

FG Sge: НОВАЯ МНОГОЦВЕТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ И КРАТКОВРЕМЕННОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКИ В 2019 ГОДУ

© 2022 г. В. П. Архипова¹, Н. П. Иконникова^{1*}, В. И. Шенаврин¹, М. А. Бурлак¹,
А. М. Татарников¹, Д. Ю. Цветков¹, А. А. Белинский¹, Н. Н. Павлюк¹, С. Ю. Шугаров^{1,2}

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

²Астрономический институт Академии наук Словакии, Татранска Ломница, Словакия

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 29.03.2022 г.; принята к публикации 30.03.2022 г.

Представлены результаты нового этапа многолетнего фотометрического исследования FG Sge — быстро эволюционирующего ядра планетарной туманности Неп 1–5. Наши новые наблюдения в оптической (BVR_CIC) и инфракрасной (ИК) ($JHKLM$) областях за 2008–2021 гг. и 2013–2021 гг. соответственно, выполненные на телескопах ГАИШ МГУ, позволили проследить изменение блеска звезды в последние годы. Наиболее значимыми оказались наблюдения в 2019 г., когда звезда испытала на короткий срок просветление пылевой оболочки и оказалась доступной для наблюдений в полосах BVR_C . По распределению энергии в спектре FG Sge в ярком состоянии блеска в диапазоне 0.4–5 мкм получены параметры пылевой оболочки: размер пылевых частиц $a = 0.01$ мкм, температура пыли на внутреннем крае $T_{\text{dust}} = 900$ К, оптическая толщина $\tau(K) = 0.5$ ($\tau(V) = 4.5$), масса пыли в оболочке $M_{\text{dust}} = 7 \times 10^{-5} M_{\odot}$. После кратковременного просветления пылевой оболочки в 2019 г. произошел сброс новой пылевой структуры, который привел к ослаблению блеска FG Sge во всем наблюдаемом нами диапазоне длин волн. По кривым блеска и показателям цвета в ИК-диапазоне получена оценка роста оптической толщи пылевой оболочки в 2019–2020 гг.

Ключевые слова: переменные звезды, фотометрические наблюдения, ядра планетарных туманностей, эволюция, пылевые оболочки, FG Sge.

DOI: 10.31857/S0320010822060018

ВВЕДЕНИЕ

Уникальное ядро планетарной туманности Неп 1–5 — быстро эволюционирующая переменная звезда FG Стрелы — более 100 лет находится в стадии возвращения с классического эволюционного трека центральных звезд планетарных туманностей на асимптотическую ветвь гигантов. Это событие обусловлено, согласно современным представлениям, последней гелиевой вспышкой оболочечно-го источника звезды, в результате которой звезда стремительно начала охлаждаться и увеличиваться в размерах при практически постоянной болометрической светимости. Многолетние наблюдения звезды позволили заключить, что FG Стрелы на этом пути прошла последовательность сверхгигантов от спектрального класса В до К, став пульсирующей переменной при прохождении полосы неустойчивости, а в 1992 г. вступила в стадию

звезд типа R CгВ с мощными пылевыми выбросами, продолжающуюся и сейчас. Фотометрические наблюдения звезды после 1992 г. (Вудвард и др., 1993; Архипова и др., 1994, 1996, 2003, 2009; Гонсалес и др., 1998; Татарников, Юдин, 1998; Татарников и др., 1998; Архипова и др., Таранова, Шенаврин, 2002, 2013; Розенбуш, Ефимов, 2015) четко показали формирование пылевой оболочки вокруг звезды в результате конденсации пыли в веществе, сбрасываемом звездой.

В 2019 г. опубликована работа Ю.А. Фадеева (Фадеев, 2019), посвященная эволюции звезд I типа населения с массой на начальной главной последовательности в пределах $1M_{\odot} < M_{ZAMS} < 1.5M_{\odot}$ до стадии белого карлика. В ней показано, что последняя гелиевая вспышка типа LTP на post-AGB стадии возникает у звезд в очень узком интервале масс 1.30–1.32 M_{\odot} . Рассчитанную модель применили к эволюции FG Sge

*Электронный адрес: ikonnikova@sai.msu.ru

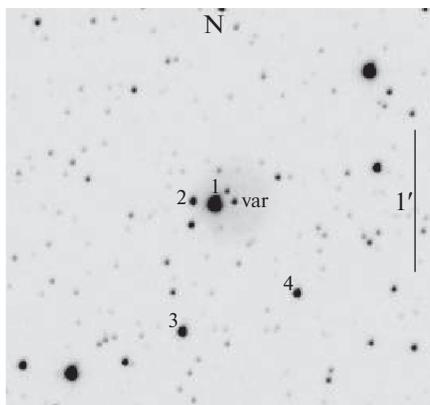


Рис. 1. Изображение окрестностей FG Sge (var) с отмеченными звездами сравнения на снимке, полученном 31 июля 2019 г. на телескопе RC600 в полосе R_C .

для сравнения с наблюдательными оценками периода ее пульсаций в разные годы. Максимальное значение периода $P = 117$ дней, определенное для эволюционного трека с массой на начальной главной последовательности $M_{ZAMS} = 1.3M_{\odot}$ при параметре овершутинга $f = 0.016$, согласуется с периодом $P = 115$ дней (Архипова и др., 2003), полученным из наблюдений после 1992 г. Кроме того, в работе определены значения современной массы звезды $M = 0.565M_{\odot}$, температуры $T_* = 4445$ К и радиуса $R_* = 126R_{\odot}$.

В настоящей работе мы представляем многоцветные наблюдения FG Sge, выполненные нами на нескольких телескопах ГАИШ МГУ в 2008–2021 гг. в диапазоне длин волн от 0.4 до 5 мкм, и некоторые события в ее истории в последние годы.

НАБЛЮДЕНИЯ

BVR_CI_C -фотометрия в 2008–2021 гг.

Фотометрические наблюдения FG Sge в 2008–2021 гг. проводились нами на нескольких телескопах с разными ПЗС-приемниками. В 2009–2015 гг. часть данных получена на 70-см рефлекторе АЗТ-2 в Москве с помощью ПЗС-камеры Argee AP-7p (M70). Кроме того, в 2008–2019 гг. для наблюдений был задействован 60-см рефлектор Цейсс-2 Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, оборудованный в разные годы

Таблица 1. Звезды сравнения

| Обозначение | B | V | R_C | I_C |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 13.84 | 12.33 | 11.54 | 10.77 |
| 2 | 16.18 | 15.39 | 14.97 | 14.63 |
| 3 | 16.22 | 14.64 | 13.80 | 12.98 |
| 4 | 15.92 | 15.06 | 14.61 | 14.11 |

ПЗС-матрицами Argee AP-47p (C60a), FLI PL 4022 (C60b) и Aspen CG42 (C60c). Большой массив данных в фотометрических полосах системы Джонсона–Кузинса BVR_CI_C в 2019–2021 гг. был получен с помощью нового телескопа RC600 Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ, оснащенного ПЗС-камерой Andor iKon-L (2048 × 2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мк, масштаб 0.67 угл. сек на пиксель) (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.

FG Sge существенно меняет свой блеск, поэтому в качестве фотометрических стандартов при разном уровне блеска звезды использовались разные звезды сравнения. Для измерения блеска FG Sge в ее ярком состоянии в основном использовался оптический спутник (2MASS 20115664+2020031) на расстоянии $7''$ к востоку от нее. Звездные величины спутника ранее были определены Архиповой и др. (2003). Принятые окончательные величины для спутника, а также для более слабых звезд сравнения приведены в табл. 1. На рис. 1 изображены окрестности FG Sge с отмеченными звездами сравнения.

Цветовые поправки, переводящие наблюдения из инструментальных систем в стандартные в полосах B , V , R_C и I_C , для некоторых вышеперечисленных комбинаций телескоп–фильтр–камера вычислялись по уравнениям из работы Цветкова и др. (2006).

Наблюдения, полученные в 2019–2021 гг. на телескопе RC600, были переведены в стандартную систему Джонсона–Кузинса с помощью следующих уравнений:

$$b = B - 0.061(B - V), \quad (1)$$

$$v = V + 0.027(B - V),$$

$$r = R_C + 0.076(V - R_C),$$

$$i = I_C + 0.074(R_C - I_C),$$

где $bvri$ — инструментальные, а BVR_CI_C — стандартные величины. Уравнения системы получены по снимкам скопления M67 с использованием стандартов из работы Шевалье и Иловайского (1991).

Обработка наблюдений производилась апертурным методом с помощью программы В.П. Горанского WinFITS. Точность оценок блеска составляет около $0^m.005$ в ярком состоянии и при хорошем качестве изображений и не превышает $0^m.05$ – $0^m.10$ в глубоких минимумах блеска.

В табл. 2 представлены оценки блеска FG Sge, полученные в 2008–2021 гг. на телескопах ГАИШ МГУ.

