметров звезды и околозвездной оболочки осуществляется через моделирование распределения энергии в спектре объекта (SED) и через сравнение результата с наблюдениями. При этом необходимо использовать максимально широкий диапазон длин волн. Основной проблемой при компиляции SED по данным из различных источников в нашем случае является значительная переменность блеска звезды. Фотометрические и спектральные данные на разных инструментах были получены на разных фазах переменности (пульсационной и вековой), что необходимо принимать во внимание. Для моделирования SED нами была выбрана фаза максимума.

Мы воспользовались фотометрическими данными из нескольких источников. Блеск в полосе V был взят из базы данных AAVSO для фазы,

наиболее близкой к среднему по амплитуде максимуму ($\varphi = 0.97$). Данные $JHLKM$ -фотометрии взяты из таблицы 1 и также соответствуют среднему максимуму блеска. Из ИК-обзоров всего неба данные фотометрии RW LMi есть в каталогах WISE, AKARI и IRAS. Однако из-за высокой яркости звезды данные из каталога WISE получены с пересветом, и мы не использовали их в работе. Это типичная ситуация для многих ярких AGB-звезд (Tatarnikov et al., 2024a). Результаты фотометрии спутников AKARI и IRAS (на длинах волн 60 и 100 мкм) хорошо совпадают со спектральными данными ISO (см. ниже), поэтому мы их отдельно не использовали. Фильтр IRAS на 12 мкм имеет большую ширину и захватывает сильную спектральную особенность на 11.3 мкм, характерную для углеродных звезд, поэтому он не использовался при вычислении невязки. Забегая вперед, отметим, что поток, вычисленный с помощью свертки модельного SED с кривой пропускания фильтра, близок к наблюдаемому потоку IRAS: 8.3×10^{-15} и 6.91×10^{-15} Вт м⁻² мкм⁻¹ соответственно. Таким образом, из каталога IRAS (Neugebauer et al., 1984) была взята только точка на 25 мкм; из каталога CIO (Gezari et al., 1994) — точка на 18 мкм.

На рис. 3 представлены два спектра RW LMi, полученные на фазах, близких к максимуму. Несмотря на наличие мощной теплой пылевой оболочки, которая своим излучением должна замыывать линии поглощения, образовавшиеся в атмосфере звезды, в спектре хорошо видны типичные для углеродных звезд молекулярные полосы CO, CN, C₂, HCN, C₂H₂. Их контраст значительно ниже, чем в спектрах других углеродных звезд, наблюдавшихся нами (V CrB, T Dra, V Cyg и др.), что, возможно, указывает на большее влияние излучения оболочки. Для представления общей формы кривой распределения энергии в области 1–2.5 мкм мы использовали спектр, полученный в КГО 24 января 2024 г. в фазе $\varphi = 0.07$. Что касается нормировки потока, отдельно в каждом из спектральных порядков использовались результаты фотометрии в полосах J , H и K для среднего максимума блеска. С целью сокращения времени расчетов при моделировании спектр представлялся пятнадцатью точками.

В дальнем ИК-диапазоне для RW LMi имеется спектр, полученный с помощью прибора LWS космической обсерватории ISO (Sloan et al., 2003) вблизи фазы минимума блеска. Мы использовали его в общем SED, так как в этом диапазоне длин волн поток излучения не так чувствителен к колебаниям блеска центральной звезды, особенно у объекта с очень плотной пылевой оболочкой. Ниже будет показано, что основным источником излучения, нагревающим внешние слои оболочки, из-за

