

МНОГОЦВЕТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ И ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА КАНДИДАТА В post-AGB ОБЪЕКТЫ AU ЛИСИЧКИ (IRAS 20160+2734)

© 2021 г. Н. П. Иконникова^{1*}, В. И. Шенаврин¹, Г. В. Комиссарова¹,
М. А. Бурлак¹, И. А. Шапошников^{1,2}, А. А. Белинский¹,
В. Ф. Есипов¹, А. М. Татарников¹, А. В. Додин¹, С. Г. Желтоухов¹

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

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

Поступила в редакцию 09.06.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.; принята к публикации 29.06.2021 г.

Представлены результаты фотометрического мониторинга в $UBVRcIc$ и $JHKLM$ -полосах за 2016–2020 гг., спектроскопия с низким разрешением и анализ данных фотометрических обзоров ASAS-3 и ASAS-SN полуправильной переменной, кандидата в post-AGB объекты AU Vul (IRAS 20160+2734). Показано, что звезда испытывает квазипериодические колебания блеска с переменной амплитудой и периодами 67–75 и 145–150 сут в разные отрезки времени. По спектру в максимуме блеска звезда классифицируется как ранний G-сверхгигант. В этом спектре линии $H\alpha$, $H\beta$ и более высоких членов бальмеровской серии ослаблены, возможно, из-за эмиссионных компонент, а абсорбции элементов s-процесса (BaII, SrII и YII) незначительно усилены. В спектре на восходящей ветви кривой блеска обнаружена эмиссия $H\alpha$. В спектрах на разных уровнях блеска наблюдаются полосы поглощения TiO, интенсивность которых максимальна в минимуме блеска. Распределение энергии в спектре в диапазоне 0.44 (B)–2.2 (K) мкм соответствует спектральным классам от G2I в максимуме до G8I в минимуме блеска. В L и M полосах обнаружен избыток излучения. Распределение энергии в спектре в диапазоне 0.44–90 мкм, построенное по собственным наблюдениям и результатам обзоров WISE, MSX, IRAS и AKARI, удовлетворительно описывается суммой трех составляющих: звезды и пылевых оболочек с $T_{\text{hot}} = 1000$ К и $T_{\text{cold}} = 150$ К. Используя расстояние, основанное на данных о параллаксе из EDR3 Gaia, $D \approx 2300$ пк, мы получили оценки абсолютной величины $M_V \approx -4^m.45$ и светимости $L \approx 5450 L_{\odot}$. Сравнение с эволюционными моделями показало, что AU Vul может находиться в самом начале post-AGB стадии эволюции и иметь массу порядка $0.55 M_{\odot}$. Отмечается, что звезда имеет ряд свойств, отличающих ее от типичных post-AGB объектов и роднящих со звездами типа RV Tau.

Ключевые слова: сверхгиганты на post-AGB стадии, фотометрические и спектральные наблюдения, полуправильные переменные звезды, эволюция, пылевые оболочки, мазеры.

DOI: 10.31857/S0320010821070056

ВВЕДЕНИЕ

AU Vul ($20^{\text{h}}18^{\text{m}}06^{\text{s}}$, $+27^{\circ}44'04''$, 2000) — полуправильная переменная с незначительным избытком излучения в далекой инфракрасной (ИК) области. Переменность блеска звезды в фотографических лучах была открыта почти сто лет назад Россом (1926) при сравнении двух снимков, сделанных в 1907 и 1925 гг. Блеск звезды на этих снимках различался на одну звездную величину (10^m и 11^m

соответственно). Позднее, в 1934–1939 гг., Баер (1951) получил фотографические наблюдения, по которым нашел период изменения блеска 145 сут и определил эфемериду.

В Общем каталоге переменных звезд (ОКПЗ) (Самусь и др., 2017) AU Vul отнесена к типу SRb (гиганты спектральных классов M, S, S с плохо выраженной периодичностью). В ОКПЗ для звезды приведены период 145 сут с ссылкой на работу Баера (1951), фотографические величины $11^m.8$ (в максимуме) и $13^m.5$ (в минимуме) и спектральный класс K-M.

*Электронный адрес: ikonnikova@gmail.com

Таблица 1. *UBV*-фотометрия AU Vul в 2016–2020 гг.

| JD | <i>U</i> | <i>B</i> | <i>V</i> | JD | <i>U</i> | <i>B</i> | <i>V</i> | JD | <i>U</i> | <i>B</i> | <i>V</i> |
|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 2457580 | 14.369 | 12.211 | 10.341 | 2457955 | 14.238 | 12.387 | 10.569 | 2458364 | 14.484 | 12.346 | 10.424 |
| 2457582 | 14.380 | 12.232 | 10.360 | 2457958 | 14.273 | 12.349 | 10.538 | 2458374 | 14.292 | 12.254 | 10.369 |
| 2457583 | 14.461 | 12.257 | 10.365 | 2457961 | 14.021 | 12.297 | 10.503 | 2458380 | 14.114 | 12.184 | 10.337 |
| 2457585 | 14.509 | 12.303 | 10.391 | 2457966 | 13.942 | 12.280 | 10.503 | 2458613 | 14.247 | 12.237 | 10.371 |
| 2457597 | 14.749 | 12.635 | 10.688 | 2457968 | 14.034 | 12.290 | 10.503 | 2458636 | 13.753 | 11.951 | 10.210 |
| 2457598 | 14.746 | 12.665 | 10.695 | 2457978 | 14.353 | 12.466 | 10.618 | 2458647 | 13.874 | 12.049 | 10.270 |
| 2457600 | 14.821 | 12.728 | 10.754 | 2457980 | 14.447 | 12.479 | 10.637 | 2458661 | 13.886 | 12.093 | 10.314 |
| 2457606 | 14.942 | 12.854 | 10.894 | 2457986 | 14.484 | 12.558 | 10.725 | 2458666 | 14.033 | 12.219 | 10.368 |
| 2457608 | 14.802 | 12.798 | 10.880 | 2457990 | 14.715 | 12.633 | 10.804 | 2458691 | 14.676 | 12.501 | 10.629 |
| 2457610 | 14.814 | 12.774 | 10.848 | 2457994 | 14.641 | 12.704 | 10.928 | 2458701 | 14.507 | 12.570 | 10.704 |
| 2457611 | 14.832 | 12.759 | 10.843 | 2458010 | 14.552 | 12.678 | 10.888 | 2458704 | 14.617 | 12.572 | 10.691 |
| 2457612 | 14.613 | 12.726 | 10.842 | 2458011 | 14.663 | 12.684 | 10.905 | 2458719 | 14.510 | 12.600 | 10.735 |
| 2457625 | 13.998 | 12.320 | 10.574 | 2458013 | 14.425 | 12.599 | 10.821 | 2458722 | 14.386 | 12.649 | 10.796 |
| 2457628 | 13.923 | 12.270 | 10.460 | 2458019 | 14.258 | 12.431 | 10.640 | 2458724 | 14.483 | 12.661 | 10.822 |
| 2457632 | 13.968 | 12.153 | 10.358 | 2458025 | 14.033 | 12.291 | 10.510 | 2458729 | 14.288 | 12.690 | 10.861 |
| 2457638 | 14.010 | 12.104 | 10.245 | 2458031 | 13.959 | 12.162 | 10.392 | 2458752 | 14.632 | 12.632 | 10.814 |
| 2457662 | 14.840 | 12.510 | 10.536 | 2458044 | 14.088 | 12.125 | 10.300 | 2458759 | 14.491 | 12.567 | 10.777 |
| 2457663 | 14.692 | 12.522 | 10.542 | 2458046 | 14.080 | 12.169 | 10.322 | 2459048 | 14.127 | 12.235 | 10.484 |
| 2457665 | 14.867 | 12.516 | 10.570 | 2458075 | 15.108 | 12.878 | 10.982 | 2459053 | 13.963 | 12.188 | 10.436 |
| 2457669 | 14.799 | 12.594 | 10.643 | 2458254 | 14.124 | 12.233 | 10.372 | 2459061 | 13.885 | 12.104 | 10.371 |
| 2457705 | 13.633 | 12.052 | 10.313 | 2458262 | 14.242 | 12.245 | 10.357 | 2459071 | 13.920 | 12.083 | 10.290 |
| 2457711 | 13.760 | 12.096 | 10.320 | 2458276 | 14.534 | 12.501 | 10.591 | 2459073 | 14.059 | 12.067 | 10.282 |
| 2457714 | 13.865 | 12.110 | 10.310 | 2458280 | 14.603 | 12.625 | 10.719 | 2459079 | 13.755 | 11.999 | 10.241 |
| 2457745 | 15.380 | 13.016 | 11.027 | 2458289 | 14.856 | 12.840 | 10.944 | 2459085 | 13.651 | 11.893 | 10.190 |
| 2457873 | 14.167 | 12.405 | 10.615 | 2458304 | 14.582 | 12.627 | 10.873 | 2459089 | 13.675 | 11.844 | 10.146 |
| 2457878 | 14.218 | 12.321 | 10.568 | 2458307 | 14.374 | 12.659 | 10.845 | 2459108 | 13.598 | 11.860 | 10.153 |
| 2457905 | 13.896 | 11.968 | 10.115 | 2458333 | 14.297 | 12.373 | 10.486 | 2459110 | 13.702 | 11.860 | 10.151 |
| 2457921 | 14.634 | 12.230 | 10.276 | 2458338 | 14.662 | 12.348 | 10.482 | 2459116 | 13.665 | 11.873 | 10.169 |
| 2457930 | 14.744 | 12.390 | 10.433 | 2458342 | 14.457 | 12.346 | 10.460 | 2459136 | 14.252 | 12.402 | 10.483 |
| 2457930 | 14.744 | 12.390 | 10.433 | 2458345 | 14.449 | 12.362 | 10.471 | 2459138 | 14.367 | 12.431 | 10.582 |
| 2457932 | 14.720 | 12.420 | 10.469 | 2458347 | 14.562 | 12.372 | 10.472 | 2459143 | 14.279 | 12.453 | 10.615 |
| 2457935 | 14.665 | 12.395 | 10.454 | 2458351 | 14.524 | 12.397 | 10.473 | 2459166 | 14.227 | 12.345 | 10.510 |
| 2457935 | 14.665 | 12.395 | 10.454 | 2458361 | 14.534 | 12.386 | 10.444 | 2459173 | 14.275 | 12.414 | 10.576 |
| 2457950 | 14.427 | 12.412 | 10.538 | 2458363 | 14.390 | 12.363 | 10.416 | | | | |

В современную эпоху большой массив фотометрических данных был получен в обзорах All Sky Automatic Survey (ASAS) (Пойманский, 2002) и All-Sky Automated Survey for SuperNovae (ASASSN) (Шаппи и др., 2014; Кочанек и др., 2017). В каталоге переменных звезд ASAS-SN AU Vul имеет обозначение ASASSN-V J201806.04+274403.6 и тип переменности L (долгопериодическая) без указания периода.

Звезда известна не только благодаря своей фотометрической переменности. Она отождествлена с ИК-источником IRAS 20160+2734, и у нее обнаружено излучение мазера OH на частоте 1612 МГц на пределе чувствительности радиотелескопа Арецибо (Эдер и др., 1988). Позднее этот результат потребовал проверки, поскольку, при наблюдениях на частотах 1665 и 1667 МГц, соответствующих двум наиболее сильным мазерным линиям OH, излучение не было зарегистрировано (Льюис, 1997). Новые наблюдения были проведены в марте 2002 г., они подтвердили наличие OH-мазера у IRAS 20160+2734 на частоте 1612 МГц и обнаружили излучение на 1667 МГц (Льюис и др., 2004). Радиоизлучения на частотах, соответствующих мазерам молекул H₂O (Гомес и др., 1990; Энгельс, Льюис, 1996; Суарес и др., 2007; Юн и др., 2014) и SiO (Гомес и др., 1990; Юн и др., 2014), у звезды не зафиксировано.

При исследовании большой выборки OH/IR источников Хименес-Эстебан и др. (2001) выделили IRAS 20160+2734 как объект с характерными для post-AGB сверхгигантов ИК-характеристиками. На основании этого Щерба и др. (2007) включили звезду в Торунский каталог галактических post-AGB и родственных им объектов. AU Vul рассматривалась вместе с другими звездами из этого каталога для оценки расстояния методом моделирования распределения энергии (Викерс и др., 2015).