Таблица 2. Фотометрические наблюдения FG Sge в 2008–2021 гг.

| JD | <i>B</i> | <i>V</i> | <i>R_C</i> | <i>I_C</i> | Телескоп + + камера |
|------------|----------|----------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 2454781.17 | — | — | 16.973 | 15.047 | C60a |
| 2454787.18 | — | 18.418 | 17.264 | 15.047 | C60a |
| 2454795.15 | — | — | 17.394 | 14.907 | C60a |
| 2454956.45 | — | — | — | 15.707 | M70 |
| 2455001.37 | — | — | 18.163 | 15.207 | C60a |
| 2455009.42 | — | — | — | 15.607 | C60a |
| 2455043.40 | — | — | — | 15.907 | M70 |
| 2455054.36 | — | — | — | 15.807 | M70 |
| 2455076.29 | — | — | 18.722 | 16.107 | M70 |
| 2455145.20 | — | — | 18.843 | 16.007 | C60a |
| 2455367.52 | — | 17.628 | 15.823 | 13.457 | C60a |
| 2455407.51 | — | — | 16.183 | 13.987 | C60a |
| 2455448.34 | — | 16.995 | 14.832 | 12.777 | M70 |
| 2455454.37 | — | 16.666 | 14.482 | 12.455 | M70 |
| 2455474.27 | — | 16.405 | 14.502 | 12.207 | M70 |
| 2455477.29 | — | 16.425 | 14.642 | 12.247 | M70 |
| 2455488.28 | — | 16.715 | 14.882 | 12.487 | M70 |
| 2455494.26 | — | 16.525 | 14.812 | 12.607 | M70 |
| 2455501.22 | — | 16.655 | 14.842 | 12.607 | M70 |
| 2455514.21 | — | 16.248 | 14.614 | 12.657 | C60a |
| 2455518.21 | — | 16.268 | 14.714 | 12.727 | C60a |
| 2455525.20 | — | 16.418 | 15.163 | 13.257 | C60a |
| 2455678.51 | — | — | — | 15.607 | M70 |
| 2455701.46 | — | — | — | 15.907 | M70 |
| 2455712.45 | — | — | — | 15.927 | M70 |
| 2455725.52 | — | — | — | 15.887 | C60a |
| 2455726.53 | — | — | — | 15.847 | C60a |
| 2455728.49 | — | — | — | 15.867 | C60a |
| 2455732.51 | — | — | — | 15.727 | C60a |
| 2455744.36 | — | — | 18.264 | 15.607 | C60a |
| 2455749.38 | — | — | 18.633 | 15.707 | C60a |
| 2455753.43 | — | — | 18.823 | 15.747 | C60a |
| 2455755.38 | — | — | 18.644 | 15.667 | C60a |
| 2455757.39 | — | — | 18.733 | 15.657 | C60a |
| 2455783.45 | — | — | 18.573 | 15.507 | C60a |
| 2455789.41 | — | — | 18.453 | 15.667 | C60a |
| 2455874.21 | — | — | — | 15.897 | C60a |
| 2455879.20 | — | — | — | 15.857 | C60a |
| 2456118.48 | — | — | — | 16.836 | C60a |

Таблица 2. Продолжение

| JD | <i>B</i> | <i>V</i> | <i>R_C</i> | <i>I_C</i> | Телескоп + + камера |
|------------|----------|----------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 2456447.44 | — | — | 17.872 | 15.599 | M70 |
| 2456490.39 | — | — | 17.944 | 15.137 | C60a |
| 2456492.44 | — | — | 17.964 | 15.207 | C60a |
| 2456493.47 | — | — | 17.994 | 15.137 | C60a |
| 2456532.32 | — | — | 17.834 | 15.117 | C60a |
| 2456537.37 | — | — | 17.843 | 15.247 | C60a |
| 2456921.42 | — | — | — | 17.067 | M70 |
| 2456937.45 | — | — | — | 17.027 | M70 |
| 2456967.22 | — | — | — | 17.167 | C60a |
| 2457253.43 | — | — | 17.273 | 14.886 | C60b |
| 2457257.31 | — | — | 16.649 | 14.311 | C60b |
| 2457330.12 | — | 16.695 | 14.432 | 12.167 | M70 |
| 2457333.11 | — | 16.715 | 14.532 | 12.277 | M70 |
| 2457340.28 | — | 17.360 | 15.030 | 13.230 | C60b |
| 2457344.14 | — | 17.201 | 15.333 | 13.090 | C60b |
| 2457355.50 | — | — | 16.202 | 13.577 | M70 |
| 2457602.50 | — | — | — | 16.460 | C60b |
| 2457978.29 | — | — | — | 16.282 | C60c |
| 2457992.27 | — | — | — | 16.447 | C60c |
| 2458338.37 | — | 16.665 | 14.687 | 12.974 | C60c |
| 2458340.28 | 19.169 | 16.431 | 14.506 | 12.818 | C60c |
| 2458360.43 | — | — | 14.358 | 12.789 | C60c |
| 2458361.49 | — | 16.335 | 14.459 | 12.871 | C60c |
| 2458362.47 | — | 16.417 | 14.556 | 12.970 | C60c |
| 2458369.30 | — | 16.956 | 15.161 | 13.502 | C60c |
| 2458371.38 | — | 17.012 | 15.246 | 13.584 | C60c |
| 2458379.36 | — | 17.234 | 15.451 | 13.741 | C60c |
| 2458380.39 | — | 17.267 | 15.456 | 13.730 | C60c |
| 2458618.49 | 16.228 | 13.231 | 11.508 | 10.049 | C60c |
| 2458634.50 | 16.428 | 13.198 | 11.498 | 10.072 | RC600 |
| 2458635.50 | 16.471 | 13.319 | 11.550 | 10.133 | RC600 |
| 2458642.50 | 16.608 | 13.514 | 11.742 | 10.315 | RC600 |
| 2458650.41 | 16.851 | 13.839 | 12.035 | 10.582 | RC600 |
| 2458657.38 | 17.102 | 14.093 | 12.321 | 10.849 | RC600 |
| 2458662.45 | 17.286 | 14.329 | 12.581 | 11.130 | RC600 |
| 2458666.42 | 17.552 | 14.595 | 12.845 | 11.370 | RC600 |
| 2458667.39 | 17.563 | 14.645 | 12.899 | 11.425 | RC600 |
| 2458668.40 | 17.697 | 14.737 | 12.969 | 11.500 | RC600 |
| 2458669.46 | 17.729 | 14.809 | 13.045 | 11.558 | RC600 |

Таблица 2. Продолжение

| JD | B | V | R_C | I_C | Телескоп + + камера |
|------------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| 2458672.35 | 17.971 | 15.011 | 13.240 | 11.755 | RC600 |
| 2458675.45 | 18.095 | 15.183 | 13.401 | 12.046 | RC600 |
| 2458679.41 | 18.298 | 15.422 | 13.686 | 12.318 | RC600 |
| 2458691.52 | — | — | 15.165 | 13.665 | RC600 |
| 2458693.42 | 19.956 | 17.171 | 15.350 | 13.842 | RC600 |
| 2458694.35 | — | 17.251 | 15.641 | 13.959 | RC600 |
| 2458696.40 | — | 17.635 | 15.882 | 14.322 | RC600 |
| 2458699.50 | — | 17.95 | 16.380 | 14.704 | RC600 |
| 2458703.48 | — | — | — | 14.918 | RC600 |
| 2458707.38 | — | — | — | 15.018 | RC600 |
| 2458708.32 | — | 18.729 | 17.044 | 15.026 | RC600 |
| 2458711.40 | — | 18.629 | 17.224 | 15.086 | RC600 |
| 2458716.40 | — | — | 17.535 | — | RC600 |
| 2458718.43 | — | — | 17.738 | 15.672 | RC600 |
| 2458719.33 | — | — | 17.898 | — | RC600 |
| 2458722.40 | — | — | 17.718 | — | RC600 |
| 2458724.40 | — | — | 17.788 | 16.124 | RC600 |
| 2458727.40 | — | — | 17.932 | — | RC600 |
| 2458730.40 | — | — | 17.942 | 16.155 | RC600 |
| 2458732.35 | — | — | 18.173 | 16.144 | RC600 |
| 2458740.40 | — | — | 18.202 | 16.032 | RC600 |
| 2458741.27 | — | — | 18.198 | 16.096 | RC600 |
| 2458742.43 | — | — | 18.142 | 16.032 | RC600 |
| 2458744.35 | — | — | — | 16.068 | RC600 |
| 2458745.30 | — | — | — | 16.044 | RC600 |
| 2458749.37 | — | — | — | 16.218 | RC600 |
| 2458750.24 | — | — | 18.124 | 16.148 | RC600 |
| 2458761.22 | — | — | 18.006 | 16.163 | RC600 |
| 2458766.25 | — | — | 18.107 | 16.372 | RC600 |
| 2458767.22 | — | — | — | 16.291 | RC600 |
| 2458769.22 | — | — | — | 16.513 | RC600 |
| 2458770.33 | — | — | 17.958 | 16.458 | RC600 |
| 2458771.30 | — | — | 18.106 | 16.458 | RC600 |
| 2458773.22 | — | — | 18.136 | 16.500 | RC600 |
| 2458774.25 | — | — | — | 16.632 | RC600 |
| 2458777.17 | — | — | — | 16.650 | RC600 |
| 2458778.25 | — | — | 18.116 | 16.650 | RC600 |
| 2458779.20 | — | — | 18.304 | 16.748 | RC600 |
| 2458780.23 | — | — | 18.345 | 16.720 | RC600 |