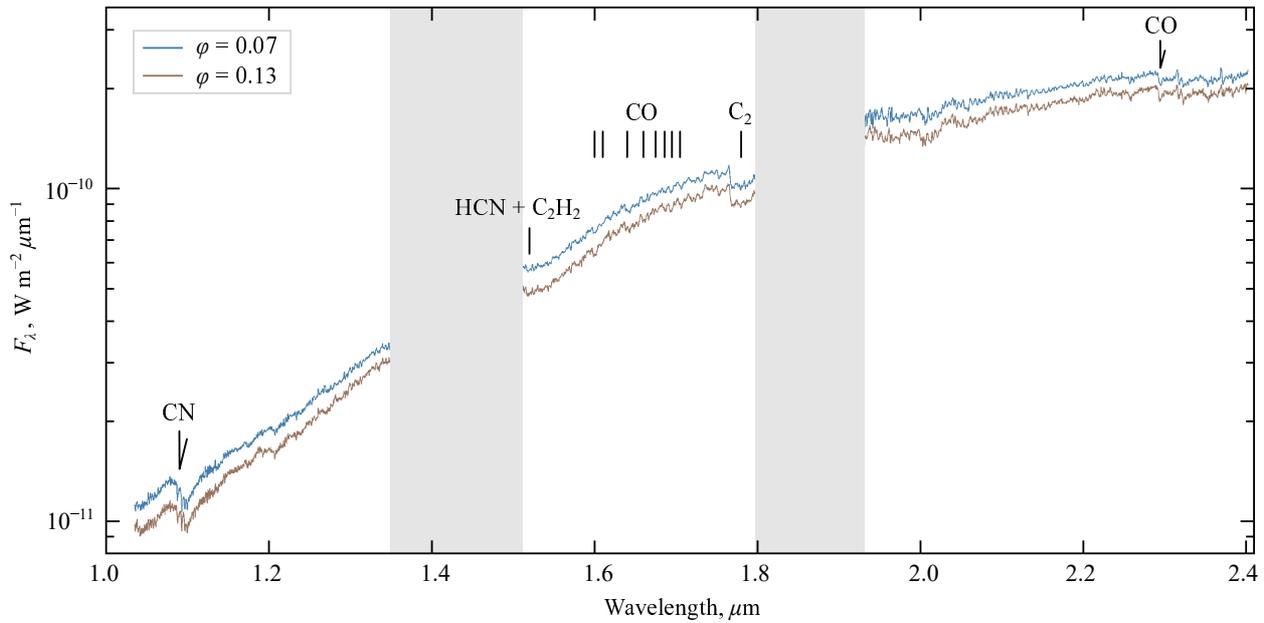


Рис. 3. Инфракрасные спектры RW LMi, полученные в фазах, близких к максимуму блеска.

большой оптической толщи является ее внутренний пылевой слой (а не углеродная звезда в центре оболочки), что также снижает влияние переменности звезды на нагрев внешних слоев и, соответственно, на их излучение в дальнем ИК-диапазоне. Эти спектры тоже были представлены несколькими точками.

Полученный SED позволяет сделать оценку болометрического потока в максимуме блеска: $F_{\text{bol}} = 2.6 \times 10^{-6} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. В предположении сферической симметрии оболочки и расстояния до звезды 323 пк (Bailer-Jones et al., 2021) такой поток соответствует светимости $L_{\text{max}} \approx 8500 L_{\odot}$.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ

Начиная с 2000 г. опубликовано несколько работ с результатами исследования формы пылевой оболочки RW LMi. В работе Monnier et al. (2000) приведены изофоты, полученные на телескопе Кекар I с дифракционным пределом на длинах волн 2.2 мкм и 3.1 мкм. Их форма плавно изменяется по мере удаления от центрального источника. Изофоты на длине волны 2.2 мкм, соответствующие 25% от максимальной интенсивности, в целом имеют круглую форму, тогда как изофоты, соответствующие (0.8–3.1)% от максимальной интенсивности, имеют вытянутую форму, с отношением сторон 1 : 2. Похожая форма наблюдается и на длине волны 3.1 мкм (где самые внешние части являются более симметричными). Для расстояния 323 пк (Bailer-Jones et al., 2021) линейные размеры

вытянутой плотной части изображения составляют около $20 \times 30 \text{ а.е.}$ Monnier et al. (2000) предположили, что эта структура может являться пылевым диском.

Более позднее исследование RW LMi в далеком ультрафиолетовом диапазоне (Sahai and Mack-Crane, 2014) показало присутствие кольцевой туманности диаметром $15' - 18'$ (то есть около 1.5 пк), порожденной ударной волной. Наблюдения в радиодиапазоне (Kim et al., 2015) выявили присутствие слоистой газовой структуры в оболочке RW LMi, прослеженной авторами до расстояния около 3000 а.е. от центральной звезды. При этом в первом приближении слои можно считать сферически симметричными. Таким образом, наиболее правдоподобной выглядит модель, состоящая из диска и окружающей его многослойной пылевой оболочки. При этом диск наблюдается практически с ребра.

В работе Safonov et al. (2025) пылевая оболочка углеродной звезды V Cug имеет схожую структуру: внутри сферически симметричной протяженной оболочки находится компактный пылевой диск. Авторы проводили моделирование SED как с учетом диска, так и без него и в обоих случаях получили хорошее совпадение с наблюдениями и близкие параметры сферической составляющей. Различия в моделях проявились лишь при исследовании поляризованного излучения. Однако модель с диском имеет много свободных параметров. Отсутствие спектров объекта, полученных в среднем ИК-диапазоне (например, спектров ISO SWS), и малое число фотометрических оценок потока в средней ИК-области не позволяют надежно

