

УДК 524.336-76

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИК-ФОТОМЕТРИИ И МОДЕЛЬ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ КАНДИДАТА В СИМБИОТИЧЕСКИЕ МИРИДЫ V 335 VUL

© 2017 М. Б. Богданов<sup>1\*</sup>, О. Г. Таранова<sup>2</sup>, В. И. Шенаврин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, 410012 Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 25 мая 2017 года; принята в печать 27 сентября 2017 года

Приведены результаты *JHKLM*-фотометрии кандидата в симбиотические мириды V 335 Vul. По данным о средних потоках, дополненным наблюдениями спутников IRAS, MSX, AKARI и WISE в среднем ИК-диапазоне, рассчитана модель сферически-симметричной пылевой оболочки звезды, состоящей из частиц аморфного углерода и карбида кремния. Оптическая толщина оболочки в видимом диапазоне с температурой пыли на внутренней границе  $T_1 = 1300$  К составляет  $\tau_V = 0.58$ . При скорости расширения оболочки  $26.5$  км с<sup>-1</sup> оцененный темп потери массы равен  $5.7 \times 10^{-7} M_\odot$  год<sup>-1</sup>.

Ключевые слова: *двойные: симбиотические* — *звезды: углеродные* — *межзвездное вещество* — *звезды: индивидуальные: V 335 Vul*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наличие яркой эмиссионной линии  $H\alpha$  в спектре углеродной звезды V 335 Vul (AS 356  $\equiv$  IRAS 19211+2421) было обнаружено в работе [1]. Позднее присутствие бальмеровских эмиссионных линий в спектрах этой звезды получило подтверждение [2], и она была включена в каталог [3] как возможная симбиотическая звезда. В Общем каталоге переменных звезд [4] V 335 Vul классифицируется как медленная неправильная переменная типа SR. Более детальное изучение изменений блеска в полосе *V* по данным автоматического обзора неба ASAS показало, что звезда является миридой с периодом  $334 \pm 14$  суток [5]. В этой же работе звезда была отнесена к D-типу симбиотических систем, характеризующихся наличием пылевых оболочек, были получены оценки расстояния  $d = 3.7$  кпк и темпа потери массы  $\lg \dot{M} = -6.4 [M_\odot \text{ год}^{-1}]$  [5] (с использованием эмпирической формулы Джуры [6]).

Фотометрия V 335 Vul в ближнем ИК-диапазоне ранее практически не проводилась. Имеется единственная оценка блеска в фильтрах *JHK<sub>s</sub>*, полученная в сентябре 1998 г. [7]. Также до настоящего времени не предпринимались попытки расчета моделей пылевой оболочки для этой звезды.

Целью данной работы является исследование переменности V 335 Vul по результатам нашей

*JHKLM*-фотометрии, построение модели ее околозвездной пылевой оболочки и определение характеристик звездного ветра. Это исследование продолжает цикл наших работ по изучению симбиотических звезд на основе данных фотометрии в ИК-диапазоне [8–10].

### 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Инфракрасная фотометрия V 335 Vul проводилась в стандартной системе *JHKLM* при помощи фотометра с приемником из антимонида индия (InSb), охлаждаемого жидким азотом. Фотометр установлен в кассегреновском фокусе 1.25-м телескопа Крымской станции МГУ, входная диафрагма — примерно  $12''$ . Пространственное разделение пучков при модуляции составляло около  $30''$  в направлении восток-запад. В качестве фотометрического стандарта использовалась звезда BS 7417, звездные величины которой были взяты из каталога Джонсона и др. [11].

В таблице 1 представлены результаты нашей пятилетней (2012–2016 гг.) ИК-фотометрии V 335 Vul. В последнем столбце таблицы даны среднеквадратичные отклонения оценок звездных величин  $\sigma_M$  в фильтре *M*. Для других фильтров эти отклонения не превышают 0.02.