Суарес и др. (2006) провели классификацию по спектру низкого разрешения и приписали звезде спектральный класс F3Ie. Ранее Грегорио-Хетем и др. (1992) обнаружили в спектре звезды молекулярные полосы и классифицировали ее как Me.

Из более поздних можно отметить работу Акраса и др. (2017), в которой были выполнены поляриметрические наблюдения в *UBVRI*-фильтрах 53 post-AGB и RV Tau звезд. AU Vul показывает некоторую степень поляризации излучения, составляющую чуть более 2% в фильтре *B* и уменьшающуюся с длиной волны. Авторы полагают, что это может быть вызвано наличием у звезды пылевого диска, видимого с ребра.

В 2016 г. мы включили AU Vul в нашу программу наблюдений post-AGB объектов. Получение новых многоцветных фотометрических наблюдений

Таблица 2. Звезды сравнения

| Обозначение | <i>B</i> | <i>V</i> | <i>R_C</i> | <i>I_C</i> |
|-----------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| Тус 2163-1469-1 | 12.886 | 11.528 | 10.759 | 10.049 |
| Тус 2163-1456-1 | 12.254 | 11.122 | 10.468 | 9.876 |

было необходимо для исследования характера переменности блеска и цвета звезды. Спектральные наблюдения проводились нами с целью уточнения спектрального класса и возможного обнаружения изменений спектра на разных уровнях блеска звезды. Также требовалась проверка классификация AU Vul как post-AGB объекта.

НАБЛЮДЕНИЯ

UBV-фотометрия

UBV-наблюдения AU Vul проводились в 2016–2020 гг. на Крымской астрономической станции (КАС) ГАИШ МГУ на 60-см рефлекторе Цейсса с электрофотометром конструкции В.М. Лютого (1971) с диафрагмой 27". Точность наблюдений составляла порядка 0^m01–0^m02. Звездные величины звезд сравнения HD 339853: *V* = 10^m46, *B* = 11^m87, *U* = 13^m16 — получены нами привязкой к фотометрическому стандарту HD 194032 с величинами: *V* = 8^m25, *B* = 8^m64, *U* = 8^m66 (Оя, 1991). Наблюдения были приведены из инструментальной системы в систему Джонсона с помощью уравнений из работы Архиповой и др. (2017).

Мы начали наблюдать AU Vul в 2016 г. и за 5 лет получили 101 оценку блеска. Данные нашей *UBV*-фотометрии приведены в табл. 1.

BVR_CI_C-фотометрия

Многоцветные фотометрические наблюдения AU Vul в фильтрах *BVR_CI_C* проводились в период с 11 июля 2019 г. по 8 ноября 2020 г. (44 ночи) на 60-см телескопе RC600 Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ, оснащенный ПЗС-камерой Andor iKon-L (2048 × 2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мкм, масштаб 0.67 угловых секунд на пиксель) и блоком фотометрических фильтров (подробнее см. Бердников и др., 2020). Наблюдения и первичная обработка кадров, включающая исправление за темновой ток, нулевой уровень и плоское поле, проводились с помощью программы Maxim DL-6.

Для калибровки звезд поля AU Vul 8 августа 2020 г. в фотометрическую погоду последовательно с объектом и на близкой воздушной массе была

Таблица 3. Результаты BVR_CI_C -фотометрии AU Vul в 2019–2020 гг.

| JD | B | V | R_C | I_C | JD | B | V | R_C | I_C |
|------------|--------|--------|-------|-------|------------|--------|--------|-------|-------|
| 2458676.34 | 12.414 | 10.523 | — | 8.421 | 2459058.40 | 12.119 | 10.363 | 9.298 | — |
| 2458696.43 | 12.520 | 10.650 | 9.534 | 8.470 | 2459067.38 | 12.083 | 10.311 | 9.235 | 8.217 |
| 2458767.25 | 12.303 | 10.423 | 9.335 | 8.334 | 2459070.39 | 12.081 | 10.292 | 9.215 | 8.199 |
| 2458769.25 | 12.205 | 10.343 | 9.262 | 8.291 | 2459070.40 | 12.083 | 10.289 | 9.222 | 8.207 |
| 2458790.32 | 11.838 | 10.072 | — | — | 2459080.36 | 11.993 | — | 9.106 | 8.141 |
| 2458792.25 | 11.861 | — | 9.016 | 8.097 | 2459088.28 | 11.866 | 10.109 | 9.055 | 8.097 |
| 2458796.25 | 11.900 | 10.109 | — | — | 2459096.25 | 11.774 | 10.051 | 9.001 | 8.049 |
| 2458799.21 | 11.955 | 10.143 | 9.077 | 8.160 | 2459099.31 | 11.781 | 10.069 | 9.014 | 8.066 |
| 2458802.19 | 12.026 | 10.177 | 9.105 | 8.170 | 2459104.33 | 11.792 | 10.081 | — | — |
| 2458804.21 | 12.101 | 10.230 | 9.129 | 8.192 | 2459110.29 | 11.863 | 10.113 | 9.060 | 8.114 |
| 2458810.25 | 12.281 | 10.376 | 9.265 | 8.312 | 2459121.34 | 11.914 | 10.126 | 9.076 | 8.130 |
| 2458813.17 | 12.367 | 10.435 | 9.320 | 8.349 | 2459129.25 | 12.192 | 10.326 | 9.236 | 8.281 |
| 2458947.57 | 11.860 | 10.177 | 9.140 | 8.196 | 2459130.22 | 12.222 | 10.359 | 9.267 | 8.287 |
| 2458958.52 | 11.894 | 10.167 | 9.114 | 8.186 | 2459135.24 | 12.378 | 10.486 | 9.382 | 8.394 |
| 2458965.49 | 12.017 | 10.223 | 9.152 | 8.209 | 2459140.27 | 12.457 | 10.557 | 9.442 | 8.447 |
| 2458983.49 | 12.412 | 10.514 | 9.393 | 8.334 | 2459144.25 | 12.455 | 10.575 | 9.450 | 8.436 |
| 2458990.45 | 12.525 | 10.635 | 9.519 | 8.394 | 2459146.29 | 12.430 | 10.538 | 9.431 | 8.431 |
| 2459024.46 | 12.600 | 10.833 | 9.710 | 8.514 | 2459149.22 | 12.384 | 10.510 | — | — |
| 2459030.48 | 12.484 | 10.716 | 9.618 | 8.448 | 2459149.22 | 12.384 | 10.513 | 9.401 | 8.407 |
| 2459048.47 | 12.232 | 10.448 | 9.359 | 8.272 | 2459151.21 | 12.349 | 10.480 | 9.384 | 8.390 |
| 2459051.41 | 12.200 | 10.421 | 9.341 | 8.289 | 2459153.21 | 12.341 | 10.454 | 9.366 | 8.376 |
| 2459055.49 | 12.155 | 10.386 | 9.320 | 8.294 | 2459162.28 | 12.317 | 10.446 | 9.345 | 8.353 |

снята площадка GD391, данные для которой были взяты из работы Клема и Ландольта (2016). В дальнейшем апертурная фотометрия проводилась, в основном, относительно звезд сравнения Тус 2163-1469-1 и Тус 2163-1456-1, звездные величины которых приведены в табл. 2.

В табл. 3 представлены результаты BVR_CI_C -фотометрии за 2019 и 2020 гг.

ЖНКЛМ-фотометрия

ИК-фотометрия AU Vul проводилась в течение 5 лет — с 2016 по 2020 г. — на 1.25-м телескопе КАС ГАИШ МГУ при помощи фотометра с фотovoltaическим приемником из антимонида индия

(InSb), охлаждаемого жидким азотом. Фотометр установлен в кассегреновском фокусе телескопа. Диаметр входной диафрагмы $\approx 12''$, а пространственное разделение пучков при модуляции составляло $\approx 30''$ в направлении восток-запад. Фотометрическим стандартом служила звезда BS7806 из каталога Джонсона и др. (1966). В табл. 4 приводятся результаты наших наблюдений звезды в полосах *ЖНКЛМ* за 2016–2020 гг. В фильтре *M* средняя ошибка измерений составила 0^m06 , в остальных фильтрах величина погрешности не превышала 0^m02 .

Таблица 4. Результаты *JHKLM*-фотометрии AU Vul в 2016–2020 гг.

| JD | <i>J</i> | <i>H</i> | <i>K</i> | <i>L</i> | <i>M</i> | JD | <i>J</i> | <i>H</i> | <i>K</i> | <i>L</i> | <i>M</i> |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2457563.5 | 7.03 | 6.47 | 6.16 | 5.65 | 5.24 | 2458384.3 | 7.12 | 6.49 | 6.14 | 5.58 | 5.44 |
| 2457583.5 | 7.07 | 6.45 | 6.16 | 5.62 | 5.29 | 2458398.2 | 7.21 | 6.59 | 6.23 | 5.63 | — |
| 2457619.4 | 7.46 | 6.74 | 6.35 | 5.77 | 5.70 | 2458415.3 | 7.17 | 6.56 | 6.23 | 5.66 | — |
| 2457639.4 | 7.00 | 6.32 | 5.99 | 5.50 | 5.34 | 2458656.5 | 7.19 | 6.53 | 6.14 | 5.57 | — |
| 2457878.6 | 7.48 | 6.79 | 6.37 | 5.64 | — | 2458684.5 | 7.29 | 6.60 | 6.18 | 5.57 | 5.39 |
| 2457940.5 | 7.28 | 6.62 | 6.21 | 5.47 | 5.31 | 2458709.4 | 7.31 | 6.63 | 6.22 | 5.60 | — |
| 2457947.5 | 7.34 | 6.67 | 6.26 | 5.53 | 5.45 | 2458738.4 | 7.40 | 6.66 | 6.27 | 5.61 | — |
| 2457969.5 | 7.23 | 6.53 | 6.12 | 5.42 | 5.26 | 2458771.3 | 7.18 | 6.55 | 6.19 | 5.59 | — |
| 2457974.4 | 7.18 | 6.50 | 6.10 | 5.41 | 5.26 | 2458781.3 | 7.05 | 6.42 | 6.08 | 5.48 | — |
| 2457978.5 | 7.20 | 6.54 | 6.12 | 5.46 | — | 2458797.2 | 7.00 | 6.37 | 6.02 | 5.44 | — |
| 2458004.3 | 7.38 | 6.76 | 6.37 | 5.66 | 5.35 | 2458836.2 | 7.28 | 6.59 | 6.18 | 5.59 | — |
| 2458030.3 | 7.19 | 6.58 | 6.23 | 5.61 | 5.33 | 2458972.5 | 7.04 | 6.38 | 6.01 | 5.49 | — |
| 2458063.2 | 7.17 | 6.57 | 6.20 | 5.54 | — | 2459005.5 | 7.22 | 6.60 | 6.22 | 5.61 | — |
| 2458253.5 | 7.14 | 6.50 | 6.13 | 5.50 | 5.27 | 2459035.4 | 7.20 | 6.57 | 6.23 | 5.64 | — |
| 2458301.5 | 7.40 | 6.78 | 6.41 | 5.75 | — | 2459068.4 | 7.06 | 6.50 | 6.18 | 5.63 | 5.56 |
| 2458330.5 | 7.12 | 6.52 | 6.16 | 5.60 | 5.39 | 2459092.4 | 7.00 | 6.38 | 6.02 | 5.49 | — |
| 2458336.4 | 7.12 | 6.52 | 6.18 | 5.59 | — | 2459123.3 | 7.07 | 6.42 | 6.05 | 5.46 | — |
| 2458351.4 | 7.15 | 6.54 | 6.22 | 5.60 | 5.37 | 2459173.2 | 7.14 | 6.46 | 6.09 | 5.54 | — |
| 2458364.3 | 7.13 | 6.54 | 6.20 | 5.56 | — | | | | | | |

Спектральные наблюдения

В 2016, 2017, 2019 гг. и 21 июля 2020 г. спектральные наблюдения AU Vul были получены на 1.25-м рефлекторе КАС ГАИШ МГУ с дифракционным спектрографом с решеткой 600 штрихов/мм и длиной щелью шириной $\sim 4''$ в спектральном диапазоне 4200–9000 Å. В качестве приемника излучения применялась матрица ST-402 (размер матрицы: 765 × 510 пикселей). Спектральное разрешение оценивается в 7.4 Å (FWHM). Обработка спектров производилась с использованием стандартной программы CCDOPS, а также программы SPE (Сергеев, Хайсбергер, 1993). Абсолютная калибровка потоков осуществлялась по спектрам звезды-стандарта из спектрофотометрического каталога Глушневой и др. (1998) с привлечением данных из атласа стандартных звездных спектров Пиклеса (1985).