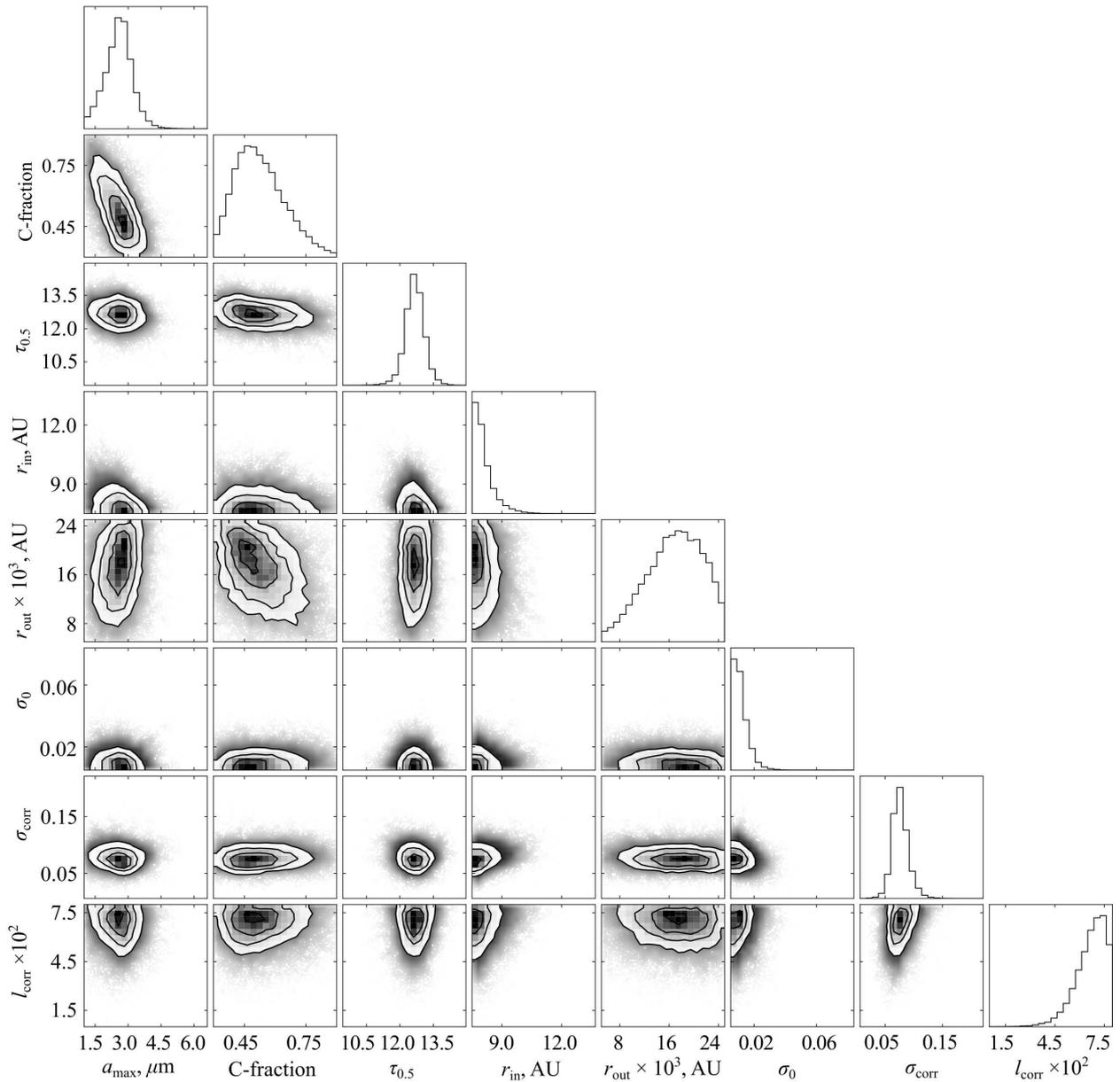


Рис. 4. Апостериорная вероятность параметров модели.

их определить. Поэтому для уменьшения числа свободных параметров мы, опираясь на результаты Safonov et al. (2025), считали околозвездную оболочку сферически симметричной, образованной при постоянном темпе потери вещества звездой (то есть была зафиксирована форма зависимости плотности оболочки от расстояния $\rho \sim r^{-2}$).

Пылевые оболочки углеродных звезд обычно состоят из смеси пылинок аморфного углерода и карбида кремния (см., например, Fedoteva et al., 2020; Tatarnikov et al., 2024b, и ссылки в них). Мы приняли такой состав оболочки и для RW LMi, оставив относительное содержание пылинок этих типов свободным параметром. Оптические кон-

станты для этих типов пылинок были взяты из работ Suh (2000) (аморфный углерод) и Regourie (1988) (карбид кремния). Углеродные звезды являются одним из основных поставщиков пыли в межзвездную среду (Höfner and Olofsson, 2018), поэтому мы считаем, что распределение пылинок по размерам в их пылевых оболочках близко к межзвездному: $n(a) \sim a^{-3.5}$, где n — относительное число частиц, a — размер частицы; минимальный размер пылинок равен 0.005 мкм (Mathis et al., 1977). Это также позволяет сократить число свободных параметров.

Поиск оптимальной модели проводился по следующим параметрам: максимальный радиус пыли-

нок a_{\max} , оптическая толща оболочки τ_λ на длине волны $\lambda = 0.55$ мкм, внутренний радиус оболочки r_{in} , внешний радиус оболочки r_{out} , отношение содержания C/SiC (по массе).