Средние значения потоков  $F(\lambda)$  для V 335 Vul по наблюдениям в разных фильтрах и их среднеквадратичные отклонения  $\sigma_F$ , рассчитанные с уче-

\*E-mail: BogdanovMB@info.sgu.ru

том межзвездного поглощения, приведены в таблице 2. При расчетах использовалась оценка избытка цвета  $E(B - V) = 0.50$ , полученная в работе [5].

### 3. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ БЛЕСКА И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦВЕТА

На рис. 1 показаны изменения блеска в фильтрах  $J$ ,  $K$ ,  $L$  и показателей цвета  $J-H$ ,  $K-L$  и  $L-M$ . По оси абсцисс отложены юлианские даты, а по оси ординат — звездные величины. Вертикальными отрезками на рис. 1 для показателя цвета  $L-M$  приведены среднеквадратичные отклонения ( $\pm\sigma$ ), а штриховыми линиями нанесены линейные тренды. Статистическая значимость трендов невысока. Тем не менее интересно отметить, что угловые коэффициенты трендов звездных величин и показателей цвета  $J-H$  и  $L-M$  имеют разные знаки. Возрастание блеска сопровождалось увеличением цветовой температуры звезды (значения показателей цвета уменьшались).

По результатам нашей фотометрии в фильтре  $J$  был проведен поиск возможных периодов в диапазоне от 100 до 3000 суток с использованием компьютерной программы Ленца и Брегера [12], реализующей усовершенствованный вариант алгоритма Сперла [13]. Рассчитанная периодограмма показана сплошной линией на рис. 2. Пунктирная линия на этом рисунке выделяет спектральное окно, связанное с наличием пропусков данных. Числа у вершин пиков дают соответствующие им периоды в сутках. Анализ периодограммы приводит к заключению о наличии наиболее вероятного периода  $333^d.7$ . Это значение практически совпадает с периодом изменения блеска мириды, найденным по наблюдениям в видимом диапазоне спектра [5]. На периодограмме видны еще два пика меньшей высоты, соответствующие периодам  $178^d$  (первая гармоника годового периода) и  $2284^d$ . На рис. 3 представлены сводные кривые блеска и цвета, построенные с элементами

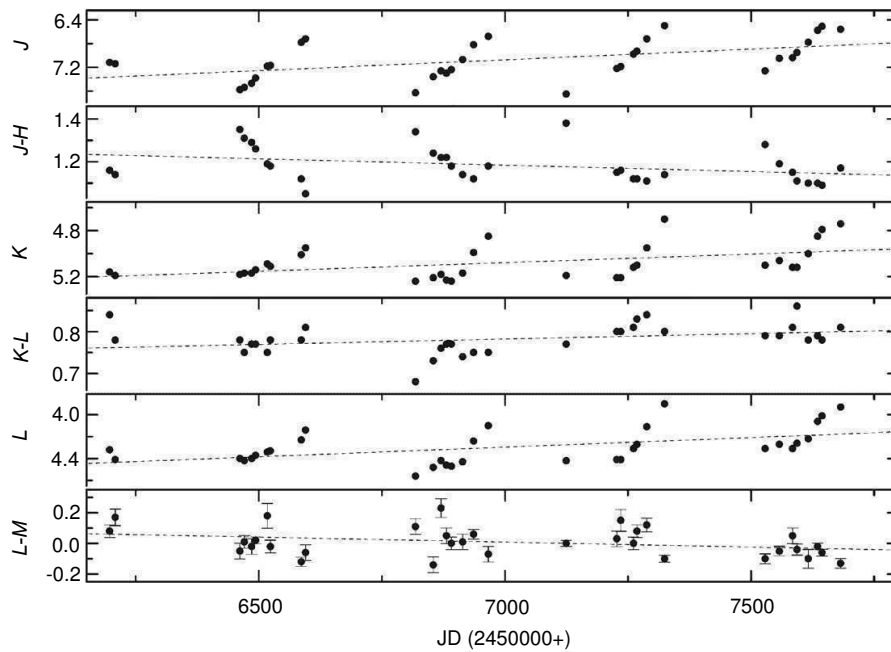
$$JD(\text{Max}) = 2455988.0 + 333.7 E.$$