Спектральные наблюдения AU Vul проводились 6 сентября и 30 октября 2020 г. на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с помощью двухлучевого спектрографа низкого разрешения, оснащенного голографическими решетками. В качестве приемников используются камеры Andor Newton 940P с ПЗС E2V CCD42-10 формата 512 × 2048 пикселей. Наблюдения проводились с длиной щелью шириной 1'' в спектральном диапазоне 3500–7500 Å. Подробное описание прибора дано в работе Потанина и др. (2020). Редукция данных включала исправление за нулевой уровень, плоское поле, темновой ток, кривизну линий и наклон спектра. Из изображения двумерного спектра удалялись следы космических частиц. Для исправления за спектральную чувствительность приемника, пропускание атмосферы и оптики наблюдались спектры стандартов, абсолютное распределение энер-

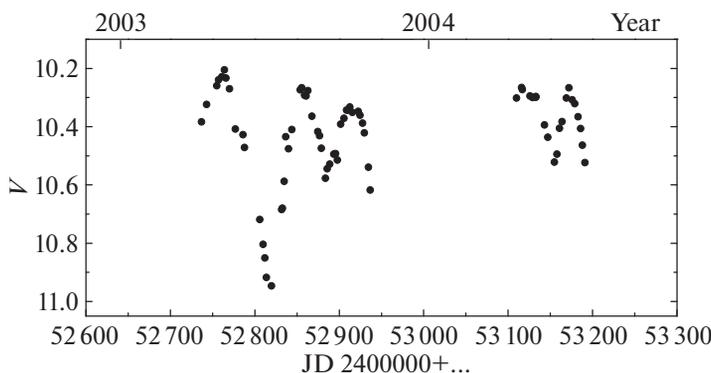


Рис. 1. Кривая блеска AU Vul в полосе V в 2003–2004 гг. по данным обзора ASAS-3.

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

Журнал спектральных наблюдений с указанием звезды-стандарта представлен в табл. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Как отмечалось во Введении, переменность AU Vul была обнаружена Россом (1926). С тех пор до 2000-х гг. фотометрических наблюдений этой звезды и связанных с этим работ практически не было, не считая работы Баера (1951), в которой по 71 оценке блеска, полученной с 2 июня 1934 г. по 12 сентября 1939 г., был выявлен период колебаний, равный 145 сут. Диапазон изменения блеска

на данным Баера (1951) составляет около 2^m : от $\sim 10^m$ до $\sim 12^m$ в фотографических лучах.

Данные обзоров ASAS-3 и ASAS-SN

Наиболее полные данные о переменности в видимых лучах предоставляют автоматические обзоры ASAS-3 и ASAS-SN.

AU Vul неоднократно попадала в поле зрения проекта по автоматическому обзору всего доступного неба ASAS (Пойманский, 2002). В период с 7 апреля 2003 г. по 4 июля 2004 г. была получена 71 оценка блеска звезды в полосе V. На рис. 1 приведен график, построенный по результатам этих наблюдений. Несмотря на фрагментарность ряда, отчетливо виден полуправильный характер переменности с характерным временем изменения блеска около 70 сут и амплитудой $0^m.25$ – $0^m.80$. Периодограммный анализ этого временного ряда проводился с помощью программы WINEFK В.П. Горанского, реализующей метод Диминга (1975), и не привел к успеху.

Более полные данные были получены и продолжают появляться в обзоре ASAS-SN (Шаппи и др., 2014; Кочанек и др., 2017). В период между 1 марта 2015 г. и 24 ноября 2018 г. было получено 576 оценок блеска в фильтре V, а с 12 апреля 2018 г. по 2 апреля 2021 г. имеется уже около 1300 наблюдений в фильтре g. Средняя точность наблюдений составила $0^m.007$ в полосе V и $0^m.008$ в полосе g. На рис. 2 приведены кривые блеска в обоих фильтрах.

На кривой блеска в фильтре V следует выделить глубокий минимум, который пришелся на момент $\sim \text{JD}2457537$, и в котором блеск звезды опустился до $11^m.8$, после чего звезда довольно быстро, за 25 сут, вернулась в яркое состояние с блеском $V = 10^m.3$. Таким образом, глубина этого минимума составила $\sim 1^m.5$. В среднем амплитуда колебаний в фильтре V в 2015–2018 гг. и в фильтре g в 2018–2021 гг. не превышала $1^m.0$.

Таблица 5. Журнал спектральных наблюдений AU Vul в 2016–2020 гг.

| Дата | JD | Стандарт | Обсерватория |
|------------|---------|--------------|--------------|
| 08.08.2016 | 2457609 | 18 Vul | КАС |
| 25.06.2017 | 2457930 | 18 Vul | КАС |
| 23.07.2017 | 2457958 | 18 Vul | КАС |
| 27.07.2019 | 2458692 | 40 Cyg | КАС |
| 05.08.2019 | 2458701 | 29 Vul | КАС |
| 26.08.2019 | 2458722 | HD189395 | КАС |
| 21.07.2020 | 2459052 | HD189395 | КАС |
| 06.09.2020 | 2459099 | BD + 33°2642 | КГО |
| 30.10.2020 | 2459153 | BD + 28°4211 | КГО |

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

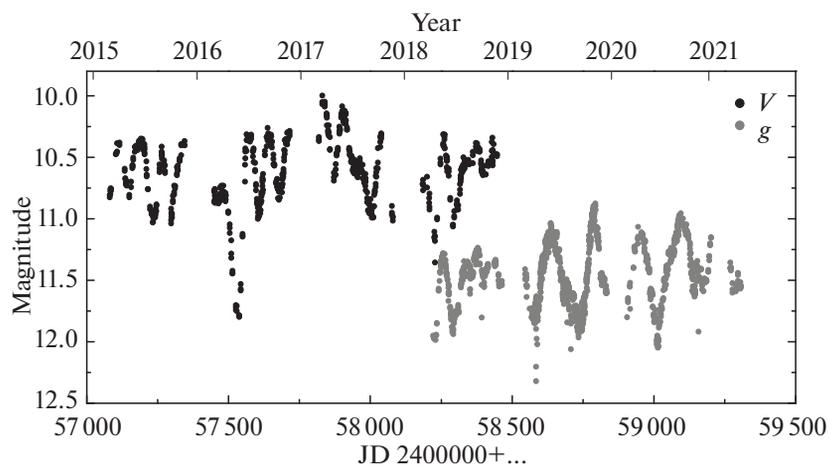


Рис. 2. Кривые блеска AU Vul в фильтрах V и g по данным обзора ASAS-SN.

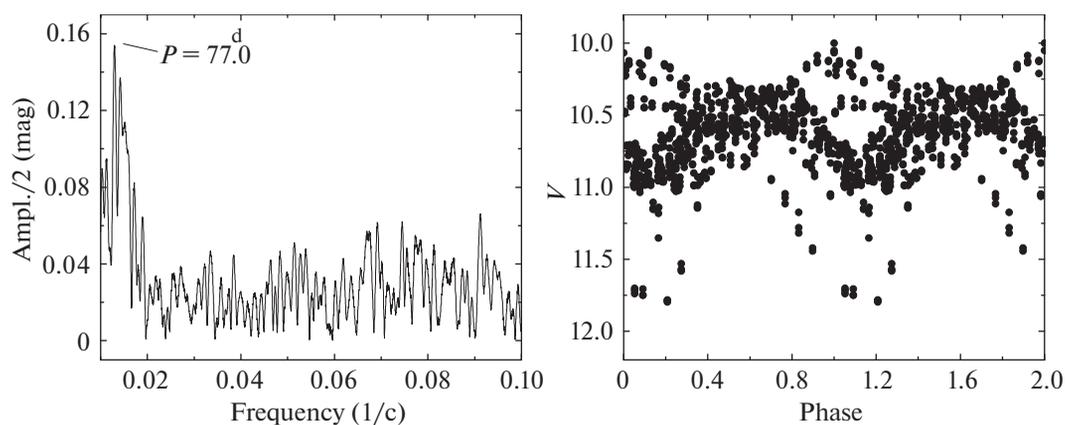


Рис. 3. Амплитудный спектр полного ряда наблюдений ASAS-SN в фильтре V и фазовая кривая, свернутая с периодом $P = 77^d$.

Наиболее значительной особенностью этих кривых блеска является изменение характерного времени переменности. Начиная с 2019 г., когда имеются наблюдения только в фильтре g , период фактически удваивается, а амплитуда становится более устойчивой по сравнению с поведением в 2015–2018 гг. Между этими двумя режимами, по всей видимости, имеется небольшой по продолжительности третий, переходный режим.

Фурье-анализ данных ASAS-SN в фильтре V , проведенный с помощью программы WINEFK, в диапазоне периодов 10–200 дней выявил несколько близких периодов.

На рис. 3 представлены амплитудный спектр полного ряда наблюдений и свертка кривой блеска с периодом $P = 77^d$, который соответствует максимальному пику. Видно, что полный ряд не вполне удовлетворительно представляется волной с данным значением периода. На следующем этапе мы

разделили весь ряд на два интервала: 2015–2016 гг. (JD2457081–57716) и 2017–2018 гг. (JD2457818–58446) и провели периодограммный анализ этих двух рядов отдельно.

На рис. 4 показаны амплитудные спектры первого и второго ряда и фазовые кривые, свернутые с $P = 75^d.3$ и $P = 70^d.3$, которые соответствуют максимальным пикам на амплитудных спектрах. В 2017–2018 гг. амплитуда колебаний менялась значительно, поэтому фазовая кривая, представляющая эти данные, выглядит размытой.

В свою очередь, для ряда измерений, полученных в 2018–2021 гг. в фильтре g , указанным выше методом удастся получить весьма надежный период со значением 149.8 сут. На рис. 5 показан амплитудный спектр и приведена свертка кривой блеска в фильтре g с найденным периодом.

Таким образом, данные автоматических обзоров дают важную информацию о переменности

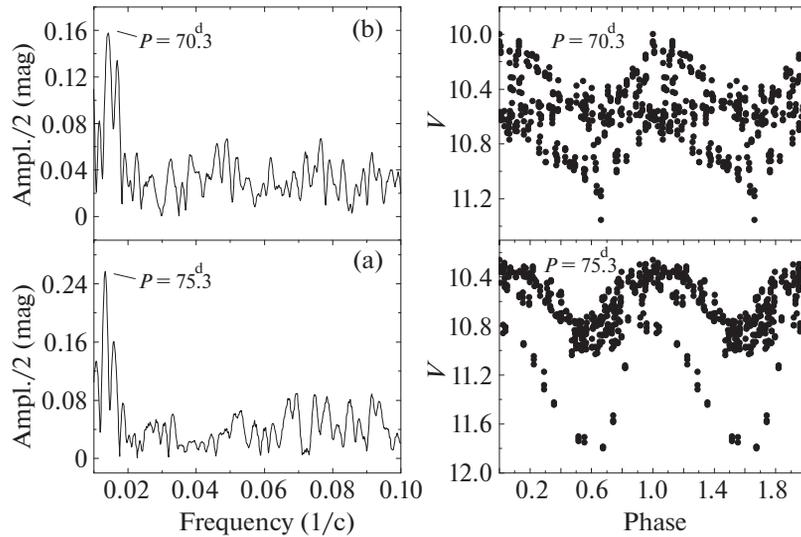


Рис. 4. Амплитудные спектры данных ASAS-SN в фильтре V за 2015–2016 гг. (а) и 2017–2018 гг. (б) и свертки наблюдений с периодами $P = 75.^{\text{d}}3$ и $P = 70.^{\text{d}}3$.