Таблица 2. Окончание

| JD | <i>B</i> | <i>V</i> | <i>R_C</i> | <i>I_C</i> | Телескоп + + камера |
|------------|----------|----------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 2458781.27 | — | — | 18.502 | 16.828 | RC600 |
| 2458783.18 | — | — | 18.492 | 16.841 | RC600 |
| 2458784.18 | — | — | — | 16.905 | RC600 |
| 2458785.17 | — | — | 18.562 | 16.835 | RC600 |
| 2458786.18 | — | — | 18.573 | 16.832 | RC600 |
| 2458790.24 | — | — | — | 16.730 | RC600 |
| 2458792.21 | — | — | 18.694 | 16.879 | RC600 |
| 2458793.23 | — | — | 18.413 | 16.916 | RC600 |
| 2458794.19 | — | — | 18.506 | 17.006 | RC600 |
| 2458795.22 | — | — | 18.459 | 17.021 | RC600 |
| 2458800.21 | — | — | — | 17.188 | RC600 |
| 2458805.18 | — | — | 18.801 | 17.113 | RC600 |
| 2458807.18 | — | — | 18.643 | 17.283 | RC600 |
| 2458808.16 | — | — | 18.895 | 17.333 | RC600 |
| 2458811.17 | — | — | 18.640 | 17.305 | RC600 |
| 2458813.14 | — | — | 18.760 | 17.393 | RC600 |
| 2458824.17 | — | — | 18.890 | 17.568 | RC600 |
| 2458948.55 | — | — | — | 17.846 | RC600 |
| 2458958.51 | — | — | — | 17.710 | RC600 |
| 2458997.50 | — | — | — | 18.004 | RC600 |
| 2459006.50 | — | — | — | 17.976 | RC600 |
| 2459028.47 | — | — | — | 18.303 | RC600 |
| 2459030.50 | — | — | — | 18.469 | RC600 |
| 2459051.40 | — | — | — | 18.175 | RC600 |
| 2459055.50 | — | — | — | 18.446 | RC600 |
| 2459060.43 | — | — | — | 18.515 | RC600 |
| 2459070.43 | — | — | — | 18.318 | RC600 |
| 2459166.20 | — | — | — | 18.519 | RC600 |
| 2459185.16 | — | — | — | 18.560 | RC600 |
| 2459471.29 | — | — | — | 18.128 | RC600 |
| 2459514.20 | — | — | — | 18.424 | RC600 |
| 2459524.19 | — | — | — | 18.461 | RC600 |
| 2459555.13 | — | — | — | 18.501 | RC600 |

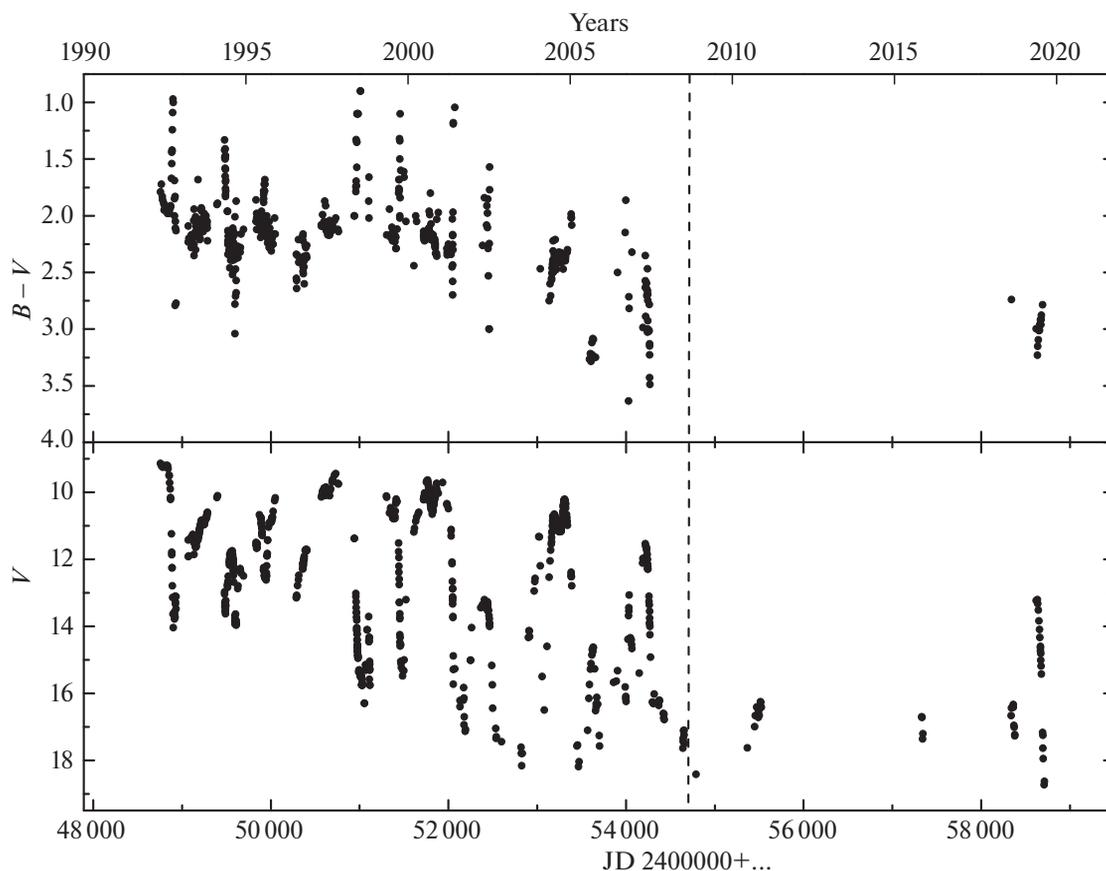


Рис. 2. Кривая блеска в полосе V и изменение показателя цвета $B - V$ в 1992–2019 г. Новые данные располагаются справа от вертикальной штриховой линии.

ЖКЛМ-фотометрия в 2013–2021 гг.

ЖКЛМ-фотометрия FG Sge проводится с 1985 г. на 125-см телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ с помощью InSb-фотометра. Описание методики наблюдений, параметры аппаратуры и данные наблюдений за 1985–2008 г. можно найти в работе Шенаврина и др. (2011). Результаты *ЖКЛМ-фотометрии* FG Sge в 2009–2013 г. представлены в работе Тарановой и Шенаврина (2013). Новые наблюдения, полученные нами в 2013–2021 г., приведены в табл. 3.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

На рис. 2 показаны кривая блеска в полосе V и изменение показателя цвета $B - V$ за 1992–2019 г. по данным из наших работ в этом журнале за период с 1994 по 2009 г. и новым наблюдениям, представленным в настоящей статье.

С 1992 по 2009 г. звезда показывала в полосах B и V колебания блеска с амплитудой от 2 до 8 звездных величин с тенденцией к уменьшению среднего блеска, присутствием периода 115 дней и хорошо выраженным поглублением на его нисходящей ветви, что подробно обсуждалось в нашей

работе (Архипова и др., 2009). Однако уже в 2010 г. блеск V упал до 16^m и ниже, а в полосе B звезду удалось измерить лишь в 2019 г., и об этом будет рассказано далее.

На рис. 3 показаны кривая блеска в полосе I и изменение показателя цвета $R - I$ за 1998–2020 гг. по нашим данным из работ Архиповой и др. (2003, 2009) и новым наблюдениям за 2008–2020 гг. Последние были переведены из системы Кузинса в систему Джонсона с использованием уравнений из работы Бесселя (1979) и поправок, полученных по одновременным наблюдениям в полосах R_C и R .

В отличие от B и V наблюдений, в полосах R и I FG Sge все время оставалась доступной для наших наблюдений, и на рис. 3 мы видим ее поведение в этих фильтрах до и после 2009 г.: падение среднего блеска I вплоть до 2019 г., взлет в 2019 г. до 10^m и ослабление до 18^m к началу 2020 г. Показатель цвета $R - I$ в среднем систематически краснел от $0^m.5$ до $2^m.5$ к 2011 г., после чего уменьшился до $1^m.5$ в начале наблюдений в 2019 г.