### 4. РАСЧЕТ МОДЕЛИ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА

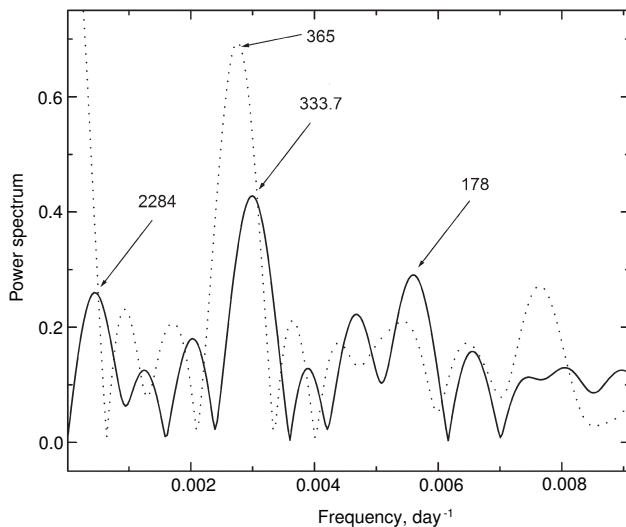
Мы провели расчет модели сферически-симметричной пылевой оболочки V 335 Vul, используя средние значения потоков в фильтрах  $JHKL$  из таблицы 2, дополненные данными со спутников IRAS (потоки на длинах волн 12 и 25 мкм) [14], MSX (потоки на 8.28, 12.13 и 14.65 мкм) [15], AKARI (потоки на 8.61 и 18.4 мкм) [16] и WISE

**Таблица 1.** Результаты  $JHKL$ -фотометрии V 335 Vul

JD (2450000+)	$J$	$H$	$K$	$L$	$M$	$\sigma_M$
6197.2	7.12	5.96	5.16	4.32	4.24	0.04
6208.3	7.14	6	5.19	4.41	4.24	0.05
6461.5	7.58	6.23	5.18	4.4	4.45	0.05
6470.5	7.54	6.23	5.17	4.42	4.41	0.04
6485.4	7.47	6.18	5.17	4.4	4.42	0.05
6493.4	7.38	6.12	5.14	4.37	4.35	0.02
6517.4	7.18	5.99	5.09	4.34	4.16	0.08
6523.4	7.17	5.99	5.11	4.33	4.35	0.04
6586.2	6.78	5.66	5.01	4.23	4.35	0.03
6595.2	6.72	5.67	4.95	4.14	4.2	0.05
6818.5	7.63	6.29	5.24	4.56	4.45	0.05
6854.4	7.36	6.12	5.21	4.48	4.62	0.05
6870.4	7.26	6.04	5.18	4.42	4.19	0.06
6881.3	7.3	6.08	5.23	4.46	4.41	0.05
6891.3	7.24	6.06	5.24	4.47	4.47	0.04
6914.2	7.07	5.93	5.17	4.43	4.42	0.05
6936.2	6.82	5.7	4.99	4.24	4.18	0.03
6966.2	6.68	5.5	4.85	4.1	4.17	0.05
7124.6	7.65	6.27	5.19	4.42	4.42	0.02
7227.4	7.22	6.07	5.21	4.41	4.38	0.05
7235.4	7.19	6.03	5.21	4.41	4.26	0.07
7261.3	6.98	5.86	5.12	4.31	4.31	0.04
7268.3	6.93	5.81	5.1	4.27	4.19	0.04
7288.2	6.72	5.61	4.95	4.11	3.99	0.04
7324.2	6.5	5.36	4.7	3.9	4	0.02
7528.5	7.26	5.98	5.1	4.31	4.41	0.03
7557.5	7.05	5.86	5.06	4.27	4.32	0.03
7584.4	7.04	5.89	5.12	4.31	4.26	0.05
7593.4	6.95	5.84	5.12	4.26	4.3	0.03
7616.3	6.78	5.68	5	4.22	4.32	0.06
7635.3	6.58	5.48	4.85	4.06	4.08	0.02
7644.3	6.51	5.42	4.79	4.01	4.07	0.02
7682.2	6.56	5.39	4.74	3.93	4.06	0.03