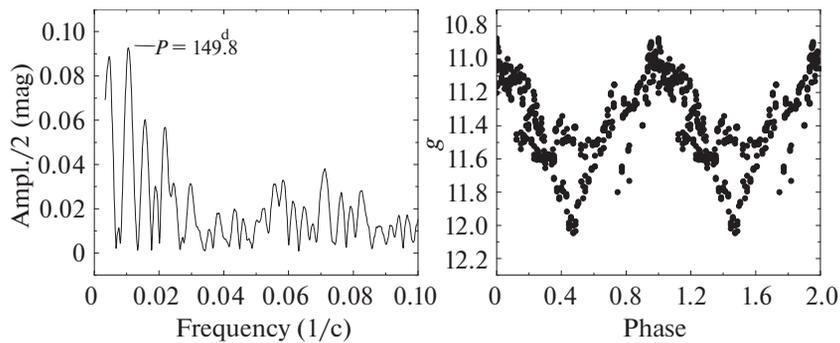


Рис. 5. Амплитудный спектр ряда наблюдений ASAS-SN в фильтре g и фазовая кривая, свернутая с периодом 149.8 дней.

AU Vul. Во-первых, эта переменность имеет полуправильный характер, проявляющийся в нестабильности амплитуды. Во-вторых, возможно, происходили бифуркации периода, связанные с переходами между основным тоном и первым обертоном. Если принять, что период $P_0 \sim 150^{\text{d}}$ относится к основному тону, а $P_1 = 70^{\text{d}} \div 75^{\text{d}}$ — к первому обертому, то их отношение составляет $P_0/P_1 \sim 2$.

Фотометрическое поведение AU Vul в отдельные моменты (например, данные за 2003 г., рис. 1) напоминает таковое звезд типа RV Tau, которые совершают колебания с чередующимися главным и вторичным минимумами, и у которых формальный период равен удвоенному пульсационному. Существует также гипотеза, которая объясняет фотометрическое поведение звезд этого типа резонансом между фундаментальной модой и первым обертоном с отношением периодов $P_0/P_1 = 2/1$ (Такеути, Петерсен, 1983).

Данные многоцветной $UBVRcIcJHKLM$ фотометрии

Обратимся теперь к данным нашей многоцветной фотометрии. На рис. 6 показаны кривые блеска AU Vul в полосах UBV и изменение показателей цвета $U - B$ и $B - V$ с 2016 до 2020 г. по результатам фотоэлектрической UBV -фотометрии и ПЗС-наблюдениям в BV -полосах. Для сравнения на рис. 6 представлены также наблюдения обзора ASAS-SN в фильтре V за 2016–2018 гг. Видно, что наши наблюдения показывают хорошее согласие с данными ASAS-SN.

Следует отметить различие фотометрического поведения звезды в разных фильтрах. В общем, моменты экстремумов совпадают, однако в отдельных фазах наблюдается различие форм кривых блеска, особенно это касается фильтра U по сравнению с другими фотометрическими полосами.

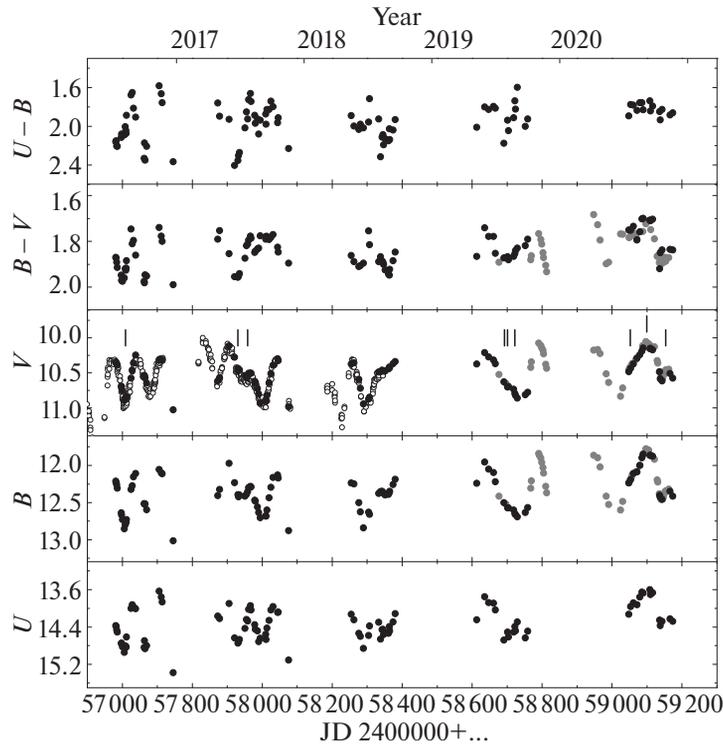


Рис. 6. Кривые блеска AU Vul в полосах UBV и изменение показателей цвета $U - B$ и $B - V$ за период с 2016 по 2020 г. Открытые кружки — данные из обзора ASAS-SN, черные кружки — фотоэлектрические наблюдения, серые кружки — данные ПЗС-фотометрии. Вертикальными штрихами на кривой блеска в фильтре V отмечены моменты спектральных наблюдений.

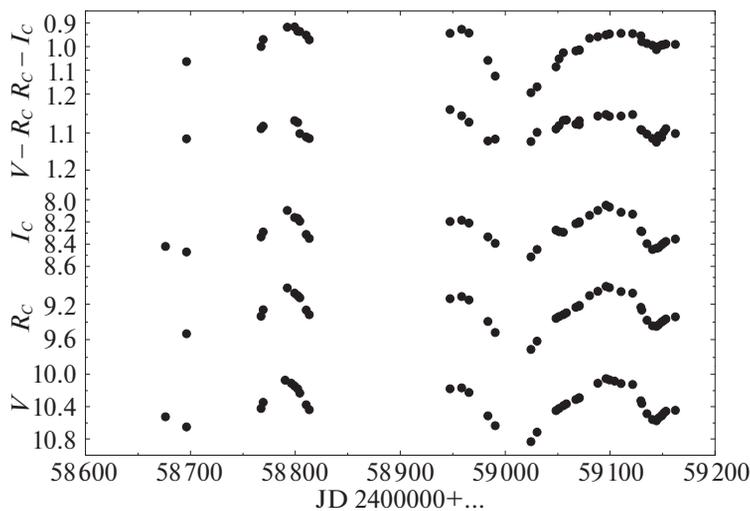


Рис. 7. Кривые блеска AU Vul в полосах $VR_C I_C$ и изменение показателей цвета $V - R_C$ и $R_C - I_C$ в 2019 и 2020 гг. по ПЗС-наблюдениям на телескопе RC600.

Изменение блеска в фильтре V и показателей цвета $V - R_C$ и $R_C - I_C$ в 2019–2020 гг. по результатам ПЗС-наблюдений изображено на рис. 7. В 2020 г. наблюдениями был охвачен интервал времени, в котором звезда испытала два минимума: глубокий (JD2459014) и мелкий локальный на нисходящей ветви (JD2429142). Показатель цвета

$V - R_C$ имел близкие значения, около 1^m26 , в моменты обоих минимумов, тогда как $R_C - I_C$ в глубоком минимуме был существенно более красным (на $\sim 0^m2$).

Кривые блеска и показателей цвета в ИК-диапазоне за 2016–2020 гг. представлены на рис. 8. Моменты экстремумов на кривых блеска в филь-

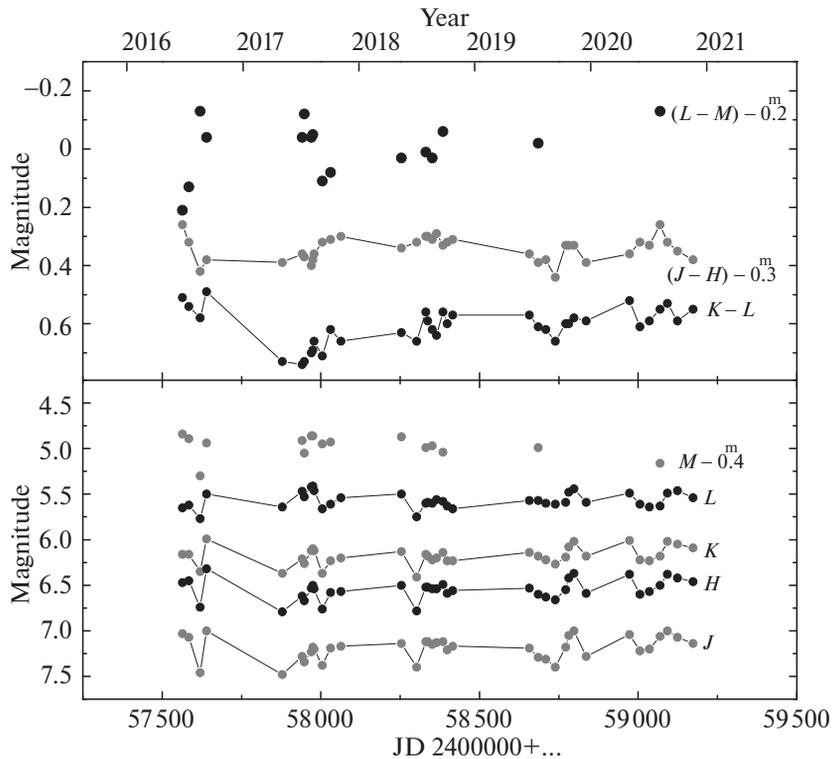


Рис. 8. Кривые блеска AU Vul в полосах $JHKL$ M и изменение показателей цвета $J - H$, $K - L$ и $L - M$ за период с 2016 по 2020 г.

трах $JHKL$ совпадают с таковыми на кривой блеска в фильтре V . За пять лет наблюдений средний блеск в полосах $JHKL$ не изменился, о характере переменности в полосе M пока трудно судить из-за небольшого количества оценок блеска. Средний показатель цвета $J - H$ от сезона к сезону не менялся, тогда как $K - L$ испытал тренд: увеличение на $0^m.2$ от 2016 к 2017 г., а затем уменьшение к 2020 г. до значений 2016 г. Далее мы покажем, что в полосах JHK излучение принадлежит звезде, тогда как в более длинноволновом диапазоне в суммарный блеск добавляется излучение нагретой пылевой оболочки.

Количество оценок блеска и интервал многоцветных фотометрических наблюдений уступают таковым обзора ASAS-SN, однако и по нашим данным в полосах U , B , V , R_C и I_C удалось провести частотный анализ и подтвердить изменение периода колебаний, которое произошло после 2018 г. Данных ИК-фотометрии значительно меньше, чем оптических, поэтому поиск периода по $JHKL$ -наблюдениям не увенчался успехом.

В табл. 6 представлены данные, которые характеризуют фотометрическое поведение звезды в 2016–2020 гг., а именно, блеск вблизи максимума (JD2459089–59110), максимальная амплитуда колебаний, периоды колебаний в 2016–2018 гг. и

в 2019–2020 гг. Блеск в фильтре M относится к другому яркому состоянию звезды (JD2457639).

Рассмотрим зависимость показателей цвета от блеска. Очевидно, что основной причиной переменности цвета при пульсациях являются вариации температуры поверхности звезды. При этом ослабление блеска сопровождается покраснением. Подобные корреляции показывают диаграммы $V - (V - R_C)$ и $R_C - (R_C - I_C)$ за вторую половину 2019 и 2020 гг. (рис. 9).

Показатели цвета $U - B$ и $B - V$ не обнаруживают однозначной связи с блеском, и их поведение в каждом цикле колебаний носит уникальный характер, поэтому мы рассмотрели зависимости цвет–блеск для каждого сезона отдельно и приводим их на рис. 10.

На диаграмме за 2016 г. мы видим широкие петли и в целом покраснение с ослаблением блеска. В 2017 г. блеск и цвет не были скоррелированы: на одном уровне блеска диапазон изменения показателей цвета составил $0^m.2$ в $B - V$ и $0^m.6$ в $U - B$. В 2018 г. и в первой половине 2019 г. прослеживалась тенденция к поглублению звезды при ослаблении блеска. В 2020 г. показатель цвета $U - B$ оставался практически на одном уровне при повышении и ослаблении блеска.