Пульсационная активность звезды в R и I была выражена почти так же, как в полосах V и B , однако показатель цвета $R - I$ не показывал явного поглубления к минимуму блеска.

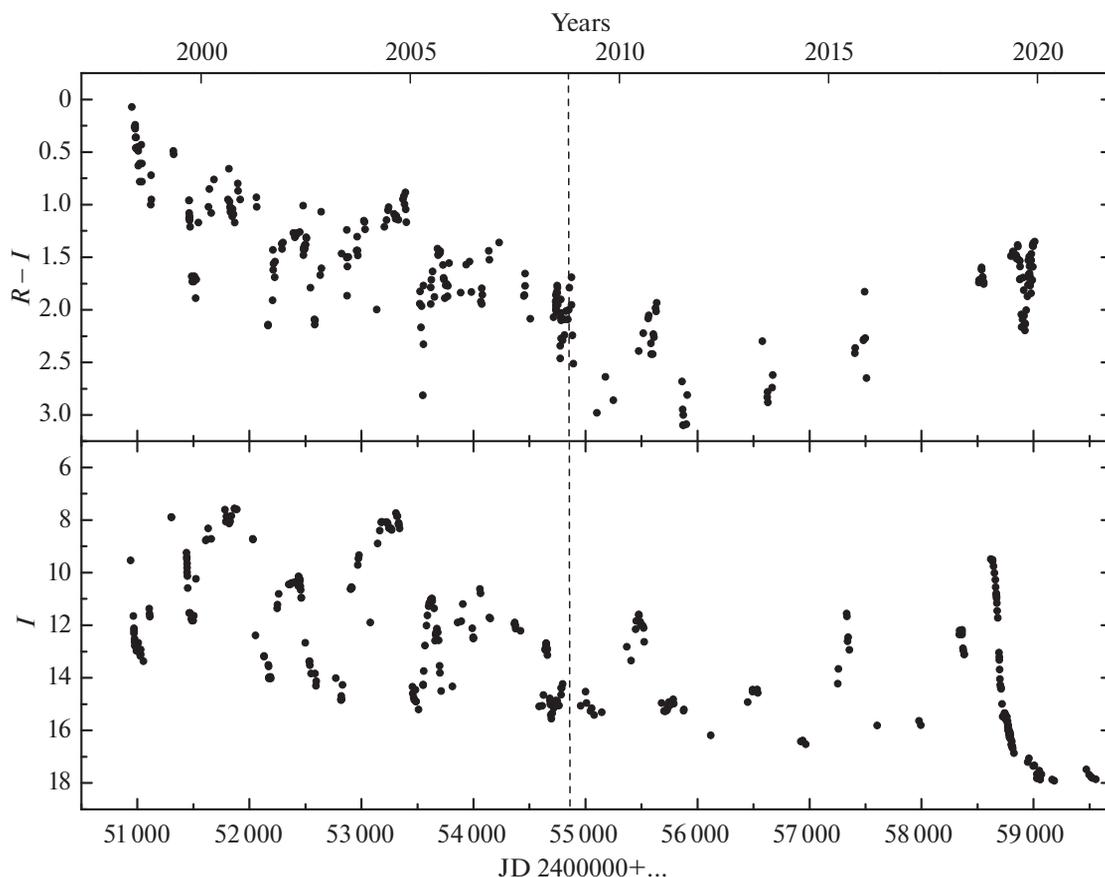


Рис. 3. Кривая блеска в полосе I и изменение показателя цвета $R - I$ в 1998–2020 гг. Новые данные располагаются справа от вертикальной штриховой линии.

На рис. 4 и 5 показаны изменения ИК-блеска и цвета FG Sge за период с 1994 по 2021 г. по наблюдениям из работ Шенаврина и др. (2011), Тарановой и Шенаврина (2013) и нашим новым данным. Подробное описание ИК-наблюдений FG Sge за период 1993–2013 гг. было представлено в работе Тарановой и Шенаврина (2013).

В полосах J и H с 1994 по 2016 г. присутствовали большие колебания суммарного блеска, связанные как с самой пульсирующей переменной звездой, так и с ее пылевой оболочкой, с выраженным трендом вниз до $H \sim 11^m$ и $J \sim 13^m$ и уменьшавшейся амплитудой колебаний.

После этого последовал подъем среднего блеска в обеих полосах на $3^m5 - 4^m$ к 2019 г. А в 2019 г. наблюдались стремительное падение блеска в полосе H почти на 5 звездных величин и прекращение видимости объекта в полосе J , что указывало на сильный рост оптической толщи пылевой оболочки в обоих фильтрах. В 2020 г. ослабление блеска в полосе H продолжались до рекордно низкого значения 11^m62 , тогда как в 2021 г. блеск объекта начал повышаться. В полосе K блеск повторил историю полосы H .

В полосах L и M пылевая оболочка с 1994 г. поярчала к 2019 г. на 1^m и 0^m8 соответственно, а

к концу 2020 г. стала слабее на $1^m5 - 2^m0$. Наблюдения 2021 г. показали незначительное поярчение объекта в этих полосах.

Как было показано в работе Тарановой и Шенаврина (2013) и на рис. 5, до 2013 г. наблюдалось монотонное покраснение источника в наблюдаемом ИК-диапазоне 1.25–5 мкм. В JHK -полосах покраснение было связано с ростом оптической толщи пылевой оболочки на луче зрения, а в более далеком ИК-диапазоне 3.5–5 мкм — с удалением пылевых структур от нагревающей звезды и, как следствие, уменьшением температуры пылевой оболочки.

После 2013 г. поведение показателей цвета $H - K$, $K - L$ и $L - M$ существенно изменилось. Так, с 2013 г. до начала 2019 г. $H - K$ при колебаниях с амплитудой до 1 звездной величины показал уменьшение среднего значения. В диапазоне 2.2–5 мкм (KLM) также наблюдалось поглубение источника. В 2019–2020 гг. при стремительном ослаблении блеска во всех ИК-полосах показатели цвета $H - K$, $K - L$ и $L - M$ значительно увеличились. В 2021 г. наблюдалось обратное явление — поглубение при повышении блеска.

Таблица 3. *JHKLM*-фотометрия FG Sge в 2013–2021 гг.