**Рис. 1.** Наблюдаемые изменения блеска в фильтрах  $JKL$  и показателей цвета  $V\ 335\ Vul$ . Штриховые линии соответствуют линейным трендам.



**Рис. 2.** Периодограмма изменения блеска  $V\ 335\ Vul$  в фильтре  $J$  (сплошная линия) и спектральное окно, связанное с пропусками данных (пунктир). Числа у вершин пиков дают значения периодов в сутках.

(потоки на 3.35, 4.60, 11.6 и 22.1 мкм) [17], взятыми из базы SIMBAD. Значения десятичных логарифмов наблюдаемых потоков  $F(\lambda)$  (в единицах  $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{см}^{-1}$ ) показаны кружками на рис. 4.

Средняя эпоха наших наблюдений 2014.9 для  $V\ 335\ Vul$  довольно близка к эпохам наблюдений спутника AKARI для коротковолнового диапазона (2009.0) и спутника WISE (2010.5), но заметно

**Таблица 2.** Средние значения потока  $F(\lambda)$  и их среднеквадратичные отклонения  $\sigma_F$  для  $V\ 335\ Vul$  с учетом межзвездного поглощения

Длина волны, мкм	$F(\lambda) \pm \sigma_F$ , $10^{-6} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ см}^{-1}$
1.25	$71.1 \pm 3.8$
1.65	$68.1 \pm 3.1$
2.20	$44.1 \pm 1.1$
3.50	$13.2 \pm 0.36$
5.00	$4.3 \pm 0.10$

отличается от эпохи спутника MSX (1997.0) и тем более спутника IRAS (1983.5). Потоки излучения в среднем ИК-диапазоне, измеренные двумя последними спутниками, формируются главным образом внешними слоями пылевой оболочки, размеры которых составляют сотни астрономических единиц. При скорости движения вещества порядка  $10 \text{ км с}^{-1}$  характерное время изменения структуры этих слоев должно измеряться многими десятилетиями. Как видно на рис. 4, потоки на близких длинах волн, измеренные разными спутниками, имеют достаточно близкие значения, что свидетельствует об отсутствии заметных изменений структуры пылевой оболочки звезды и позволяет использовать все имеющиеся оценки потоков.

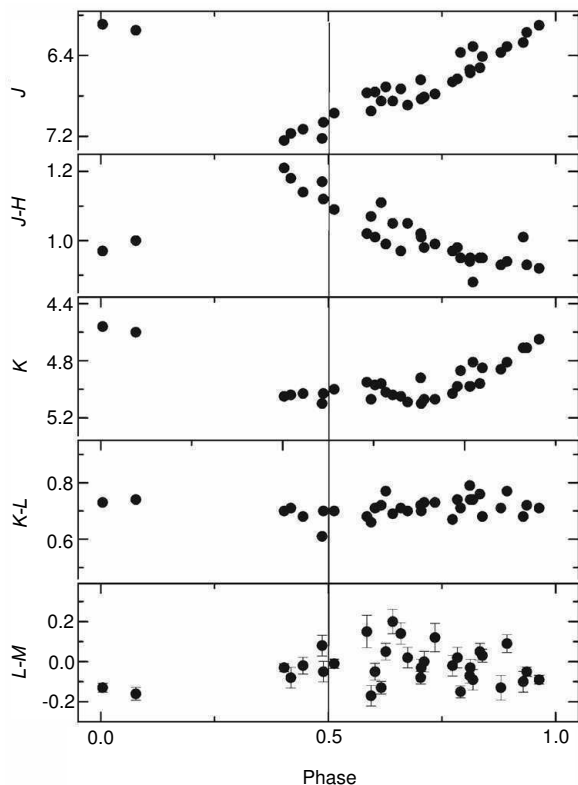


Рис. 3. Сводные кривые изменения блеска в фильтрах  $J$  и  $K$  и показателей цвета  $V 335 Vul$ .