Обычно при моделировании распределения энергии в спектрах звезд с пылевыми оболочками на стадиях AGB и post-AGB центральная звезда представляется в виде абсолютно черного тела (см., например, Schöier et al., 2002; Bogdanov and Taranova, 2005). Однако в случае углеродных звезд такое представление не является удачным из-за большого количества молекулярных полос поглощения в их спектрах. В нашей работе для центрального источника использовались синтетические модели спектров углеродных звезд из работы Aringer et al. (2009). Светимость была зафиксирована на уровне $L_{\max} = 8560 L_\odot$.

Для моделирования переноса излучения и результирующего спектра пылевой оболочки использовался программный пакет RADMC-3D (Dullemond et al., 2012). Он позволяет детально воспроизводить взаимодействие излучения с частицами пыли, учитывая их пространственное распределение, размеры, состав и оптические свойства. Работа включала два этапа: ручной поиск локального минимума невязки и исследование параметров модели в окрестности этого минимума.

При ручном поиске примерного положения локального минимума невязки для формирования распределения пыли вокруг звезды использовалась трехмерная пространственная сетка, состоящая из 500 ячеек по радиусу (распределенных логарифмически), 500 ячеек по широте и 60 по долготе. Для представления спектра использовалась сетка длин волн, состоящая из 150 ячеек, неравномерно распределенных в диапазоне от 0.5 до 130 мкм. Значение радиуса внутренней границы пылевой оболочки r_{in} искалось в диапазоне от 7.5 до 20 а.е., при этом нижняя граница выбиралась из ограничения на температуру сублимации пылинок (около 1500 К). Оптическая толща оболочки τ_V оценивалась внутри диапазона 1–15, и, поскольку ожидалось, что она будет больше единицы, использовался полный учет рассеяния, реализованный в RADMC-3D.

Далее для нахождения оптимальных параметров модели и их апостериорной вероятности использовался метод МСМС. Функция правдоподобия была задана следующим образом:

$$p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}_A; \boldsymbol{\theta}_N) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m \det(C(\boldsymbol{\theta}_N))}} \times \exp\left(-\frac{1}{2}[\mathbf{D} - \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}_A)]^T C(\boldsymbol{\theta}_N)^{-1} [\mathbf{D} - \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}_A)]\right), \quad (1)$$

где \mathbf{D} — вектор наблюдений (в нашем случае измерения SED), $\boldsymbol{\theta}_A$ — вектор астрофизических параметров, \mathbf{M} — вектор ожидаемых из модели значений SED, m — число наблюдений (точек SED). Поскольку внутренние ошибки измерений SED сильно недооценены, мы моделировали матрицу ковариации ошибок SED, следуя методологии из работы Safonov et al. (2025):

$$C_{ij} = \sigma_0^2 \mathbf{I} + \sigma_c^2 \mathcal{K}_{ij}, \quad (2)$$

где i, j — индексы измерения в векторе \mathbf{D} , \mathbf{I} — единичная матрица. Элементы матрицы \mathcal{K} вычисляются по следующему правилу:

$$\mathcal{K}_{ij} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}r_{ij}}{l}\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{3}r_{ij}}{l}\right). \quad (3)$$

Здесь r_{ij} — расстояние между точками, определяемое как десятичный логарифм отношения длин волн. Параметры σ_0^2 , σ_c^2 определяют амплитуды коррелированного и некоррелированного шума соответственно, l — длина корреляции. Параметры σ_0^2 , σ_c^2 , l составляют вектор параметров шума $\boldsymbol{\theta}_N$, входящий в уравнение (1). В ходе максимизации функции правдоподобия подбирались как вектор астрофизических параметров $\boldsymbol{\theta}_A$, так и вектор параметров шума $\boldsymbol{\theta}_N$.

Расчеты проводились с помощью онлайн-сервиса³⁾. Для набора статистики необходимо большое количество моделей (около 50 000), поэтому для ускорения вычислений они рассчитывались с учетом только изотропного рассеяния, а затем корректировались. Функция для коррекции SED была получена с помощью двух сеток моделей, различающихся лишь способом учета рассеяния. Полученные для моделей из этих сеток SED сравнивались между собой для каждой длины волны. Таким образом, для каждого набора параметров определялась разница между полным и изотропным учетом рассеяния, которую можно интерполировать на любой другой набор параметров (подробнее см. Safonov et al., 2025). Апостериорная плотность вероятности (уравнение (1)) представлена на рис. 4. По форме распределений можно сделать вывод об отсутствии значимых корреляций между параметрами модели.

На рис. 5 приведено сравнение модельного и наблюдаемого SED, а также показан вклад излучения звезды, прошедшего сквозь оболочку. Видно, что из-за большого поглощения в оболочке ее излучение практически не дает вклад в SED. Параметры полученной модели для максимума блеска представлены в таблице 2.