| JD | <i>J</i> | σJ | <i>H</i> | σH | <i>K</i> | σK | <i>L</i> | σL | <i>M</i> | σM |
|-----------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| 2456467.5 | 10.65 | 0.06 | 9.27 | 0.03 | 6.89 | 0.01 | 3.81 | 0.01 | 2.89 | 0.02 |
| 2456472.5 | 10.84 | 0.08 | 9.18 | 0.03 | 6.88 | 0.01 | 3.84 | 0.01 | 2.88 | 0.01 |
| 2456485.5 | 11.09 | 0.07 | 9.38 | 0.01 | 6.92 | 0.01 | 3.82 | 0.01 | 2.90 | 0.01 |
| 2456492.4 | 10.78 | 0.07 | 9.09 | 0.02 | 6.94 | 0.01 | 3.91 | 0.01 | 2.92 | 0.01 |
| 2456514.4 | 11.44 | 0.06 | 9.58 | 0.02 | 7.07 | 0.01 | 3.91 | 0.01 | 3.02 | 0.02 |
| 2456524.4 | 11.43 | 0.07 | 9.74 | 0.03 | 7.10 | 0.01 | 3.85 | 0.01 | 2.86 | 0.01 |
| 2456587.2 | 10.99 | 0.11 | 9.82 | 0.06 | 7.36 | 0.01 | 4.01 | 0.01 | 2.88 | 0.02 |
| 2456591.2 | 11.02 | 0.06 | 10.01 | 0.04 | 7.35 | 0.01 | 3.99 | 0.01 | 2.91 | 0.02 |
| 2456848.5 | — | — | 10.58 | 0.12 | 8.01 | 0.01 | 4.27 | 0.02 | 3.17 | 0.03 |
| 2456876.4 | 10.74 | 0.09 | 10.13 | 0.08 | 8.07 | 0.02 | 4.36 | 0.02 | 3.08 | 0.02 |
| 2456937.3 | — | — | 10.89 | 0.06 | 8.12 | 0.02 | 4.31 | 0.02 | 3.17 | 0.02 |
| 2457205.4 | — | — | 10.88 | 0.11 | 8.21 | 0.02 | 4.31 | 0.01 | 3.10 | 0.02 |
| 2457241.4 | — | — | 10.33 | 0.05 | 7.90 | 0.01 | 4.33 | 0.02 | 3.12 | 0.02 |
| 2457265.3 | — | — | 8.83 | 0.02 | 7.11 | 0.01 | 4.08 | 0.01 | 2.94 | 0.02 |
| 2457289.3 | 11.13 | 0.09 | 9.30 | 0.07 | 7.30 | 0.01 | 4.10 | 0.01 | 2.91 | 0.02 |
| 2457328.2 | 9.84 | 0.02 | 8.43 | 0.02 | 6.77 | 0.01 | 3.93 | 0.01 | 2.97 | 0.02 |
| 2457561.5 | 12.48 | 0.23 | 9.82 | 0.04 | 7.14 | 0.01 | 3.78 | 0.01 | 2.76 | 0.01 |
| 2457586.5 | 10.54 | 0.06 | 9.14 | 0.04 | 7.03 | 0.02 | 3.85 | 0.02 | 2.70 | 0.02 |
| 2457620.4 | — | — | 9.62 | 0.04 | 7.28 | 0.01 | 3.87 | 0.02 | 2.86 | 0.02 |
| 2457643.4 | 10.57 | 0.06 | 9.13 | 0.02 | 7.28 | 0.01 | 3.89 | 0.01 | 2.85 | 0.02 |
| 2457943.5 | — | — | 9.49 | 0.04 | 7.02 | 0.01 | 3.76 | 0.01 | 2.65 | 0.01 |
| 2457970.5 | — | — | 9.44 | 0.02 | 6.85 | 0.01 | 3.68 | 0.01 | 2.68 | 0.01 |
| 2458006.3 | — | — | 9.31 | 0.02 | 6.84 | 0.01 | 3.67 | 0.01 | 2.69 | 0.02 |
| 2458254.5 | 10.92 | 0.04 | 8.82 | 0.01 | 6.57 | 0.01 | 3.56 | 0.01 | 2.65 | 0.01 |
| 2458333.4 | 9.97 | 0.03 | 8.30 | 0.01 | 6.47 | 0.01 | 3.62 | 0.01 | 2.69 | 0.02 |
| 2458361.4 | 9.88 | 0.02 | 8.32 | 0.01 | 6.53 | 0.01 | 3.64 | 0.01 | 2.71 | 0.01 |
| 2458386.3 | 10.10 | 0.03 | 8.40 | 0.01 | 6.46 | 0.01 | 3.58 | 0.01 | 2.65 | 0.02 |
| 2458410.2 | 10.11 | 0.02 | 8.34 | 0.01 | 6.41 | 0.01 | 3.51 | 0.01 | 2.57 | 0.01 |
| 2458630.5 | 7.86 | 0.01 | 6.61 | 0.01 | 5.34 | 0.01 | 3.13 | 0.01 | 2.38 | 0.01 |
| 2458656.5 | 8.36 | 0.01 | 7.01 | 0.01 | 5.55 | 0.01 | 3.18 | 0.01 | 2.44 | 0.01 |
| 2458684.5 | 9.62 | 0.02 | 7.84 | 0.01 | 5.94 | 0.01 | 3.26 | 0.01 | 2.42 | 0.01 |
| 2458707.3 | 10.44 | 0.04 | 8.32 | 0.01 | 6.17 | 0.01 | 3.25 | 0.01 | 2.43 | 0.02 |
| 2458738.3 | 10.76 | 0.04 | 8.52 | 0.02 | 6.34 | 0.01 | 3.32 | 0.01 | 2.33 | 0.01 |

Таблица 3. Окончание

| JD | J | σJ | H | σH | K | σK | L | σL | M | σM |
|-----------|-----|------------|-------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
| 2458773.3 | — | — | 8.88 | 0.02 | 6.50 | 0.01 | 3.44 | 0.01 | 2.49 | 0.01 |
| 2458798.2 | — | — | 9.17 | 0.02 | 6.70 | 0.01 | 3.48 | 0.01 | 2.50 | 0.01 |
| 2458981.5 | — | — | 9.88 | 0.09 | 7.56 | 0.01 | 3.92 | 0.01 | 2.85 | 0.02 |
| 2459030.5 | — | — | 10.59 | 0.11 | 7.84 | 0.01 | 4.06 | 0.01 | 2.97 | 0.01 |
| 2459068.4 | — | — | 11.03 | 0.12 | 8.06 | 0.01 | 4.16 | 0.02 | 2.93 | 0.02 |
| 2459165.2 | — | — | 11.62 | 0.11 | 8.44 | 0.03 | 4.66 | 0.02 | 3.36 | 0.02 |
| 2459199.2 | — | — | — | — | 9.00 | 0.02 | 4.71 | 0.01 | 3.47 | 0.02 |
| 2459394.4 | — | — | — | — | 8.76 | 0.05 | 4.65 | 0.02 | 3.37 | 0.03 |
| 2459420.4 | — | — | 10.08 | 0.08 | 8.07 | 0.02 | 4.55 | 0.01 | 3.27 | 0.02 |
| 2459450.4 | — | — | — | — | 8.55 | 0.02 | 4.45 | 0.02 | 3.30 | 0.02 |
| 2459517.2 | — | — | 9.47 | 0.06 | 8.24 | 0.02 | 4.56 | 0.01 | 3.22 | 0.02 |

*Фотометрические наблюдения FG Sge
в 2019–2021 гг.*

В 2019 г. нам удалось зарегистрировать FG Sge в оптическом диапазоне (полосах B , V , R_C) после нескольких лет невидимости.

Кривые блеска и показателей цвета FG Sge за 2019 г. по наблюдениям на телескопе RC600 весьма полно представлены на рис. 6. В 2020–2021 гг. звезда снова находилась в слабом состоянии блеска и была нами зарегистрирована лишь в полосе I_C на уровне блеска 18^m1 – 18^m5 .

В 2019 г. после поярчания в полосе B до 16^m2 звезда потеряла в блеске более 3^m за 75 дней и стала недоступной для наблюдений.

В полосе V блеск удалось зафиксировать от $V \sim 13^m$ до $V \sim 19^m$, тогда как в полосах R_C и I_C мы проследили падение блеска звезды от 11^m56 до 19^m и от 10^m12 до 18^m0 соответственно. Причиной ослабления блеска является рост поглощения света FG Sge на луче зрения, вызванный потерей ее массы в форме звездного ветра и образованием новых пылевых структур. Изменение показателей цвета $B - V$ и $R_C - I_C$ с блеском в полосах V и R_C соответственно показано на рис. 7. В 2019 г. показатель цвета звезды $B - V$ поглубел на 0^m4 , $V - R_C$ — на 0^m3 . Поглубение связано с присутствием в новой формирующейся пылевой оболочке мелких частиц, вызывающих рассеяние света. Показатель $R_C - I_C$ испытал покраснение от 1^m4 до 2^m0 во время ослабления блеска до 18^m и затем вернулся к значению $\sim 1^m4$.

Такое поведение показателя цвета $R_C - I_C$, на наш взгляд, может быть следствием проявления в эти дни взаимодействия пульсационной активности звезды с усиленным звездным ветром. Отметим, что еще в 2001 г. звезда показала необычный

двойной глубокий минимум блеска около $V = 17^m$, показатель цвета $V - I$ в котором дважды увеличивался от 2^m5 до 3^m5 – 3^m7 и затем возвращался к 2^m5 (Архипова и др., 2003).

Наблюдения FG Sge в 2019 г. показали стремительное падение блеска звезды в оптическом диапазоне и более плавное и существенно меньшее — в ближнем ИК (до 5 мкм).

В ИК-диапазоне в 2019 г. изменения блеска составили: в полосе J — падение на 3^m , в полосе H — на 4^m5 , в K — на 2^m7 . В сравнении с предыдущими годами необычно сильно ослабел блеск в полосах L и M — на 1^m0 и 0^m8 соответственно. В 2020 г. падение блеска во всех полосах ИК-диапазона продолжилось, и к концу 2020 г. звездные величины в K , L и M -полосах достигли своих максимальных значений за всю историю наших наблюдений. Звезда покраснела как никогда ранее. 11 ноября 2020 г. (JD2459165) показатели цвета $H - K$ и $L - M$ увеличились до 3^m2 и 1^m3 , соответственно, а 15 декабря 2020 г. $K - L$ достиг рекордного значения 4^m29 . Немногочисленные наблюдения в 2021 г. показали некоторое поярчание объекта в KLM и более существенное — на 2^m — в H -полосе. Показатели цвета $H - K$ и $K - L$ при этом уменьшились, а $L - M$ практически не изменился.

Распределение энергии в спектре и оценка параметров пылевой оболочки

Многоцветная фотометрия позволяет получить абсолютное распределение энергии в спектре FG Sge и ее пылевой оболочки, если выполнить абсолютную калибровку всех измеренных величин BVR_CI_CJHKLM (Страйжис, 1977; Курниф, 1983; Бессель, 1998).