Оценка абсолютной болометрической звездной величины для  $V 335 Vul$   $M_{bol} = -4.54$  получена с использованием зависимости период–светимость углеродных мирид [18]. С учетом абсолютной болометрической звездной величины Солнца  $M_{bol} = 4.74$  светимость звезды оказывается равной  $L = 5200 L_{\odot}$ . Для эффективной температуры  $V 335 Vul$  использовалась оценка  $T_{eff} = 2850 K$ , равная среднему значению температур углеродных переменных звезд типа SR, найденным по измерениям их угловых диаметров [19].

Предполагалось, что в оболочке звезды присутствует смесь пылинок, состоящих из аморфного углерода и карбида кремния. Их относительное содержание было принято равным 0.95 и 0.05 соответственно, что близко к среднему значению для пылевых оболочек углеродных звезд [20]. Данные об оптических характеристиках  $\alpha$ -SiC взяты из работы [21], а аморфного углерода — из работы [22]. Для распределения пылинок по размерам  $n(a)$  была принята модель MRN [23]:  $n(a) \propto a^{-q}$  для радиусов сферических пылинок  $a_{min} \leq a \leq a_{max}$  с параметрами:  $q = 3.5$ ,  $a_{min} = 0.005$  мкм,  $a_{max} = 0.25$  мкм. Как известно, модель MRN описывает распределение по размерам частиц межзвездной пыли. Поскольку AGB-звезды являются основными источниками

межзвездной пыли, эту модель обычно используют и для пылинок в их околозвездных оболочках.

Считалось, что оболочка имеет резкую внутреннюю границу, находящуюся на расстоянии  $r_1$  от центра, и концентрация пылинок уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния вплоть до внешней границы оболочки при  $r_2 = 1000 r_1$ . Распределение энергии в спектре центрального источника было принято планковским с температурой, совпадающей с эффективной температурой звезды.

Решение задачи переноса излучения в пылевой оболочке проводилось с использованием программы DUSTY (версия 2.0) для сеток из 30 точек по радиусу и 99 отсчетов длин волн в интервале от 0.01 мкм до 3.6 см. Описание алгоритма, положенного в основу этой программы, приведено в работах [24, 25]. Входными параметрами модели являются температура пыли на внутренней границе  $T_1$  и оптическая толщина оболочки  $\tau_V$  на длине волны 0.55 мкм. Для заданных значений этих параметров первоначально рассчитывается так называемая форма распределения энергии, зависящая также от принятого значения  $T_{eff}$ . После этого для заданной светимости звезды  $L$  проводится оценка расстояния  $d$ . Таким образом, вычисленное распределение энергии в спектре модели зависит от трех свободных параметров:  $T_1$ ,  $\tau_V$  и  $d$ , значения которых определяются из условия минимума суммы квадратов отклонений наблюдаемых и модельных потоков. Оптимальные значения параметров модели пылевой оболочки оказались равными:  $T_1 = 1300 K$ ,  $\tau_V = 0.58$  и  $d = 3.2$  кпк. При этом радиус внутренней границы оболочки составляет  $r_1 = 9.16 \times 10^{13}$  см.

На рис. 4 сплошной линией представлено распределение энергии в спектре модели как график десятичного логарифма потока  $F(\lambda)$  в единицах  $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{см}^{-1}$  в зависимости от логарифма длины волны в мкм. Как видно на рисунке, рассчитанная модель неплохо описывает результаты наблюдений в широком диапазоне спектра.