Как будет показано в следующем разделе, в спектре AU Vul обнаружены полосы поглощения

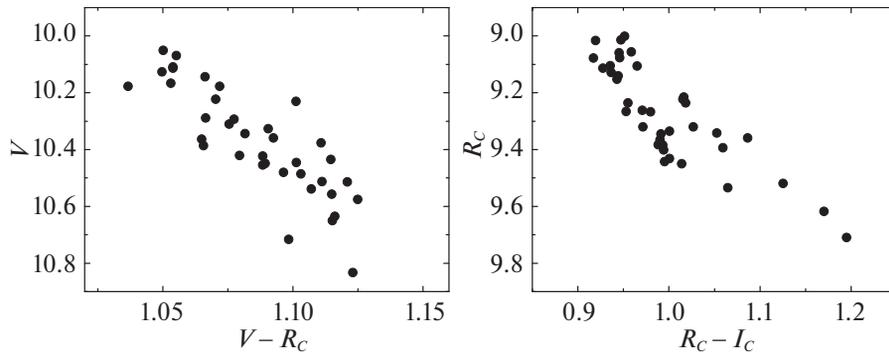


Рис. 9. Диаграммы цвет–величина, построенные по результатам собственных $VR_C I_C$ -наблюдений во второй половине 2019 и в 2020 гг.

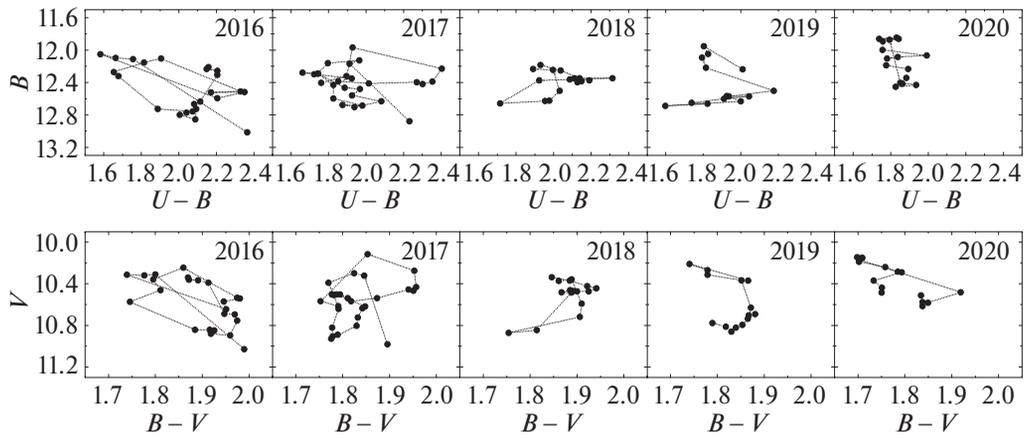


Рис. 10. Диаграммы цвет–величина, построенные по результатам собственных UBV -наблюдений в 2016–2020 гг.

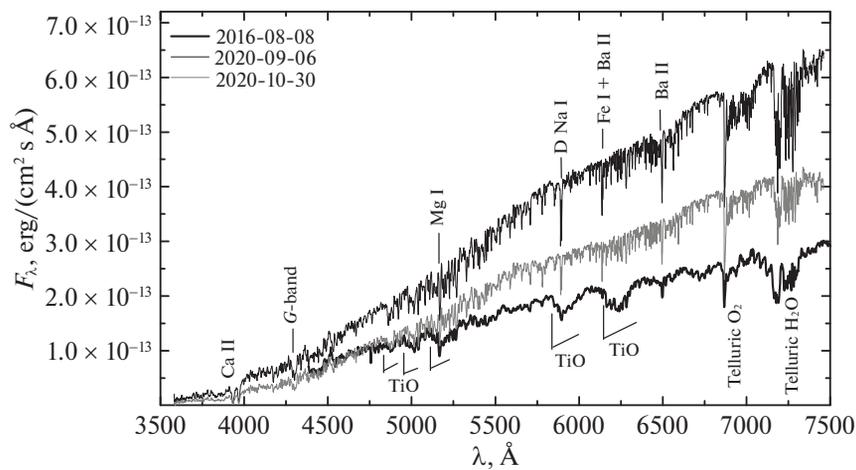


Рис. 11. Абсолютизированные спектры AU Vul, полученные на разных уровнях блеска.

Таблица 6. Фотометрические характеристики AU Vul в 2016–2020 гг.

| Полоса | Величина, mag | Амплитуда, mag | Период, дни (2016–2018) | Период, дни (2019–2020) |
|----------------------|---------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>U</i> | 13.63 ± 0.03 | 1.82 | 67.4 | – |
| <i>B</i> | 11.85 ± 0.01 | 1.20 | 67.7 | 147.4 |
| <i>V</i> | 10.13 ± 0.02 | 0.93 | 67.7 | 147.4 |
| <i>R_C</i> | 9.06 ± 0.01 | 0.46 | – | 146.5 |
| <i>I_C</i> | 8.10 ± 0.01 | 0.46 | – | 146.5 |
| <i>J</i> | 7.01 ± 0.01 | 0.48 | – | – |
| <i>H</i> | 6.38 ± 0.01 | 0.47 | – | – |
| <i>K</i> | 6.02 ± 0.01 | 0.42 | – | – |
| <i>L</i> | 5.49 ± 0.02 | 0.36 | – | – |
| <i>M</i> | 5.34 ± 0.08 | 0.46 | – | – |

TiO, наиболее сильные из которых попадают в полосы пропускания фильтров *B* и *V*. В минимуме блеска в 2016 г. интенсивности полос TiO были максимальны, однако для всех остальных фаз не обнаружено корреляции глубин полос ни с блеском, ни с показателями цвета. Тем не менее переменность этих спектральных деталей может вносить свой вклад в изменение блеска и цвета звезды.

Еще один фактор, который может повлиять на изменение блеска и цвета, — это ударно-волновые процессы. Их проявление наиболее заметно в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. 21 июля 2020 г. (JD2459052) на восходящей ветви кривой блеска, за ~45 дней до максимума, в спектре AU Vul нами была обнаружена эмиссионная линия H α (см. раздел “Особенности спектра AU Vul”). Это является прямым указанием на появление ударных волн в атмосфере звезды. При повышении блеска в этом колебании можно заметить горбы на кривых блеска, образование которых, по-видимому, также связано с ударными волнами. Показатель цвета *U* – *B* на восходящей ветви имел такие же значения, как и в максимуме блеска, т.е. проявился УФ-избыток излучения.

Сравним фотометрическое поведение AU Vul и типичных post-AGB сверхгигантов.

При анализе многолетних фотометрических наблюдений в *V* и *R* полосах 12 углеродных post-AGB звезд разных спектральных классов — от F3I

до G8I — Гривняк и др. (2010) обнаружили, что все эти звезды испытывают мультисоставные колебания и становятся более красными при ослаблении блеска. Для трех звезд из выборки Гривняка и др. (2010) у нас имеются *UBV*-наблюдения, которые показывают увеличение *U* – *B* и *B* – *V* с ослаблением блеска (Архипова и др., 2003, 2009, 2010). Следовательно, для этих звезд не требуются дополнительные факторы для объяснения их переменности, кроме вариации температуры во время пульсаций.

Пока можно сделать вывод, что AU Vul по своим фотометрическим характеристикам не показывает большого сходства с типичными post-AGB сверхгигантами, а в отдельные моменты напоминает поведение звезд типа RV Tau.

Особенности спектра AU Vul

Спектры AU Vul были получены нами на разных уровнях блеска звезды. На кривой блеска в фильтре *V* (рис. 6) отмечены моменты спектральных наблюдений.

На рис. 11 показаны абсолютизированные спектры звезды, полученные 8 августа 2016 г. (JD2457609, минимум блеска), 6 сентября 2020 г. (JD2459099, максимум блеска) и 30 октября 2020 г. (JD2459153, локальный максимум на нисходящей ветви). Наиболее заметными деталями на спектрах являются линии BaII, MgI (λ 5167–72–83), DNaI,

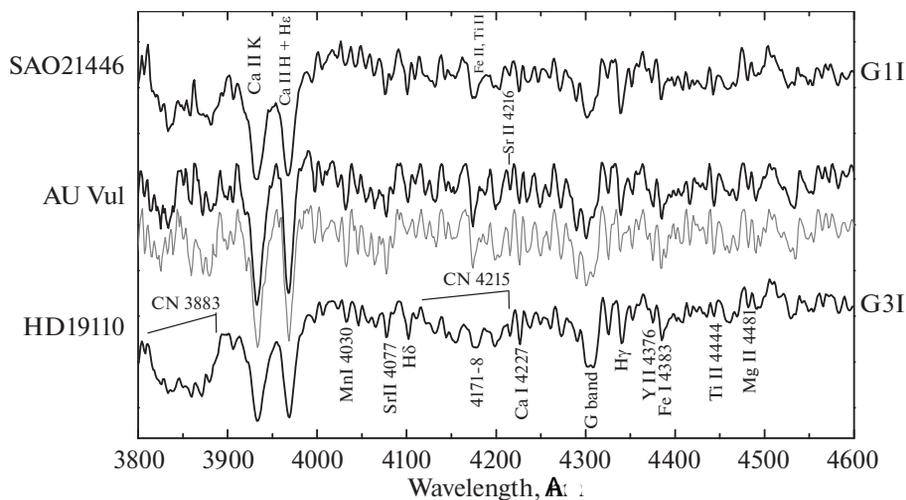


Рис. 12. Нормализованные спектры AU Vul за 9 сентября 2020 г. (черная линия) и 30 октября 2020 г. (серая линия) и спектры звезд сравнения SAO21446 и HD19110 в диапазоне длин волн λ 3800–4600.

H и K CaII и G-полоса CN. Видно, что спектр меняется в зависимости от уровня блеска и фазы пульсационного цикла. В минимуме блеска наблюдаются молекулярные полосы поглощения TiO с кантами на длинах волн λ 4848, λ 4954, λ 5167, λ 5847 и λ 6159.

Суарес и др. (2006) приписали звезде спектральный класс F3Ie по спектру низкого разрешения в интервалах длин волн 3773–5380 Å и 5569–7194 Å, при том, что в их спектре отчетливо видна G-полоса, а водородные линии значительно ослаблены.

Мы сравнили спектры AU Vul, полученные в 2020 г. в КГО, и звезд с известными спектральными классами в широком диапазоне от F3 до G5 из библиотеки Якоби и др. (1984) и пришли к выводу, что AU Vul в ярком состоянии показывает наибольшее сходство с ранними G-сверхгигантами. F-сверхгиганты имеют существенно более интенсивные водородные линии и более слабую G-полосу CN, а в спектрах сверхгигантов позднее G3 появляется полоса CN с кантом на λ 3883, которая отсутствует в спектре AU Vul. На рис. 12–14 мы приводим нормализованные спектры AU Vul и звезд сравнения SAO 21446 ($sp = G1I$) и HD 19110 ($sp = G3I$). Два наших спектра практически идентичны и имеют лишь небольшие различия в линиях H α и H β . На рис. 12 отмечены детали, которые обычно используются для спектральной классификации (Грей, Корбали, 2009).

Прежде всего следует отметить, что абсорбции H α , H β и более высокие члены бальмеровской серии водорода менее интенсивны, чем в спектрах звезд сравнения, возможно, из-за вклада эмиссионных компонент. Поэтому отношения линий металлов к H γ или H δ , которые используются для

спектральной классификации, в случае AU Vul не применимы. Как видно на рис. 12, в спектре AU Vul, по сравнению с SAO 21446 и HD 19110, несколько усилены линии металлов, в частности, особенно чувствительные к светимости линии FeII и TiII на λ 4172–4178, TiII λ 4417 и TiII λ 4471: их интенсивность выше у звезд с большей светимостью. Более интенсивны и линии элементов s-процесса SrII λ 4077, λ 4217 и YII λ 4374.9, что может указывать как на повышенную светимость звезды, так и ее химическую peculiarity. Второе объяснение поддерживается тем, что линии BaII λ 5853.7, 6142, 6497 в спектре AU Vul также заметно усилены.