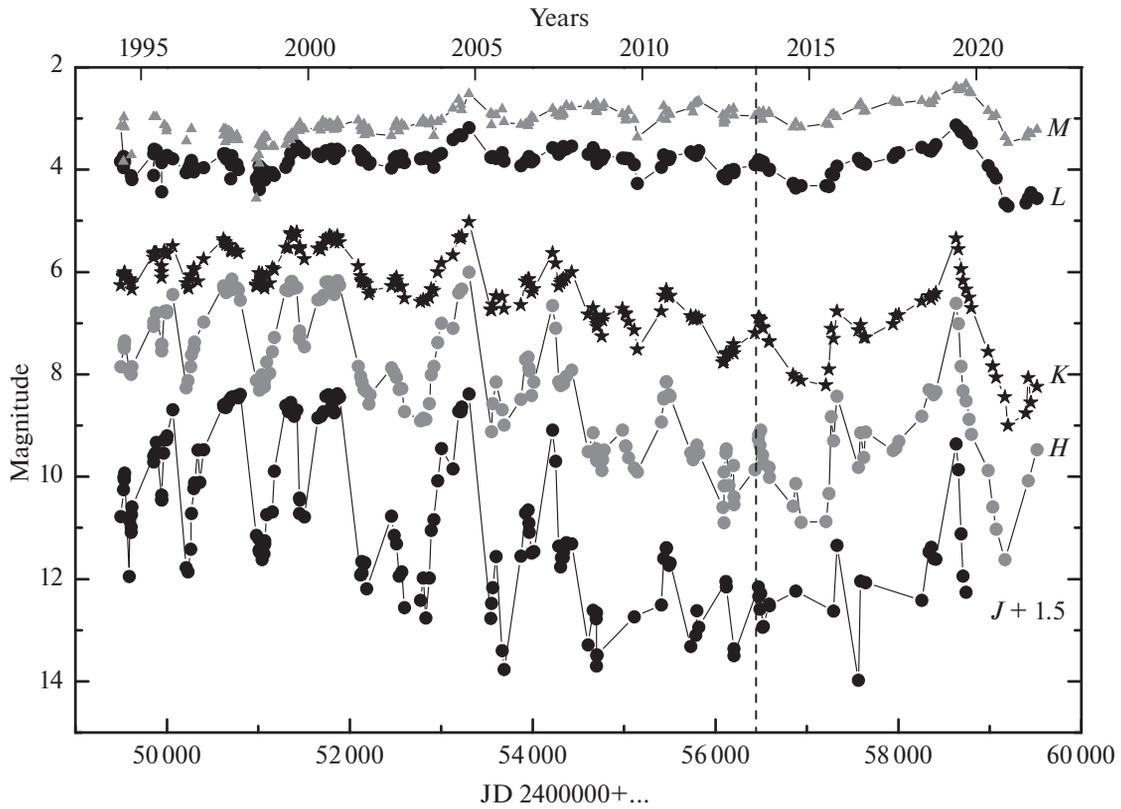


Рис. 4. Кривые блеска FG Sge в полосах *JHKLM* в 1994–2021 гг. Новые данные располагаются справа от вертикальной штриховой линии.

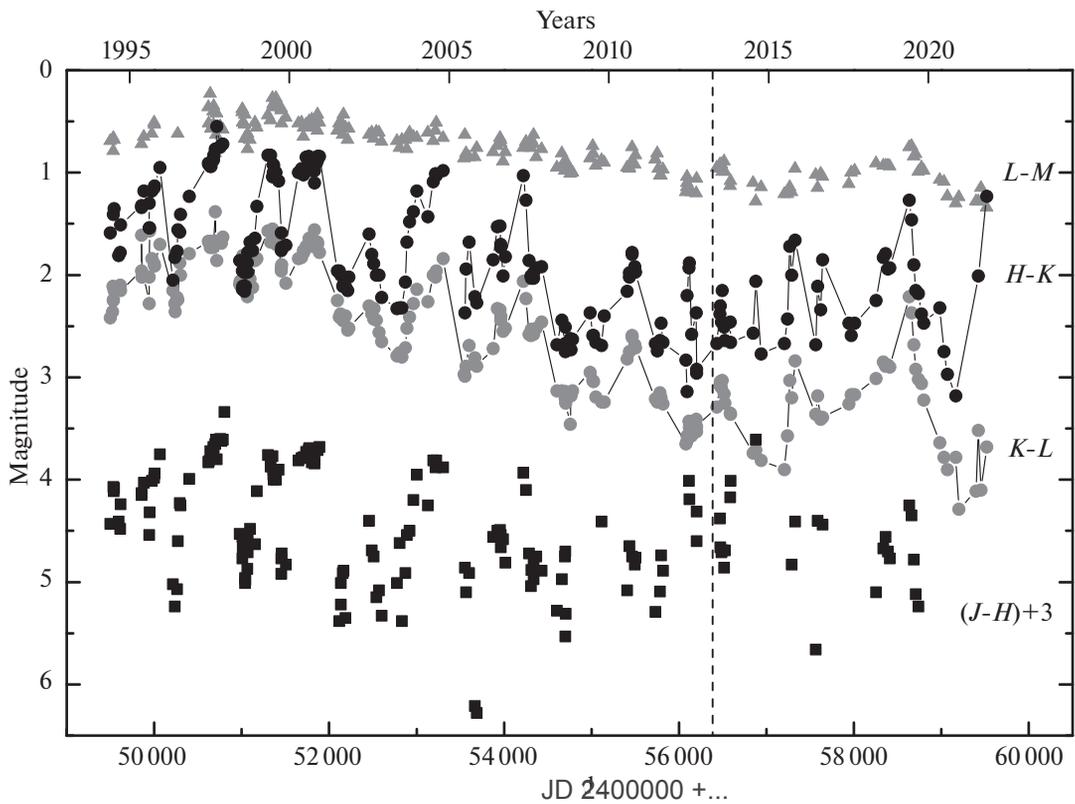


Рис. 5. Изменение ИК-показателей цвета FG Sge в 1994–2021 гг. Новые данные располагаются справа от вертикальной штриховой линии.

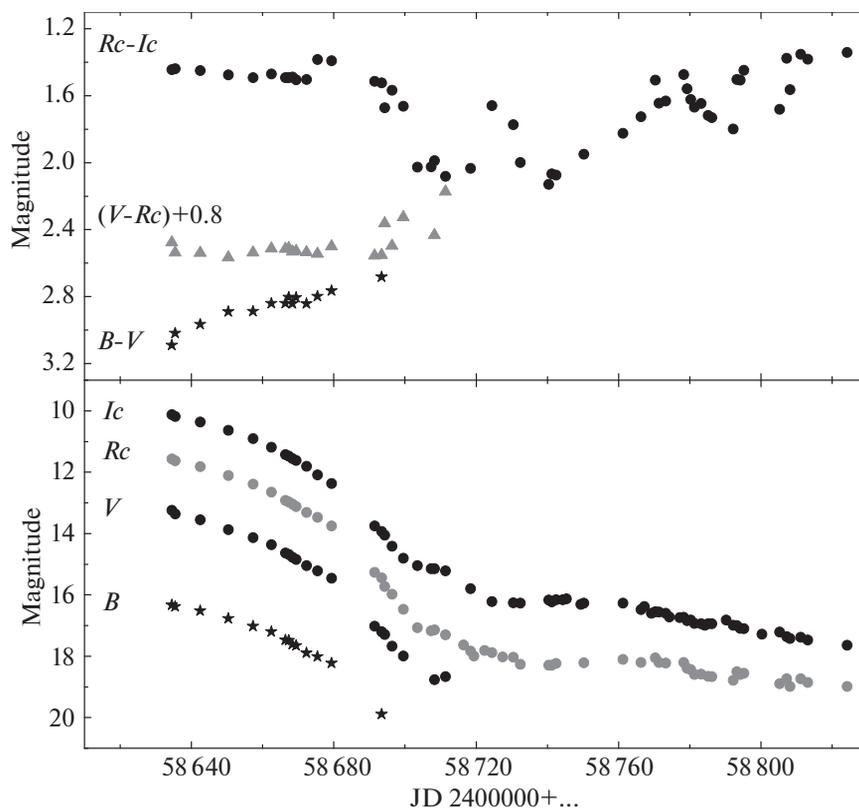


Рис. 6. Кривые блеска и показателей цвета FG Sge в 2019 г. по наблюдениям на телескопе RC600.

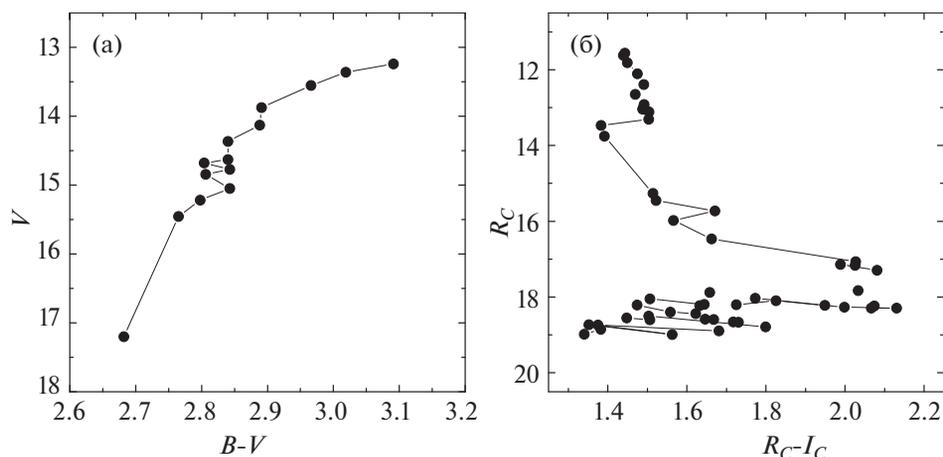


Рис. 7. Диаграммы цвет—блеск по наблюдениям в полосах BV (а) и $R_C I_C$ (б).