Для оценки характеристик звездного ветра  $V 335 Vul$ , возникающего под действием давления излучения на пыль и последующей передачи импульса газовой среде, мы применили газодинамический режим работы программы DUSTY для найденного значения оптической толщины оболочки. В этом случае программа реализует самосогласованную процедуру решения задачи переноса излучения и движения пыли в оболочке звезды [26]. Предполагалось, что плотность пылинок  $\rho_d$  составляет  $3 \text{ г см}^{-3}$ , а отношение массы газа к массе пыли в оболочке  $r_{gd}$  равно 200. По этим данным программа DUSTY рассчитывает полный темп потери массы  $\dot{M}$ , скорость расширения

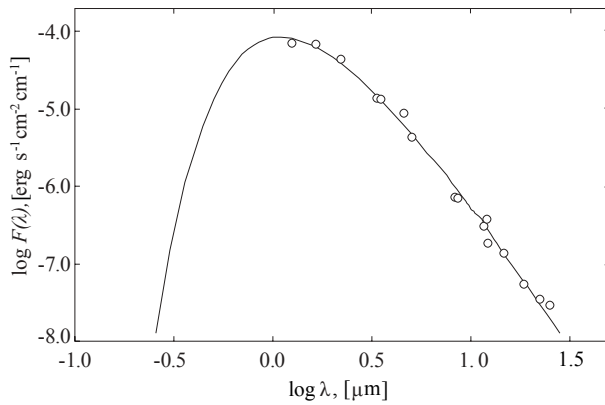


Рис. 4. Наблюдаемые средние значения потока от V 335 Vul (кружки) и распределение энергии в спектре модели пылевой оболочки (сплошная линия).

газа на внешней границе оболочки  $V_e$  и верхний предел массы центрального источника излучения  $M_s$ . Для верхнего предела  $M_s$  было получено значение  $1.7 M_\odot$ , а характеристики звездного ветра оказались равными:  $V_e = 26.5 \text{ км с}^{-1}$  и  $\dot{M} = 5.7 \times 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ .

Указанные выше значения  $\varrho_d$  и  $r_{gd}$  являются параметрами программы DUSTY. Разные авторы часто используют для этих величин другие, хотя и довольно близкие, значения. При необходимости оцененные характеристики звездного ветра легко могут быть пересчитаны для других величин  $L$ ,  $\varrho_d$  и  $r_{gd}$ , учитывая, что  $\dot{M} \propto L^{3/4}(\varrho_d r_{gd})^{1/2}$ ,  $V_e \propto L^{1/4}(\varrho_d r_{gd})^{1/2}$ , а  $M_s \propto L(\varrho_d r_{gd})^{-1}$  [26].

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные по данным нашей фотометрии в ИК-диапазоне кривые изменения блеска и показателей цвета V 335 Vul характерны для углеродных мирид. Найденное значение периода совпадает с периодом, определенным по наблюдениям в видимом диапазоне спектра [5].

Рассчитанная модель сферически-симметричной пылевой оболочки этого кандидата в симбиотические мириды достаточно хорошо описывает наблюдаемые потоки в широком диапазоне спектра и свидетельствует о сравнительно малой концентрации пыли. Полученные значения темпа потери массы  $\dot{M} = 5.7 \times 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$  не противоречит оценке  $\dot{M} = 4.0 \times 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$  [5], найденной ранее с использованием эмпирической формулы [6]. Есть все основания считать наше модельное значение  $\dot{M}$  более точным, хотя погрешность определения этого параметра составляет около 30% [25]. Найденное нами расстояние  $d = 3.2$  кпк также согласуется с оценкой  $d = 3.7$  кпк из работы [5].