³⁾<https://circum.sai.msu.ru/webMCRT/>

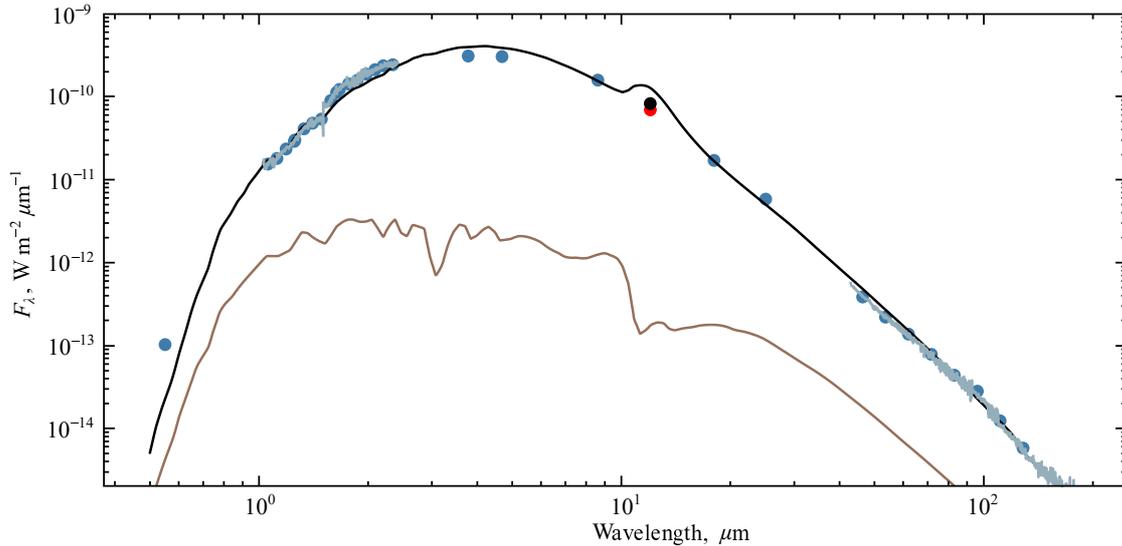


Рис. 5. Распределение энергии в спектре RWLMi. Синие точки и голубые линии представляют наблюдаемый SED и ИК-спектры, полученные на КГО и спутнике ISO. Черная линия — модельный SED, коричневая — вклад излучения звезды, ослабленного поглощением в оболочке. Красная точка — фотометрия IRAS, не использовавшаяся для вычисления невязки; черная точка — свертка модельного SED с кривой реакции полосы 12 мкм IRAS.

Таблица 2. Результаты численного моделирования. В таблице приведены следующие параметры: T_{eff} — эффективная температура звезды; a_{max} — максимальный радиус пылинок; C-fraction — доля углеродной пыли в смеси; r_{in} , r_{out} — внутренний и внешний радиусы оболочки; $\tau_{0.5}$ — оптическая толщина на длине волны 0.5 мкм; \dot{M}_{dust} — темп потери массы звезды (только пыль); M_{env} — масса пыли в оболочке

Параметр	Значение	σ_-	σ_+
(1)	(2)	(3)	(4)
T_{eff} , К	2400	—	—
a_{max} , мкм	2.59	−0.65	+0.54
C-fraction	0.51	−0.11	+0.14
$\tau_{0.5}$	12.66	−0.39	+0.40
r_{in} , а.е.	7.93	−0.28	+0.59
r_{out} , а.е.	17 100	−5100	+4400
\dot{M}_{dust} , M_{\odot} год $^{-1}$	2.8×10^{-8}	—	—
M_{dust} , M_{\odot}	1.3×10^{-4}	—	—

6. ОБСУЖДЕНИЕ

На наличие у RWLMi изменений среднего уровня ИК-блеска указывали еще Shenavrin et al. (2011), которые обнаружили «долговременные, возможно периодические, изменения ИК-блеска и цвета; период этих колебаний может составлять около 5200 суток». Однако малый период регуляр-

ных наблюдений (около 7 лет) не позволил сделать более обоснованные выводы в той работе.

В наших почти 30-летних однородных рядах ИК-наблюдений мы уверенно видим колебания среднего уровня блеска (см. рис. 1). Они хорошо описываются простой синусоидой, период которой, возможно, уменьшается с 7300–7600 суток в полосах *JHK* до около 6500 суток в полосе *M*. Значительно уменьшается и амплитуда — с 1^m2 в полосах *JH* и 0^m9 в полосе *K* до 0^m4 в полосе *L* и 0^m2 в полосе *M*. Похожие изменения среднего уровня блеска наблюдаются и у некоторых других звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. Например, в оптическом и ближнем ИК-диапазонах они были обнаружены у углеродной мириды V CgB (период около 8300 дней, Fedoteva et al., 2020), у post-AGB-звезды IRAS 07253-2001 (период около 1800 суток, Ikonnikova et al., 2023), у протопланетарной туманности IRAS 08005-2356 (период равен примерно 2650 суткам, Manick et al., 2021), у углеродной мириды T Dra (период около 8700 дней, Percy and Bagby, 1999) и др. Подобные изменения среднего уровня блеска могут быть связаны с орбитальным движением компонентов двойной системы (см., например, Ikonnikova et al., 2023).