На рис. 8 приводятся потоки излучения звезды в абсолютных единицах в 2019–2020 гг., исправленные за межзвездное поглощение света FG Sge с избытком цвета $E(B - V) = 0^m4$ (Архипова, 1988).

Видно, что поток излучения от звезды в полосах V , R_C и I_C за 73 дня (JD2458634–2458707) уменьшился почти в 200 раз, а за 163 дня (JD2458634–2458797) в полосах R_C и I_C — в 550 раз. В полосах V , R_C и I_C и в разной степени в J и H наблюдаемое излучение является суммой прямого излу-

чения центральной звезды, ослабленного пылевой оболочкой, и рассеянного оболочкой излучения. Потоки в K , L и M полосах принадлежат пылевой оболочке.

Сложное строение пылевой оболочки FG Sge, связанное с многочисленными эпизодами сброса вещества и пылеобразования, клочковатая структура (ответственная за поглубение оптических показателей цвета) затрудняет моделирование системы. Тем не менее можно получить оценки основных параметров системы в наиболее простых предположениях: оболочка является сферически

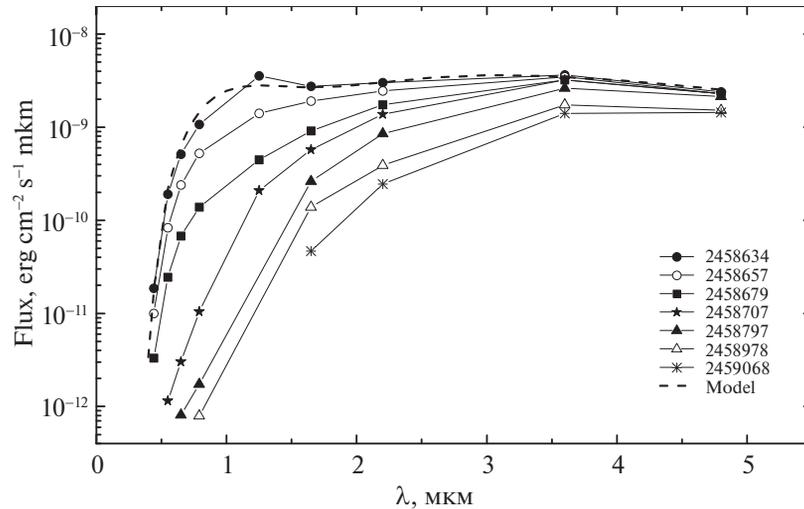


Рис. 8. Распределение энергии в спектре FG Sge в 2019–2020 гг., исправленное за межзвездное поглощение света. Указаны юлианские даты наблюдений. Штриховой линией изображена модельная кривая для даты JD2458634.

симметричной, образована при постоянном темпе потери вещества и содержит углеродные пылинки малых размеров (для обеспечения высокого уровня рассеянного света в оптическом диапазоне).

Используя указанные выше предположения, мы провели моделирование спектрального распределения энергии FG Sge в диапазоне длин волн 0.4–5.0 мкм с помощью программы CSDUST3 (Иган, 1988) для даты JD2458634. Для моделирования были приняты параметры звезды $T_* = 4445$ К и $R_* = 126R_\odot$ из работы Фадеева (2019).

Результат показан на рис. 8 в виде штриховой линии. Наблюдаемое до начала резкого падения в 2019 г. распределение энергии в спектре FG Sge удастся воспроизвести только с очень малыми пылевыми частицами: $a = 0.01$ мкм и меньше. Внутренний радиус оболочки при этом получается равным примерно $40R_*$, температура пыли на внутреннем крае 900 К, оптическая толщина $\tau(K) = 0.5$ ($\tau(V) = 4.5$), масса пыли в оболочке $M_{\text{dust}} = 7 \times 10^{-5} M_\odot$.

В 2019 г. наблюдалось сильное (более, чем в 4 раза) падение интегрального потока излучения от FG Sge в представленном широком интервале длин волн. Подобное поведение совместно с наблюдаемым уменьшением потока и на длине волны 5 мкм можно было бы объяснить появлением на луче зрения плотного поглощающего облака, которое закрыло не только центральную звезду, но и значительную часть горячей пылевой оболочки. Однако большие характерные размеры этой части оболочки (десятки а.е.) и относительно короткое время явления требуют больших скоростей движения этого облака (порядка 1000 км/с), что невозможно. Можно предложить другой сценарий, качественно объясняющий наблюдаемое ослабление блеска, —

образование новой очень плотной сферически симметричной пылевой оболочки вокруг центральной звезды. Для того чтобы не привести дополнительного излучения в рассматриваемом диапазоне длин волн, эта оболочка должна быть оптически толстой даже для собственного излучения в ближнем ИК-диапазоне. В этом случае уже существующая оболочка, лишившись источника нагрева, также снизит температуру, и ее максимум излучения уйдет в средний ИК-диапазон.

Многоцветная фотометрия позволила нам оценить изменение оптической толщины на луче зрения в 2019–2020 гг. для звезды и пылевой оболочки. Первое наблюдение FG Sge с формирующейся

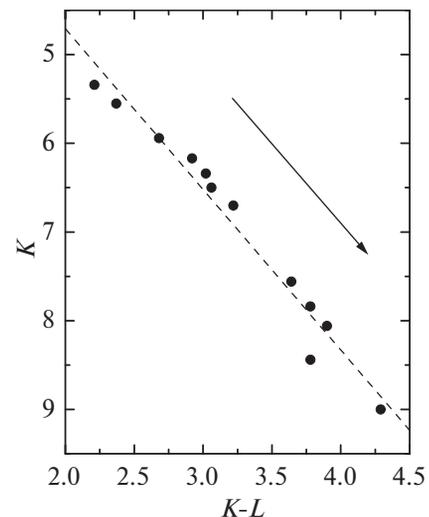


Рис. 9. Диаграмма цвет–блеск по данным 2019–2020 гг. Черные точки — наши наблюдения. Штриховая линия представляет линейную аппроксимацию данных. Стрелка показывает направление стандартного закона межзвездного поглощения.

новой пылевой оболочкой в 2019 г. (JD2458634) показало с учетом межзвездного поглощения света звезды $J_0 = 7^m54$, $H_0 = 6^m41$ и $(J - H)_0 = 1^m13$. Поскольку у звезды нормальный блеск в полосе J равен $J_0 = 6^m59$ (Таранова и Шенаврн, 2013), изменение интегральной оптической толщи в полосе J составило всего около одной звездной величины.

Через 108 дней (JD2458738) наши наблюдения показали $J_0 = 10^m43$, $H_0 = 8^m33$, $(J - H)_0 = 2^m10$. Такое изменение интегрального блеска могло бы быть достаточным условием для оценки роста оптической толщи пыли в полосе J за 108 дней, равной $\Delta\tau(J) = A_\lambda/0.912 = (10.43 - 7.54)/0.912 = 3.10$. Однако вокруг этой даты в оптике наблюдались минимум (пульсационный?) блеска звезды в полосах V , R_C , I_C и четкое поглубление показателя цвета $B - V$ — сама звезда могла иметь свой минимальный блеск, поэтому было бы неправильным использовать значение интегрального блеска в полосе J в эту дату для вычисления оптической толщи.

Падение блеска в ИК-диапазоне продолжалось до конца 2020 г., однако в полосе J объект стал для нас недоступен, поэтому мы перешли в диапазон KL для оценки оптической толщи к концу 2020 г. Диаграмма цвет—блеск ($K - L$) — K (рис. 9) демонстрирует характер ослабления блеска и увеличения показателя цвета в 2019—2020 гг. (JD2458630—2459199). Линейная аппроксимация данных приводит к выражению: $\Delta K = (1.81 \pm 0.36)\Delta(K - L)$. Коэффициент корреляции составляет 0.98. Для нормального закона межзвездного поглощения в ИК-диапазоне (Курниев, 1983) $\Delta K = 2.0\Delta(K - L)$, т.е. наклоны линий регрессии нормального закона межзвездного поглощения и наблюдаемой зависимости в пределах ошибок совпадают. На основании этого можно сделать вывод, что по своим оптическим свойствам пылинки в новой пылевой оболочке FG Sge близки к межзвездным.