На рис. 15 изображены фрагменты нормализованных спектров AU Vul, полученных нами на КАС на разных уровнях блеска. Они имеют более низкое разрешение, чем спектры из КГО, что не позволяет анализировать атомарные линии в диапазоне длин волн короче λ 6000. Однако эти наблюдения позволили обнаружить эмиссию в линии H α в спектре, полученном 21 июля 2020 г. (5 на рис. 15), на восходящей ветви кривой блеска. Известно, что у долгопериодических переменных и звезд типа RV Tau эмиссионные компоненты в линии H α возникают в определенных фазах пульсационного цикла и вызваны ударными волнами (Престон и др., 1963; Поллард и др., 1997).

Во всех спектрах, полученных на КАС, наблюдаются молекулярные полосы поглощения TiO. В минимуме блеска (1 на рис. 15) интенсивность этих полос TiO максимальна и характерна для K3-5-сверхгигантов. В других фазах глубины полос TiO не вполне скоррелированы с блеском.

В ближнем ИК-диапазоне эти спектры содержат сильные одиночные линии, прежде всего, CaII

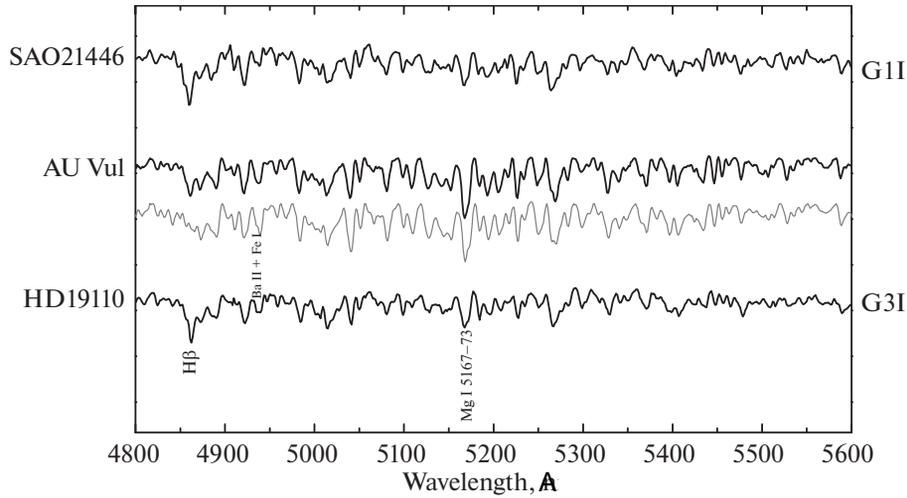


Рис. 13. Нормализованные спектры AU Vul за 9 сентября 2020 г. (черная линия) и 30 октября 2020 г. (серая линия) и спектры звезд сравнения SAO21446 и HD19110 в диапазоне длин волн λ 4800–5600.

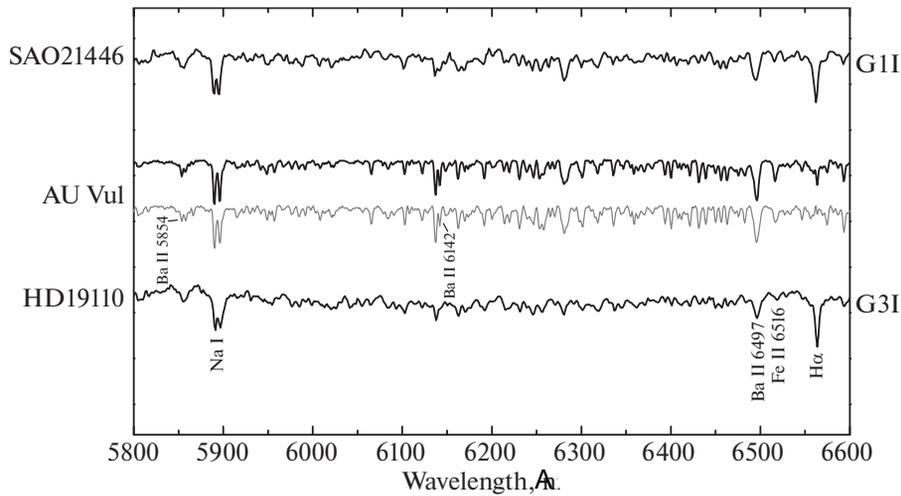


Рис. 14. Нормализованные спектры AU Vul за 9 сентября 2020 г. (черная линия) и 30 октября 2020 г. (серая линия) и спектры звезд сравнения SAO21446 и HD19110 в диапазоне длин волн λ 5800–6600.

(λ 8498, λ 8542, λ 8662), которые могут быть использованы для спектральной классификации и оценки параметров звезды (Джонс и др., 1984; Жинесте и др., 1994; Маллик, 1997).

На рис. 16 показан фрагмент спектра в диапазоне длин волн 8460–8705 Å с обозначением триплета CaII и более слабых линий FeI. На рисунке видно, что в спектре AU Vul не только в минимуме блеска (8 августа 2016 г., $V = 10^m 86$), но и в более ярком состоянии (25 июня 2017 г., $V = 10^m 43$) отсутствуют линии пашеновской серии водорода.

Мы измерили эквивалентные ширины линий триплета CaII и приводим их в табл. 7. В таблице CaT — обозначение для суммы линий триплета

CaII. Точность измерений эквивалентных ширин составила около 10%.

Эквивалентные ширины линий CaII не коррелируют с блеском. Среднее значение $EW(\text{CaT})$ по всем наблюдениям составило $7.2 \pm 0.7 \text{ \AA}$.

Используя эмпирические зависимости эквивалентных ширин линий ИК-триплета CaII от ускорения силы тяжести $\lg g$ и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ из работы Маллика (1997), мы получили для AU Vul не вполне уверенные оценки $\lg g \sim 3.0$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8 \div 0.0$.

AU Vul рассматривается как кандидат в post-AGB объекты, поэтому приведем здесь для сравнения значения $EW(\text{CaT})$ для нескольких объектов этого класса. Например, холодный маломассивный post-AGB сверхгигант AI CMi, по нашим данным,

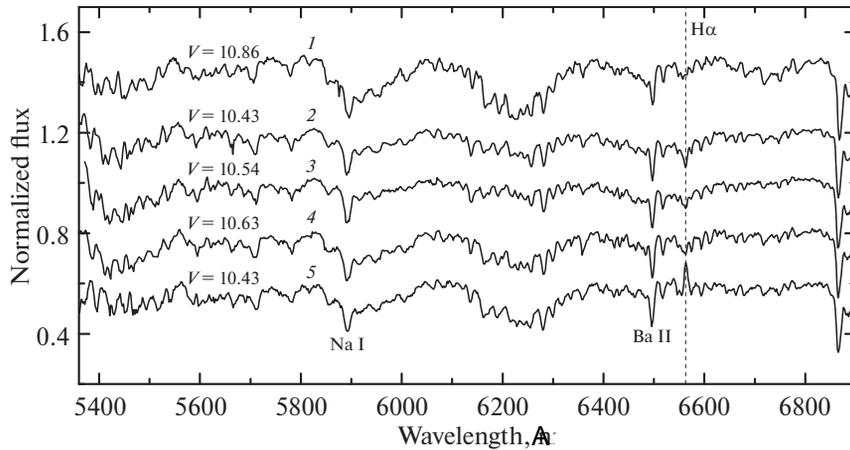


Рис. 15. Фрагменты нормализованных спектров AU Vul, полученных 2016-08-08 (1), 2017-06-25 (2), 2017-07-23 (3), 2019-07-27 (4), 2020-07-21 (5), в диапазоне длин волн λ 5360–6900. Вертикальной штриховой линией отмечено положение линии H α .

имеет $EW(\text{CaT}) = 9.8 \text{ \AA}$. У двух других объектов с большей массой и светимостью: $EW(\text{CaT}) = 11.5 \text{ \AA}$ (V354 Lac, наши неопубликованные данные) и $EW(\text{CaT}) = 20.4 \text{ \AA}$ (V1027 Cyg, Архипова и др., 2016). Таким образом, линии триплета CaII в спектре AU Vul заметно слабее, чем у типичных post-AGB объектов. Для ряда звезд типа RV Tau значения $EW(\text{CaT})$ можно получить по данным из работы Мантегацца (1991). Все эти звезды в своих спектрах имеют линии пашеновской серии водорода, а величины $EW(\text{CaT})$ в среднем меньше, чем у post-AGB сверхгигантов: 6.2 \AA (RV Tau), 11.6 \AA (V Vul), 4.9 \AA (AC Her), 7.3 \AA (SS Gem).

Итак, анализ спектральных данных показал, что

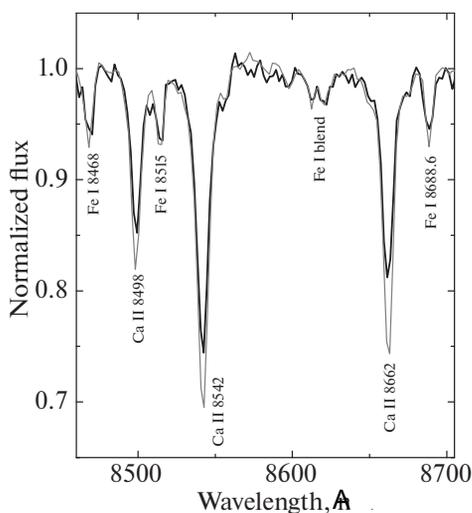


Рис. 16. Фрагменты нормализованных спектров AU Vul за 8 августа 2016 г. (черная линия) и 25 июня 2017 г. (серая линия) в диапазоне длин волн λ 8460–8705.

AU Vul в максимуме блеска может быть классифицирована как ранний G-сверхгигант с ослабленными линиями H β и H α и более высоких членов бальмеровской серии водорода и несколько усиленными линиями элементов s-процесса — бария, стронция, итрия. Факторами, которые способствуют ослаблению абсорбционных линий водорода, могут быть эмиссионные компоненты либо дефицит водорода. Для анализа профилей водородных линий в спектре AU Vul и определения химсостава крайне необходимы спектральные наблюдения высокого разрешения.

Противоречивый результат получился при сравнении спектров AU Vul в оптическом и в ближнем ИК-диапазонах. Интенсивности линий в диапазоне длин волн λ 3800–4600, используемых в качестве критериев светимости, соответствуют сверхгигантам ($\lg g \sim 1.0$), тогда как линии ИК-триплета CaII в спектре AU Vul заметно ослаблены и имеют эквивалентные ширины как у гигантов с $\lg g \sim 3.0$.

Распределение энергии в спектре

На сегодняшний момент мы имеем наблюдения AU Vul в широком диапазоне длин волн — от 0.36 до 90 мкм, что позволяет построить и проанализировать распределение энергии в ее спектре. Помимо наших собственных наблюдений в оптической и ближней ИК-областях, имеются данные в ИК-диапазоне из обзоров WISE (Кутри и др., 2013), MSX (Эган и др., 2003), AKARI (Мураками и др., 2007) и IRAS (Хелу, Уолкер, 1988). В табл. 8 приведены данные из этих обзоров. Основная проблема при построении кривой распределения энергии пульсирующей звезды — сложность одновременного получения данных в широком диапазоне длин волн. К счастью, наши фотометрические наблюдения от 0.36 (U) до 3.5

Таблица 7. Эквивалентные ширины линий триплета CaII в спектре AU Vul

| Линия | 2016-08-08 | 2017-06-25 | 2017-07-23 | 2019-07-27 | 2019-08-05 | 2019-08-26 | 2020-07-21 |
|---------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | $EW, \text{Å}$ | | | | | | |
| CaII $\lambda 8498$ | 1.22 | 1.56 | 1.35 | 1.46 | 1.56 | 1.48 | 1.4 |
| CaII $\lambda 8542$ | 2.85 | 3.43 | 2.81 | 3.43 | 3.94 | 3.44 | 3.34 |
| CaII $\lambda 8662$ | 2.09 | 2.62 | 2.10 | 2.56 | 2.70 | 2.66 | 2.53 |
| CaI | 6.16 | 7.61 | 6.26 | 7.45 | 8.20 | 7.58 | 7.27 |

Таблица 8. Данные о потоках в ИК-диапазоне

| Телескоп | Длина волны, мкм | Поток, Ян | Дата |
|-----------|--------------------|------------------------|-----------|
| WISE | 3.4, 4.6, 12, 22 | 1.66, 1.66, 0.56, 1.22 | 2010 |
| MSX | 8.28, 12.13, 14.65 | 0.811, 0.826, 1.013 | 1996 |
| IRAS | 12, 25, 60 | 0.91, 1.83, 1.79 | 1983 |
| AKARI BSC | 90 | 0.97 | 2006–2007 |

(L) мкм относятся практически к одному моменту времени, поэтому в этом диапазоне длин волн мы будем использовать исключительно наши данные. Что касается более длинноволнового диапазона, то они в большей степени относятся не к звезде, а к ее окружению, которое, возможно, не меняется значительно со временем.