Если найденный нами период считать орбитальным для двойной системы с суммарной массой компонентов около $2 M_{\odot}$, то расстояние между ними составит около 9 а.е., что близко к внутренней границе пылевой оболочки (см. таблицу 2). При соотношении $P_{\text{orb}}/P_{\text{puls}} > 10$, вероятно, можно пренебречь влиянием второго компонента на общий закон распределения плотности в оболочке $\rho \sim r^{-2}$,

принятый нами при моделировании, и предположить, что второй компонент ответственен за наблюдаемые (Monnier et al., 2000, и Kim et al., 2015) возмущения в структуре оболочки. Однако для подтверждения или опровержения этого требуется проведение динамического моделирования. Косвенным подтверждением двойственности RWLMi можно считать большое значение $RUWE = 4.732$ в каталоге Gaia EDR3, значительно превышающее предел в 1.4 для точечных источников. Стоит отметить, что такая величина возможно связана со сложной и переменной формой внутренней части оболочки, видимой на субсекундных масштабах (Monnier et al., 2000). Вследствие высокой плотности оболочки в видимом диапазоне может возникнуть эффект псевдотосферы, которую мы и наблюдаем до глубины с $\tau_V \sim 1$.

Средние амплитуды изменений блеска после учета вклада долговременной переменности составили $\Delta J \approx 1^m6$, $\Delta H \approx 1^m4$, $\Delta K \approx 1^m3$, $\Delta L \approx 1^m1$, $\Delta M \approx 1^m0$. Эти значения близки к соответствующим амплитудам углеродной мириды V CrB (Fedoteva et al., 2020), имеющей значительно менее плотную околозвездную оболочку ($\tau_V \approx 1$). Отметим отсутствие ступеньки на восходящей ветви фазовой кривой блеска (см. рис. 2), наблюдаемой у различных мирид в ИК-диапазоне, таких как V CrB (Fedoteva et al., 2020), T Dra (Tatarnikov et al., 2024b), V Cyg (Safonov et al., 2025), V407 Cyg (Esipov et al., 2012), R Cas (Nadzhip et al., 2001) и др.

Несмотря на большую полную оптическую толщину оболочки при наблюдении диска звезды «на просвет» ($\tau_V = 12.7$), потери излучения на истинное поглощение в оболочке в полосе V составляют $\tau_V^{\text{abs}} \sim 2$. Остальная часть рассеивается и возвращается в полный поток излучения, регистрируемый от объекта как от точечного источника. Это позволяет даже в видимом диапазоне спектра наблюдать изменения, происходящие со звездой внутри оболочки. Так, на сайте AAVSO⁴) представлена кривая блеска RWLMi в полосе V , на которой заметны колебания с амплитудой около 2^m ; при этом моделирование показывает, что внутри оболочки колебания блеска звезды не превышают 3^m .

Светимость RWLMi в максимуме блеска ($L_{\text{max}} \approx 8500 L_{\odot}$), определенная нами выше, и использованная при моделировании температура звезды $T_{\text{eff}} = 2400 \text{ K}$ позволяют оценить радиус звезды: $R_* \approx 500 R_{\odot}$, или 2.3 а.е. Следовательно, внутренняя граница оболочки находится на расстоянии всего $3.4 R_*$. Такие небольшие значения типичны для углеродных мирид с пылевыми оболочками. Например, у V CrB $R_{\text{in}} = 4.4 R_*$ (Fedoteva

et al., 2020), у V Cyg $R_{\text{in}} = 2.7 R_*$ (Safonov et al., 2025), у T Dra $R_{\text{in}} = 1.9 R_*$ (Tatarnikov et al., 2024b).

Для сферически симметричной оболочки, образованной при постоянном темпе потери вещества, масса зависит от размеров и оптической толщи следующим образом: $M_{\text{dust}} \sim \tau r_{\text{in}} r_{\text{out}}$. Внешний размер пылевой оболочки при моделировании определяется с большой неопределенностью (примерно 30%, см. таблицу 2), что приводит к значительной ошибке в оценке массы оболочки. Возраст оболочки, расширяющейся с постоянной скоростью V_{exp} , определяется простой зависимостью: $\Delta t = R_{\text{out}}/V_{\text{exp}}$. В этом случае темп потери вещества $\dot{M}_{\text{dust}} \sim \tau r_{\text{in}} V_{\text{exp}}$ не зависит от величины R_{out} . Соответственно, точность его определения по результатам моделирования будет выше, чем точность оценки массы оболочки.

На полную массу оболочки и полный темп потери массы сильно влияет принятое отношение $M_{\text{gas}}/M_{\text{dust}}$. Считается (см., например, Knapp, 1985 или Groenewegen et al., 1998), что в пылевых оболочках большинства углеродных звезд это отношение в 2–3 раза превышает среднее по межзвездной среде и может достигать 400. Однако Groenewegen et al. (1998) нашли, что для долгопериодических переменных указанное отношение будет меньше, и привели соответствующую эмпирическую зависимость. Мы использовали величину $M_{\text{gas}}/M_{\text{dust}} = 200$ для $P_{\text{puls}} = 610^d$, оцененную из этой зависимости.