В полосе K за интервал 569 дней (JD2458630—2459199) блеск упал на 3^m66 , что дает увеличение оптической толщи пыли в полосе K на $\Delta\tau(K) = A_\lambda/0.912 = 3.66/0.912 = 4.0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные здесь фотометрические наблюдения FG Sge, выполненные нами в 2008—2021 гг. в оптическом диапазоне и ближней ИК-области в 2013—2021 гг., подтвердили продолжающуюся активность звезды после начала сброса пылевой оболочки в 1992 г. и характер формирования и эволюции пыли.

В 2010—2018 гг. звезда в полосе V была слабее 16^m , а в B — невидимой до 2019 г., тогда как в

полосах R_C и I_C наблюдались два заметных максимума блеска. В начале 2019 г. звезда испытала кратковременное просветление пылевой оболочки, что привело к повышению блеска до $V = 13^m2$ и $B = 16^m2$. Затем последовали сброс очередной пылевой структуры и довольно быстрое ослабление блеска звезды во всем наблюдаемом диапазоне длин волн. Звезда оставалась видимой в течение 75 ночей в B , 93 ночей в V и 206 ночей в R_C , после чего в очередной раз стала недоступна для наблюдений на наших телескопах в этих фотометрических полосах. Использование, начиная с 2019 г., нового телескопа RC600 и современной ПЗС-камеры позволило увеличить предельную величину наблюдений в полосе I_C . В результате мы получили данные в этой фотометрической полосе в глубоком минимуме блеска вплоть до конца 2021 г. и зафиксировали блеск звезды в 2020—2021 гг. в пределах 18^m1 — 18^m5 .

Следует отметить, что на спуске блеска в 2019 г. появилось четкое поглубление показателя цвета $B - V$. Подобное явление наблюдалось неоднократно во время глубоких минимумов блеска, описанных, в частности, в работах Архиповой и др. (1994, 2003, 2009). Такой эффект характерен для глубоких минимумов звезд типа R CrB, а также является важной особенностью молодых переменных звезд типа UX Ori. В настоящее время это явление объясняется усилением вклада излучения звезды, рассеянного околозвездной пылью. Такая модель впервые была предложена Грининым (1988) для объяснения поглубления в глубоких минимумах блеска двух молодых неправильных переменных звезд UX Ori и WW Vul и была подтверждена наблюдениями линейной поляризации звезд типа UX Ori. Опираясь на нее, Пугач (1991) предложил феноменологическую модель глубоких ослаблений блеска звезды R CrB, которая правильно описывала не только форму треков показателей цвета на диаграммах цвет—величина, но и направление движения звезды по этим трекам.

По распределению энергии в спектре FG Sge перед спуском в глубокий минимум 2019 г. получены параметры пылевой оболочки для даты JD2458630: размер пылевых частиц $a = 0.01$ мкм, температура пыли на внутреннем крае $T_{\text{dust}} = 900$ К, оптическая толщина $\tau(K) = 0.5$ ($\tau(V) = 4.5$), масса пыли в оболочке $M_{\text{dust}} = 7 \times 10^{-5} M_\odot$.

Отличительной особенностью оболочки, сформированной в 2019 г., стала ее чрезвычайно большая оптическая толщина. Впервые за все время наблюдений FG Sge в фазе сброса пылевых оболочек (после 1992 г.) звезда показала значительное ослабление блеска и в среднем ИК-диапазоне

(полосы L и M). Мы предположили сценарий, качественно объясняющий наблюдаемое ослабление блеска. Для того чтобы не привнести дополнительного излучения в рассматриваемом диапазоне длин волн, эта новая пылевая структура должна быть оптически толстой даже для собственного излучения в ближнем ИК-диапазоне. В этом случае уже существующая оболочка, лишившись источника нагрева, также снизит температуру, и максимум ее излучения переместится в средний ИК-диапазон. Увеличение оптической толщи при этом привело к падению блеска звезды во всем наблюдаемом нами диапазоне длин волн. С первой даты наблюдений 2019 г. до конца 2020 г. (569 дней) оптическая толщина в полосе K возросла на $\Delta\tau(K) \sim 4.0$.

В заключение хотелось бы обратить внимание на новую оценку расстояния до FG Sge, полученную по результатам Gaia EDR3 (Браун и др., 2021). В работе Байлера-Джонса и др. (2021) она составляет $D = 2278_{-748}^{+1475}$ пк. С этим расстоянием средняя светимость звезды в эпоху до начала пылевых выбросов в 1992 г. получается равной $\lg L/L_{\odot} = 3.44$, если использовать среднее значение $V = 9^m.2$ для 1991 г. из работы Архиповой и др. (2003) и избыток цвета FG Sge $E(B - V) = 0^m.4$ (Архипова, 1988). Блеск звезды в полосе V в пульсационном максимуме 1991 г. дает светимость FG Sge на $0^m.3$ выше: $\lg L/L_{\odot} = 3.74$. Наши оценки светимости FG Sge, полученные с использованием параллакса звезды из EDR3, согласуются с принятыми в работе Фадеева (2019).

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Работа одного из соавторов (СЮШ) поддержана грантами Академии наук Словакии VEGA 2/0030/21 и APVV-20-0148.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипова В.П., Переменные звезды **22**, 631 (1988).
- Архипова В.П., Зайцева Г.В., Иконникова Н.П., Носкова Р.И., Шугаров С.Ю., Письма в Астрон. журн. **20**, 916 (1994).
- Архипова В.П., Зайцева Г.В., Иконникова Н.П., Носкова Р.И., Шугаров С.Ю., Письма в Астрон. журн. **22**, 836 (1996) [V.P. Arkhipova, et al., Astron. Lett **22**, 750 (1996)].
- Архипова В.П., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Носкова Р.И., Шугаров С.Ю., Есипов В.Ф., Письма в Астрон. журн. **29**, 858 (2003) [V.P. Arkhipova, et al., Astron. Lett **29**, 763 (2003)].
- Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Шугаров С.Ю., Письма в Астрон. журн. **35**, 592 (2009) [V.P. Arkhipova, et al., Astron. Lett **35**, 534 (2009)].
- Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau et al.), Astron. J. **161**, 147 (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) [L.N. Berdnikov et al., Astron. Rep. **64**, 310 (2020)].
- Бессель (M.S. Bessell), Publ. Astron. Soc. Pacific **91**, 589 (1979).
- Бессель и др. (M.S. Bessell, F. Castelli, and P. Planesas), Astron. Astrophys. **333**, 231 (1998).
- Браун и др. (A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al. (Gaia Collab.)), Astron. Astrophys. **649**, A1 (2021).
- Вудвард и др. (C.E. Woodward, G.F. Lawrence, F.D. Gehrz, et al.), Astrophys. J. **408**, 37, (1993).
- Гринин В.П., Письма в Астрон. журн. **14**, 65 (1988).
- Гонсалес и др. (G. Gonzalez, D.L. Lambert, G. Wallerstein, N.K. Rao, V.V. Smith, and J.K. McCarthy), Astrophys. J. Suppl. Ser. **114**, 133 (1998).
- Иган и др. (M.P. Egan, C.M. Leung, and G.F. Spagna), Comput. Phys. Comm. **48**, 271 (1988).
- Курниф (J. Koornneef), Astron. Astrophys. **128**, 84 (1983).
- Пугач А.Ф., Астрон. журн. **68**, 122 (1991).
- Розенбуш А.Е., Ефимов Ю.С., Астрофизика **58**, 46 (2015).
- Страйжис В.Л., *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Мокслас, 1977).
- Таранова О.Г., Шенаврин В.И., Астрон. журн. **79**, 1118 (2002).
- Таранова О.Г., Шенаврин В.И., Письма в Астрон. журн. **39**, 867 (2013) [O.G. Taranova and V.I. Shenavrin, Astron. Lett. **39**, 781 (2013)].
- Татарников А.М., Юдин Б.Ф., Письма в Астрон. журн. **24**, 359 (1998) [A.M. Tatarnikov and B.F. Yudin, Astron. Lett. **24**, 303 (1998)].
- Татарников А.М., Шенаврин В.И., Юдин Б.Ф., Астрон. журн. **75**, 428 (1998).
- Фадеев Ю.А. Письма в Астрон. журн., **45**, 706 (2019) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. **45**, 655 (2019)].
- Цветков и др. (D.Yu. Tsvetkov, A.A. Volnova, A.P. Shulga, S.A. Korotkiy, A. Elmhamdi, I.J. Danziger, and M.V. Ereshko), Astron. Astrophys. **460**, 769 (2006).
- Шевалье, Иловайский (C. Chevalier and S.A. Iovaisky), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **90**, 225 (1991).
- Шенаврин В.И., Таранова О.Г., Наджип А.Э., Астрон. журн. **88**, 34 (2011).