Для построения и анализа распределения энергии в спектре звезды необходимо знать величину межзвездного поглощения. В случае AU Vul определение избытка цвета $E(B - V)$ явилось непростой задачей из-за ее пекулярного спектра и сложности определения нормального показателя цвета.

Опираясь на спектральную классификацию в максимуме блеска (G2I), для которого $(B - V) = 0^m9$ (Страйжис, 1992), получаем $E(B - V) = 1^m79 - 0^m90 = 0^m89$. С этим значением избытка цвета и с законом $A_U/A_B/A_V/A_J/A_H/A_K/A_L/A_M = 4.82/4.1/3.1/0.82/0.48/0.28/0.14/0.08$ (Страйжис, 1992; Курниев, 1983) мы исправили наши данные в $UBVJHKLM$ -полосах для двух состояний звезды: минимума (JD~2457606) и максимума блеска (JD~2459100). На рис. 17 показаны распределения энергии в спектре AU Vul и стандартных сверхгигантов в калибровках Страйжиса (1992) для $UBVR$ и Курниева (1983) для $JHKL$, а также синтетические спектры Пиклеса (1998). Можно видеть, что распределение энергии AU Vul в диапазоне длин волн от 0.44 (B) до 2.2 (K) мкм весьма удовлетворительно аппроксимируется излучением звезды G2I в максимуме

блеска и G8I — в минимуме, с эффективными температурами $T_{\text{eff}} = 5395$ К и $T_{\text{eff}} = 4600$ К соответственно в калибровке Страйжиса (1992). Лишь в U -полосе проявился “дефицит” излучения, а в L и M обнаружился избыток.

Значения показателя цвета $K - L$ для нормальных звезд разных спектральных классов и светимостей не превышают величины 0^m25 (Курниев, 1983). У AU Vul среднее, исправленное за покраснение, значение $K - L = 0.48$ существенно больше этой величины, т.е. в диапазоне $\lambda > 2.2$ мкм звезда кажется холоднее нормального сверхгиганта. Очевидно связать наблюдаемый избыток блеска и цвета с излучением околозвездной пылевой оболочки.

Распределение энергии в спектре AU Vul по нашим наблюдениям в максимуме блеска (JD~2459100) и данным из ИК-обзоров показано на рис. 18. Кривая распределения энергии имеет не вполне характерный для post-AGB звезд вид. В далекой ИК-области избыток излучения имеется, но он значительно меньше, чем у типичных post-AGB сверхгигантов. Не удивительно, что AU Vul редко привлекала внимание исследователей этого типа объектов. Возможно, звезда еще не прошла в полной мере фазу “сверхветра” на AGB и не потеряла большую часть своей массы.

Моделирование распределения энергии в спектре AU Vul и определение параметров пылевой оболочки предполагается осуществить в дальнейшем. Предварительно мы можем лишь грубо оценить температуру вкладчиков излучения. Как бы-

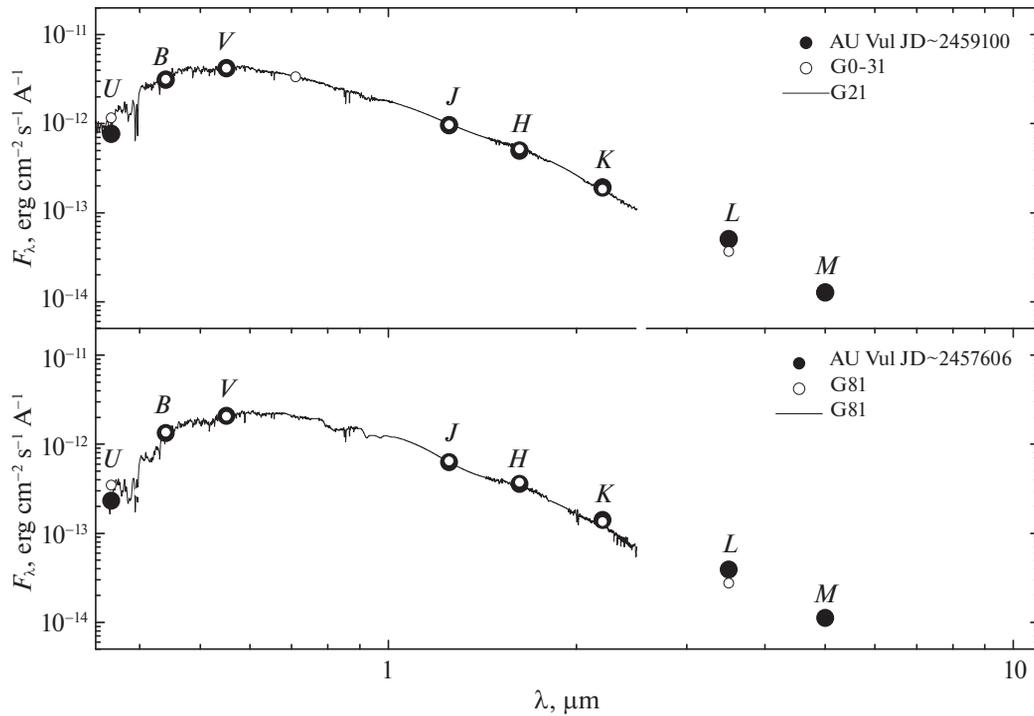


Рис. 17. Распределение энергии в спектре AU Vul, исправленное за покраснение с $E(B - V) = 0^m89$ (черные точки), в максимуме (верхняя панель) и в минимуме блеска (нижняя панель). На рисунке представлены также данные для нормальных сверхгигантов, приведенные к длине волн 5500 \AA . Открытые кружки — данные Страйжиса (1992) и Курнифа (1983), сплошные линии — спектры из работы Пиклеса (1998).

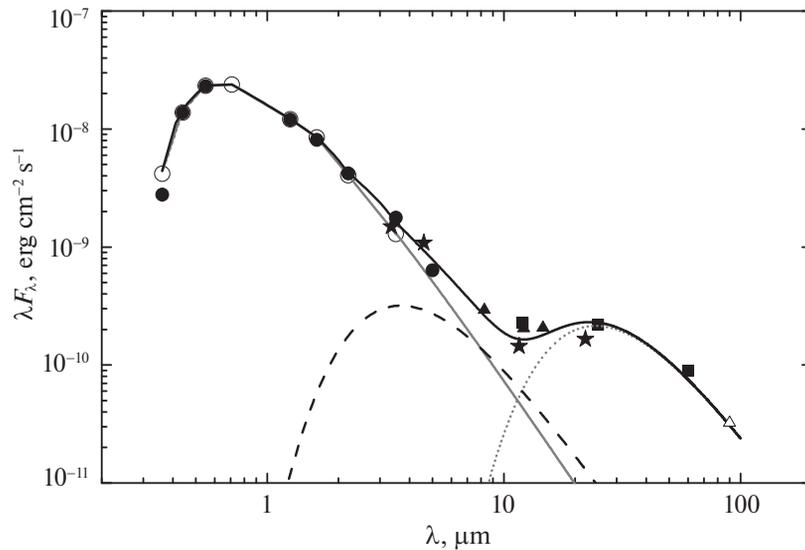


Рис. 18. Распределение энергии в спектре AU Vul по данным нашей многоцветной фотометрии (черные точки) и данным ИК-обзоров: WISE (звездочки), MSX (треугольники), IRAS (квадраты) и AKARI (открытый треугольник). Открытые кружки относятся к стандартному G2-сверхгиганту, на длинах волн $>2.2 \text{ мкм}$ серая линия представляет излучение черного тела с температурой 5400 К . На рисунке изображены также планковские кривые для температур 1000 К (штриховая линия) и 150 К (серая пунктирная линия). Сплошная черная линия представляет собой суммарное излучение звезды и двух чернотельных источников с температурами 1000 К и 150 К .

ло показано выше, в оптической и ближней ИК-области ($\lambda < 2.2 \text{ мкм}$) излучает звезда с $T_{\text{eff}} \approx 5400 \text{ К}$. В среднем ИК-диапазоне добавляется источник, излучающий как абсолютно черное тело

(АЧТ) с температурой около 1000 К . В более длинноволновой области спектра максимум излучения приходится на длину волны $\sim 25 \text{ мкм}$, и основным вкладчиком становится АЧТ с температурой 150 К .

Сплошная черная линия на рис. 18 изображает суммарное излучение звезды и двух чернотельных источников с температурами 1000 и 150 К.

РАССТОЯНИЕ, СВЕТИМОСТЬ, ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС

Звезда имеет галактические координаты $l = 67.^\circ 33$ и $b = -04.^\circ 50$. В третьем наборе данных EDR3 миссии Gaia (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2020) для звезды приведен параллакс $\pi = 0.39 \pm 0.016$ миллисекунд дуги. Оценка расстояния, основанная на этом параллаксе, составляет $D = 2317.4_{-80}^{+92}$ пк (Байлер-Джонс и др., 2021). Имея видимую звездную величину в максимуме блеска $V = 10^m 13$, избыток цвета $E(B - V) = 0^m 89$ и поглощение света в полосе V $A_V = 3.1 \times E(B - V) = 2^m 76$, мы вычислили абсолютную звездную величину по известной формуле $M_V = V - 5 \lg D + 5 - A_V = -4.45_{-0.08}^{+0.07}$. Принимая болометрическую поправку $BC = -0.165$ (Флауэр, 1996) для стандартных сверхгигантов с нормальным показателем цвета $(B - V)_0 = 0.90$ и $M_{bol\odot} = +4.72$ (Страйжис, 1982), получаем оценки болометрической величины $M_{bol} = M_V + BC = -4.62_{-0.08}^{+0.07}$ и светимости $\lg L/L_\odot = 3.74_{-0.04}^{+0.03}$. Звезда с параметрами $T_{\text{eff}} = 5400$ К и $M_{bol} = -4.62$ имеет радиус $R = 82 R_\odot$, полученный по формуле $\lg(R/R_\odot) = 8.46 - 2 \lg(T_{\text{eff}}) - 0.2 M_{bol}$ (Страйжис, 1982).

Обратимся к теоретическим расчетам светимостей звезд малых и средних масс на поздних стадиях эволюции. Эволюционные треки Миллера Бертолами (2016) для звезд с начальными массами от 0.8 до 4 M_\odot и широкого ряда начальных металличностей ($Z_0 = 0.02, 0.01, 0.001, 0.0001$), предполагают, что светимости звезд на этой стадии эволюции имеют значения от 3000 до 10 000 L_\odot . AU Vul со своими параметрами $T_{\text{eff}} \approx 5400$ К и $L \approx 5450 L_\odot$ на диаграмме Герцшпрунга–Рассела занимает положение вблизи модели с начальной массой $M_{ZAMS} = 1 M_\odot$ и массой после окончания “сверхветра” на AGB $M_{\text{final}} = 0.55 M_\odot$. Темп потери массы для этой модели на данном этапе эволюции составляет $\Delta M = 10^{-6.12} M_\odot/\text{год}$, и этот момент соответствует самому началу post-AGB стадии. Наличие у звезды мазера свидетельствует о том, что звезда еще имеет признаки AGB-звезд.

Следует отметить, что полученная нами светимость носит оценочный характер, неопределенность связана с незнанием химсостава звезды и ее точных параметров. Для того чтобы снять существующие вопросы, крайне необходимы спектральные наблюдения высокого разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе по собственным многоцветным наблюдениям в полосах $UBVRcIcJHKLM$ и архивным фотометрическим данным других авторов изучен характер переменности блеска и цвета полуправильной переменной AU Vul, а также исследован ее спектр. По результатам этой работы сделаны следующие выводы.