Для вычисления полного темпа потери массы мы взяли из работы Schöier and Olofsson (2000) скорость истечения $v_e = 17 \text{ km s}^{-1}$, при которой $\dot{M} \approx 6 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Для указанной скорости возраст оболочки, а точнее ее части, формирующей наблюдаемый SED, составляет около 5000 лет. Эпизоды с таким (и даже более высоким) темпом потери вещества, связанные с формированием мощных пылевых оболочек и превращением звезды в так называемую экстремальную углеродную звезду (Volk et al., 2000), могут длиться до нескольких десятков тысяч лет.

Наша оценка темпа потери массы близка к оценкам, полученным из радионаблюдений излучения молекулы CO ($3.5\text{--}5 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, Schöier et al., 2002), и к оценке, найденной в рамках аксиально симметричной модели пылевой оболочки (около $5 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, Bogdanov and Taranova, 2005), если использовать такое же отношение $M_{\text{gas}}/M_{\text{dust}} = 200$, как в нашей работе.

⁴<https://www.aavso.org>

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних фотометрических ИК-наблюдений позволил уточнить эфемериды моментов максимума блеска RWLMi: $JD_{\max} = 2459677.^m0 + 610.^m9 E$. Средний за весь период наших наблюдений блеск RWLMi составил: $\langle J \rangle = 5.^m71$, $\langle H \rangle = 3.^m49$, $\langle K \rangle = 1.^m39$, $\langle L \rangle = -1.^m29$, $\langle M \rangle = -2.^m17$.

Обнаружен многолетний тренд среднего уровня блеска с периодом около 7300^d.

Получена оценка болометрического потока в максимуме блеска: $F_{\text{bol}} = 2.6 \times 10^{-6}$ эрг с⁻¹ см⁻². В предположении сферической симметрии оболочки такой поток соответствует светимости $L_{\max} \approx 8500 L_{\odot}$. Для центральной звезды с температурой $T_{\text{eff}} = 2400$ К это соответствует радиусу $R_{*} \approx 500 R_{\odot}$.

Модель сферически симметричной оболочки RWLMi при условии постоянного темпа потери вещества согласуется с наблюдаемым распределением энергии в диапазоне 0.5–100 мкм при большой оптической толщине оболочки $\tau_V \approx 12.7$, внутреннем радиусе $R_{\text{in}} \approx 8$ а.е. и внешнем радиусе $R_{\text{out}} \approx 17000$ а.е. Методом МСМС получены оценки ошибок всех найденных при моделировании параметров. При отношении $M_{\text{gas}}/M_{\text{dust}} = 200$ скорость потери массы составляет $\dot{M} = 6 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Эта оценка не зависит от величины R_{out} , определяемой при моделировании с низкой точностью.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (научно-образовательная школа «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»). Авторы благодарят рецензента за ценные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Alksnis, *Baltic Astronomy* **4**, 79 (1995). DOI:10.1515/astro-1995-0107
2. A. K. Alksnis and G. V. Khozov, *Sov. Astron. Letters* **1**, 144 (1975).
3. B. Aringer, L. Girardi, W. Nowotny, et al., *Astron. and Astrophys.* **503** (3), 913 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200911703
4. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
5. M. Bogdanov and O. Taranova, *Astronomy Reports* **49**, 226 (2005). DOI:10.1134/1.1882780
6. C. P. Dullemond, A. Juhasz, A. Pohl, et al., *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1202.015 (2012).
7. V. F. Esipov, E. A. Kolotilov, G. V. Komissarova, et al., *Baltic Astronomy* **21**, 47 (2012). DOI:10.1515/astro-2017-0357
8. A. A. Fedoteva, A. M. Tatarnikov, B. S. Safonov, et al., *Astronomy Letters* **46** (1), 38 (2020). DOI:10.1134/S1063773720010016
9. D. Y. Gezari, M. Schmitz, P. S. Pitts, and J. M. Mead, *VizieR On-line Data Catalog: II/184* (1994).
10. G. M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, et al., *Astrophys. J.* **887** (1), article id. 93 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab5362
11. M. A. T. Groenewegen, P. A. Whitelock, C. H. Smith, and F. Kerschbaum, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **293** (1), 18 (1998). DOI:10.1046/j.1365-8711.1998.01113.x
12. S. Höfner and H. Olofsson, *Astron. and Astrophys.* **26** (1), article id. 1 (2018). DOI:10.1007/s00159-017-0106-5
13. N. P. Ikonnikova, M. A. Burlak, A. V. Dodin, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 348 (2023). DOI:10.1134/S1990341323700098
14. H. Kim, S.-Y. Liu, N. Hirano, et al., *Astrophys. J.* **814** (1), article id. 61 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/814/1/61
15. G. R. Knapp, *Astrophys. J.* **293**, 273 (1985). DOI:10.1086/163234
16. C. Loup, T. Forveille, A. Omont, and J. F. Paul, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **99**, 291 (1993).
17. R. Manick, B. Miszalski, D. Kamath, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (2), 2226 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2428
18. J. S. Mathis, W. Rumpl, and K. H. Nordsieck, *Astrophys. J.* **217**, 425 (1977). DOI:10.1086/155591
19. J. D. Monnier, P. G. Tuthill, and W. C. Danchi, *Astrophys. J.* **545** (2), 957 (2000). DOI:10.1086/317857
20. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017). DOI:10.1134/S1990341317030245
21. A. E. Nadzhip, A. M. Tatarnikov, V. I. Shenavrin, et al., *Astronomy Letters* **27**, 324 (2001). DOI:10.1134/1.1368702