## БЛАГОДАРНОСТИ

При проведении исследований были использованы базы данных ADS и SIMBAD. Авторы благодарят разработчиков программы DUSTY за возможность ее применения и Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку настоящей работы (грант 13-02-00136а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. W. Merrill and C. G. Burwell, *Astrophys. J.* **112**, 72 (1950).
2. U. Munari, T. Tomov, and M. Rejkuba, *IBVS*, No. 4668 (1999).
3. K. Belczyński, J. Mikołajewska, U. Munari, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **146**, 407 (2000).
4. N. N. Samus, O. V. Durlevich, and R. V. Kazarovets, *Astronomy Reports* **61**, 80 (2017).
5. M. Gromadzki, J. Mikołajewska, P. Whitelock, and F. Marang, *Acta Astronomica* **59**, 169 (2009).
6. M. Jura, *Astrophys. J.* **313**, 743 (1987).
7. J. P. Phillips, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376**, 1120 (2007).
8. M. B. Bogdanov and O. G. Taranova, *Astronomy Reports* **45**, 44 (2001).
9. M. B. Bogdanov and O. G. Taranova, *Astronomy Reports* **45**, 461 (2001).
10. M. B. Bogdanov and O. G. Taranova, *Astronomy Reports* **45**, 797 (2001).
11. H. L. Johnson, R. I. Mitchell, B. Iriarte, and W. Z. Wisniewski, *Commun. Lunar and Planetary Laboratory* **4**, 99 (1966).
12. P. Lenz and M. Breger, *Commun. Asteroseismology* **146**, 53 (2005).
13. M. Sperl, *Commun. Asteroseismology* **111**, 1 (1998).
14. *IRAS Catalogs and Atlases Explanatory Supplement*, Ed. by C. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., Vol. 1: *Explanatory Supplement* (GPO, Washington DC, 1988).
15. M. P. Egan, S. D. Price, and K. E. Kraemer, *BAAS* **35**, 1301 (2003).
16. D. Ishihara, T. Onaka, H. Kataza, et al., *Astron. and Astrophys.* **514**, A1 (2010).
17. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
18. P. A. Whitelock, M. W. Feast, F. Marang, and M. A. T. Groenewegen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **369**, 751 (2006).
19. G. T. van Belle, C. Paladini, B. Aringer, et al., *Astrophys. J.* **775**, 45 (2013).
20. M. A. T. Groenewegen, P. A. Whitelock, C. H. Smith, and F. Kerschbaum, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **293**, 18 (1998).
21. B. Pegourie, *Astron. and Astrophys.* **194**, 335 (1988).
22. V. G. Zubko, V. Mennella, L. Colangeli, and E. Bussoletti, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **282**, 1321 (1996).
23. J. S. Mathis, W. Rumpl, and K. H. Nordsieck, *Astrophys. J.* **217**, 425 (1977).

24. Z. Ivezić and M. Elitzur, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **287**, 799 (1997).  
25. Z. Ivezić and M. Elitzur, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **303**, 864 (1999).  
26. Z. Ivezić and M. Elitzur, Astrophys. J. **445**, 415 (1995).

## IR Photometry Results and Dust Envelope Model for Symbiotic Mira Star Candidate V 335 Vul

M. B. Bogdanov, **O. G. Taranova**, and V. I. Shenavrin

We present the results of *JHKLM*-photometry for the symbiotic Mira star candidate V 335 Vul. Based on the average flux data, supplemented by IRAS, MSX, AKARI, and WISE mid-IR observations, we simulated a model of a spherically symmetric dust envelope of the star, made up of amorphous carbon and silicon carbide particles. The optical depth of the envelope in the visible range with a dust temperature at the inner boundary of  $T_1 = 1300$  K is  $\tau_V = 0.58$ . For an envelope expansion velocity of  $26.5 \text{ km s}^{-1}$ , the estimated mass loss rate is equal to  $5.7 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ .

Keywords: *binaries: symbiotic—stars: carbon—circumstellar matter—stars: individual: V 335 Vul*