1. Кривые блеска показывают, что AU Vul представляет собой пульсирующую звезду с переменной амплитудой и мультипериодичностью. В разные моменты истории наблюдений у нее выявлены колебания как с периодом порядка 145–150 сут, так и с вдвое меньшим периодом — около 67–75 сут.

2. Показатели цвета $B - V$ и $U - B$ демонстрируют неоднозначное поведение при изменении блеска. Наблюдаются ослабления блеска с покраснением звезды, как это характерно для температурных пульсаций, а также с поглублением и без изменения цвета. Свой вклад в изменение блеска и цвета могут вносить переменные полосы поглощения TiO. Кроме того, в 2020 г. на восходящей ветви кривых блеска проявились горбы, образование которых может быть связано с ударными волнами в атмосфере звезды. Показатель цвета $U - B$ в этом состоянии звезды указывает на незначительный УФ-избыток излучения.

3. По оптическому спектру и по распределению энергии в спектре в максимуме блеска звезда классифицируется как G2-сверхгигант. В минимуме блеска в спектре наблюдаются молекулярные полосы TiO, интенсивность которых соответствует спектральному классу K3–K5, тогда как распределение энергии приводит к более раннему спектральному классу G8I. Полосы поглощения TiO присутствуют в спектре и в других фазах пульсационного цикла, не показывая четкой корреляции с блеском. В максимуме блеска в 2020 г. линии $H\alpha$, $H\beta$ и более высоких членов бальмеровской серии существенно ослаблены, возможно, из-за эмиссионных компонент, а абсорбции элементов s-процесса (BaII, SrII и YII) незначительно усилены. В спектре, полученном в 2020 г. на восходящей ветви кривых блеска, обнаружена эмиссионная линия $H\alpha$. Это является прямым указанием на ударно-волновые процессы в атмосфере звезды. Обнаружено, что ИК-триплет CaII в спектре AU Vul существенно менее интенсивен, чем у нормальных G сверхгигантов и post-AGB объектов с близкими температурами.

4. Построено распределение энергии в спектре звезды по собственным многоцветным фотометрическим наблюдениям в диапазоне длин волн от 0.36 мкм (U -полоса) до 5 мкм (M -полоса) и данным из обзоров WISE, MSX, IRAS и AKARI.

Исправленное за покраснение с $E(B - V) = 0^m89$ распределение энергии удовлетворительно представляется суммой трех составляющих: сверхгиганта спектрального класса G2, горячей пылевой оболочки с $T_{\text{hot}} = 1000$ К и отделенной холодной пылевой оболочки с $T_{\text{cold}} = 150$ К.

5. С использованием расстояния, основанного на данных о параллаксе из EDR3 Gaia, полученные оценки абсолютной звездной величины $M_V \approx -4^m45$ и светимости $L \approx 5450 L_{\odot}$. Согласно моделям звездной эволюции на поздних стадиях Миллера Бертолами (2016), звезда с параметрами $T_{\text{eff}} \approx 5400$ К и $\lg(L/L_{\odot}) \approx 3.74$ имеет массу порядка $0.55 M_{\odot}$ и находится в самом начале post-AGB стадии эволюции.

6. На диаграмме Герцшпрунга–Рассела AU Vul попадает в область, занимаемую холодными post-AGB объектами. Однако звезде присущи некоторые свойства, отличающие ее от типичных представителей этого класса. В частности, меньший избыток излучения в далекой ИК-области, необычные фотометрические характеристики и особенности спектра, обсуждаемые в работе. С другой стороны, AU Vul имеет некоторые признаки звезд типа RV Tau, а именно, характерный для этого типа переменных звезд вид кривой блеска (в отдельные моменты времени), проявление двух периодов, один из которых вдвое больше другого, наличие горячей пылевой оболочки, появление эмиссионной линии H α на восходящей ветви кривой блеска. Спектральный класс AU Vul (G2-G8) попадает в диапазон допустимых для звезд типа RV Tau (G-K для группы A по Престону, 1963).

Работа выполнена при поддержке междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”. При выполнении работы было использовано оборудование, приобретенное за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акрас и др. (S. Akras, J.C. Ramirez Vélez, N. Nanouris, G. Ramos-Larios, J.M. López, D. Hiriart, and D. Panoglou), MNRAS **466**, 2948 (2017).
- Архипова В.П., Носкова Р.И., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **29**, 545 (2003) [V.P. Arhipova et al., Astron. Lett. **29**, 480 (2003)].
- Архипова и др. (V.P. Arhipova, N.P. Ikonnikova, and G.V. Komissarova), Peremennyye Zvezdy (Var. Stars) **29**, No. 1 (2009).
- Архипова В.П., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 281 (2010) [V.P. Arhipova et al., Astron. Lett. **36**, 269 (2010)].
- Архипова В.П., Таранова О.Г., Иконникова Н.П., Есипов В.Ф., Комиссарова Г.В., Шенаврн В.И., Бурлак М.А., Письма в Астрон. журн. **42**, 831 (2016) [V.P. Arhipova et al., Astron. Lett. **42**, 756 (2016)].
- Архипова В.П., Иконникова Н.П., Есипов В.Ф., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **43**, 460 (2017) [V.P. Arhipova et al., Astron. Lett. **43**, 416 (2017)].
- Баер (M. Beyer), Astronomische Nachrichten **279**, 161 (1951).
- Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae), Astron. J. **161**, id.147, 24 (2021).
- Бердников Л.Н., Белинский А.А., Шатский Н.И., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Черясов Д.В., Жуйко С.В., Астрон. журн. **97**, 284 (2020).
- Браун и др. (A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevey, D.W. Evans, et al. (Gaia Collab.)), arXiv: 2012.01533 (2020).
- Викерс и др. (S.B. Vickers, D.J. Frew, Q.A. Parker, and I.S. Bojčić), MNRAS **447**, 1673 (2015).
- Грей, Корбали (R.O. Gray and C.J. Corbally), *Stellar Spectral Classification*, Princeton Ser. Astrophys. (Princeton and Oxford: Princeton Univer. Press, 2009).
- Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, W. Lu, R.E. Maupin, and B.D. Spitzbart), Astrophys. J. **709**, 1042 (2010).
- Глушнева и др. (I.N. Glushneva, V.T. Doroshenko, T.S. Fetisova, T.S. Khruzina, E.A. Kolotilov, L.V. Mossakovskaya, S.L. Ovchinnikov, and I.B. Voloshina), VizieR Online Data Catalog III/208 (1998).
- Гомес и др. (Y. Gomez, J.M. Moran, and L.F. Rodriguez), Rev. Mex. Astron. Astrofis. **20**, 55 (1990).
- Грегорио-Хетем и др. (J. Gregorio-Hetem, J.R.D. Lepine, G.R. Quast, C.A.O. Torres, and R. de La Reza), Astron. J. **103**, 549 (1992).
- Джонс и др. (J.E. Jones, D.M. Alloin, and B.J.T. Jones), Astrophys. J. **283**, 457 (1984).
- Джонсон и др. (H.L. Johnson, R.I. Mitchel, B. Iriarte, and W.Z. Wisniewski), Comm. Lunar and Planet. Lab. **4**, 99 (1966).
- Диминг (T.J. Deeming), Astrophys. Space Sci. **36**, 137 (1975).
- Жинесте и др. (N. Ginestet, J.M. Carquillat, M. Jaschek, and C. Jaschek), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **108**, 359 (1994).
- Клем, Ландольт (J.L. Clem and A.U. Landolt), Astron. J. **152**, 13 (2016).

22. Кочанек и др. (C.S. Kochanek, B.J. Shappee, K.Z. Stanek, T.W.-S. Holoien, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **129**:104502 (2017).
23. Курниф (J. Koornneef), *Astron. Astrophys.* **128**, 84 (1983).
24. Кутри и др. (R.M. Cutri, et al.), *VizieR Online Data Catalog*, II/328 (2013).
25. Льюис (B.M. Lewis), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **109**, 489 (1997).
26. Льюис и др. (B.M. Lewis, D.A. Kopon, and Y. Terzian), *Astron. J.* **127**, 501 (2004).
27. Лютый В.М., *Сообщ. ГАИШ* **172**, 30 (1971).
28. Маллик (S.V. Mallik), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 359 (1997).
29. Мантегацца (L. Mantegazza) *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **88**, 255 (1991).
30. Мураками и др. (H. Murakami, H. Baba, and P. Barthel), *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 369 (2007).
31. Миллер Бертолами (M.M. Miller Bertolami), *Astron. Astrophys.* **588**, 25 (2016).
32. Оя (T. Oja), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 415 (1991).
33. Пиклес (A.J. Pickles), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **59**, 33 (1985).
34. Пиклес (A.J. Pickles), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 863 (1998).
35. Пойманский (G. Pojmański), *Acta Astronomica* **52**, 397 (2002).
36. Поллард и др. (K.R. Pollard, P.L. Cottrell, W.A. Lawson, M.D. Albrow, and W. Tobin), *MNRAS* **286**, 1 (1997).
37. Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В., Желтоухов С.Г., Ландер В.Ю., Постнов К.А., Саввин А.Д., Татарников А.М., Черепашук А.М., Черясов Д.В., Чилингарян И.В., Шатский Н.И., Письма в *Астрон. журн.* **46**, 894 (2020) [S.A. Potanin et al., *Astron. Lett.* **46**, 837 (2020)].
38. Престон и др. (G.W. Preston, W. Krzeminski, J. Smak, and J.A. Williams), *Astrophys. J.* **137**, 401 (1963).
39. Росс (F.E. Ross), *Astron. J.* **36**, 122 (1926).
40. Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Дурлевич О.В., Киреева Н.Н., Пастухова Е.Н., *Астрон. журн.* **94**, 87 (2017).
41. Сергеев, Хайсбергер (S.G. Sergeev and F. Heisberger), *A Users Manual for SPE*. Wien (1993).
42. Страйжис В.Л., *Звезды с дефицитом металлов* (Вильнюс: Мокслас, 1982).
43. Страйжис (V. Straižys), *Multicolor Stellar Photometry* (Tucson: Pachart Publ. House, 1992).
44. Суарес и др. (O. Suárez, P. García-Lario, A. Manchado, M. Manteiga, A. Ulla, and S.R. Pottasch), *Astron. Astrophys.* **458**, 173 (2006).
45. Суарес и др. (O. Suárez, J.F. Gomez, and O. Morata), *Astron. Astrophys.* **467**, 1085 (2007).
46. Такеути, Петерсен (M. Takeuti and J.O. Petersen), *Astron. Astrophys.* **117**, 352 (1983).
47. Флауэр (P.J. Flower), *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
48. Хелу, Уолкер (G. Helou and D.W. Walker), *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases. Volume 7*, p.1-265 (1988).
49. Хименес-Эстебан и др. (F. Jiménez-Esteban, D. Engels, P. García-Lario), *Post-AGB Objects as a Phase of Stellar Evolution*, Proc. of the Torun Workshop held July 5–7, 2000 (Ed. R. Szczerba, S.K. Gurny, *Astrophys. Space Sci. Library* **265**, Boston/Dordrecht/London: Kluwer Acad. Publ., 2001).
50. Шаппи и др. (B.J. Shappee, J.L. Prieto, D. Grupe, C.S. Kochanek, K.Z. Stanek, and G. De Rosa), *Astrophys. J.* **788**, 48 (2014).
51. Шерба и др. (R. Szczerba, N. Siódmiak, G. Stasińska, and J. Borkowski), *Astron. Astrophys.* **469**, 799 (2007).
52. Эган и др. (M.P. Egan, S.D. Price, K.E. Kraemer, D.R. Mizuno, S.J. Carey, C.O. Wright, C.W. Engelke, M. Cohen, and M.G. Gugliotti), *VizieR Online Data Catalog: MSX6C Infrared Point Source Catalog. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3* (2003).
53. Эдер и др. (J. Eder, B.M. Lewis, and Y. Terzian), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **66**, 183 (1988).
54. Энгельс, Льюис (D. Engels and B.M. Lewis), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **116**, 117 (1996).
55. Юн и др. (D.-H. Yoon, S.-H. Cho, J. Kim, J.J. Yun, and Y.-S. Park), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **211**, 15 (2014).
56. Якоби и др. (G.H. Jacoby, D.A. Hunter, and C.A. Christian), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **56**, 257 (1984).