22. G. Neugebauer, H. J. Habing, R. van Duinen, et al., *Astrophys. J.* **278**, L1 (1984). DOI:10.1086/184209
23. B. Pegourie, *Astron. and Astrophys.* **194**, 335 (1988).
24. J. R. Percy and D. H. Bagby, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (756), 203 (1999). DOI:10.1086/316314
25. B. S. Safonov, S. G. Zheltoukhov, A. M. Tatarnikov, et al., *Astron. J.* **169** (3), id. 140 (2025). DOI:10.3847/1538-3881/adaaf3
26. R. Sahai and G. P. Mack-Crane, *Astron. J.* **148** (4), article id. 74 (2014). DOI:10.1088/0004-6256/148/4/74
27. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, et al., *Astronomy Reports* **61** (1), 80 (2017a). DOI:10.1134/S1063772917010085
28. F. L. Schöier and H. Olofsson, *Astron. and Astrophys.* **359**, 586 (2000). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0005360
29. F. L. Schöier, N. Ryde, and H. Olofsson, *Astron. and Astrophys.* **391**, 577 (2002). DOI:10.1051/0004-6361/20020833
30. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev (Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2020), pp. 127–132. DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_127
31. V. I. Shenavrin, O. G. Taranova, and A. E. Nadzhip, *Astronomy Reports* **55** (1), 31 (2011). DOI:10.1134/S1063772911010070
32. G. C. Sloan, K. E. Kraemer, S. D. Price, and R. F. Shipman, *Astrophys. J. Suppl.* **147** (2), 379 (2003). DOI:10.1086/375443
33. K.-W. Suh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315** (4), 740 (2000). DOI:10.1046/j.1365-8711.2000.03482.x
34. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, and E. D. Malik, *Moscow University Physics Bulletin* **79** (3), 385 (2024a). DOI:10.3103/S0027134924700425
35. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, N. I. Shatsky, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 384 (2023). DOI:10.1134/S1990341323600163
36. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, V. I. Shenavrin, et al., *Astronomy Letters* **50** (1), 53 (2024b). DOI:10.1134/S1063773724600176
37. B. T. Ulrich, G. Neugebauer, D. McCammon, et al., *Astrophys. J.* **146**, 288 (1966). DOI:10.1086/148881
38. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
39. K. Volk, G.-Z. Xiong, and S. Kwok, *Astrophys. J.* **530** (1), 408 (2000). DOI:10.1086/308355
40. S. G. Zheltoukhov, A. M. Tatarnikov, and N. I. Shatsky, *Astronomy Letters* **46** (3), 193 (2020). DOI:10.1134/S106377372002005X

Dust Envelope around the Carbon Star RWLMi

A. A. Vakhonin^{1,2}, B. S. Safonov¹, I. A. Strakhov¹, A. M. Tatarnikov^{1,2}, and V. I. Shenavrin¹

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

Results of infrared photometric observations of RWLMi in the *JHKLM* bands are presented. The observations were carried out from 1994 to 2024. Based on observations of 17 pulsation cycles of the star, new brightness ephemerides were established: $JD_{\max} = 2459677^{\text{d}0} + 610^{\text{d}9E}$. A sinusoidal trend of the average brightness level was found. Its period is about 7300 days and its amplitude is approximately 1^{m} in the *JHK* bands. From the energy distribution in the spectrum in the wavelength range of 0.5–100 μm , an estimate of the bolometric flux at the maximum brightness was obtained: $F_{\text{bol}} = 2.6 \times 10^{-6} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. This corresponds to the luminosity $L_{\max} \approx 8500 L_{\odot}$. Modeling of the RWLMi circumstellar envelope radiation was performed with the RAMDC-3D program. The simulation was carried out in the approximation of a spherically symmetric envelope shape with a constant mass-loss rate. The main envelope parameters are: the optical depth $\tau_V \approx 12.7$, the inner radius $R_{\text{in}} \approx 8 \text{ AU}$, the outer radius $R_{\text{out}} \approx 17000 \text{ AU}$, and the mass-loss rate $\dot{M} = 6 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

Keywords: stars: AGB and post-AGB; stars: individual: RWLMi; circumstellar matter; methods: observational; techniques: photometric; methods: numerical