

Наблюдения FG Стрелы в 1967–70 гг.

В. П. Архипова

Фотоэлектрические наблюдения FG Стрелы проводились в системе, близкой к U, B, V, в 1967–70 гг. Отмечено дальнейшее увеличение блеска в системе V звезды и ее покраснение. В 1969 г. наблюдалась вспышка с максимальной амплитудой в области U. Ее можно интерпретировать как увеличение температуры звезды во время вспышки примерно на 2000° . По спектрограммам FG Sge, полученным с объективной призмой в ноябре 1969 и сентябре 1970 г, спектр звезды оценивается как F2 и F6–F8 соответственно. Спектрофотометрическая температура с учетом межзвездного поглощения света составляет 9900° в 1969 и 7700° в 1970 г. Эффективная температура в 1970 г. равна 6300° . Перемещение FG Стрелы на двухцветной диаграмме U–B, B–V продолжалось в 1967–70 гг. примерно вдоль линии сверхгигантов.

Observations of FG Sagittae in 1967–70

by V. P. Arhipova

The photoelectric UBV observations of FG Sge were made during 1967–70. Further brightening (in the visual) and reddening of the star is emphasized. In 1969 was observed the flare with maximum range in the U-region. This may be interpreted as the increase of the star temperature of about 2000° . The spectral type of FG Sge was F2 on the low-dispersion spectrograms taken in November 1969, and F6–F8 in September 1970. The measured spectrophotometric temperature after correction for interstellar reddening was $9900^{\circ} \pm 500^{\circ}$ and $7700^{\circ} \pm 500^{\circ}$ in 1969 and 1970, respectively. The effective temperature was 6300° in 1970. The drift of the star on the two-colour diagram U–B, B–V continues nearly along the supergiant-line; the positions of FG Sge are in accordance with its spectral classes in 1969 and 1970.

На Крымской станции ГАИИ в октябре 1967 г. были начаты фотоэлектрические наблюдения уникальной переменной FG Стрелы (377.1943 Sge), являющейся ядром планетарной туманности He 1–5.

Наблюдения проводились в системе, близкой к U, B, V, при помощи автоматизированного электрофотометра, установленного в кассегренев-

ском фокусе 48-см (а в 1969 г. — 60 см) параболического рефлектора. Преимущественно использовалась диафрагма 26", иногда применялась 13" диафрагма. Наблюдения состояли в записи отсчетов фототока по схеме: $c_{\text{var}} - c_{\text{var}} - c_{\text{с}} - c_{\text{с}}$ и т. д., где c и $c_{\text{с}}$ — основная и контрольная звезды сравнения. Данные о звездах сравнения приводятся в табл. 1

Таблица 1

Звезда сравнения	Sp	V	B-V	U-B
HD 191946 = a	B9	8 ^m .52	-0 ^m .03	-0 ^m .44
j	A0	9.34	+0.02	+0.01

Звезда j, служившая при наших наблюдениях контрольной, используется в качестве звезды сравнения при наблюдениях FG Sge в Зоннебергской обсерватории [1]. Ее величины V, B-V и U-B определены Венцелем и Фюртигом, спектральный класс оценен нами по спектрограмме, полученной в 1969 г. Спектральный класс HD 191946 взят из HD и подтвержден нашей классификацией, величины V, B-V, U-B определены при наших наблюдениях. Звезда имеет несколько необычный для B9 показатель цвета U-B.

Инструментальные разности блеска переменной и звезды сравнения исправлялись за селективное поглощение света в земной атмосфере. Поправка за различие воздушных масс не вводилась, т. к. она мала. Инструментальные разности Δv , $\Delta(b-v)$ и $\Delta(u-b)$ были приведены к системе U, B, V при помощи следующих соотношений, полученных по наблюдениям Плеяд:

$$\Delta V = \Delta v - 0.067 \Delta(b-v), \quad \Delta(B-V) = 1.045 \Delta(b-v), \quad \Delta(U-B) = 0.957 \Delta(u-b).$$

При наблюдениях с диафрагмой 26" блеск FG Sge измерялся вместе со спутником 13^m, расположенным на расстоянии 8" от нее, и частью туманности He I-5. Измерения с малой диафрагмой позволяют оценить вклад излучения спутника и туманности. По нашим измерениям вклад излучения спутника η равен 0^m.022 в V, 0^m.010 в B и 0^m.007 в U, что практически совпадает с оценкой, полученной Венцелем и Фюртигом.

Вклад туманности с $d=26''$ оценен в предположении, что туманность является диском равномерной яркости. С $d=26''$ вклад излучения туманности составляет:

$$0^m.031 \text{ в V, } 0^m.019 \text{ в B, } 0^m.030 \text{ в U.}$$

Таким образом, общий вклад туманности He I-5 и спутника FG Sge при измерениях блеска FG Sge с диафрагмой 26" равен

$$\text{в V } 0^m.05, \text{ в B } 0^m.03, \text{ в U } 0^m.04.$$

Зная долю излучения туманности с $d=26''$, можно вычислить интегральную величину туманности (V_{neb}). Так как для ядра $V_{\text{я}} = 8^m.9$, $V_{\text{neb}} - V_{\text{я}} = 3^m.8$, то $V_{\text{neb}} = 12^m.7$, что дает поверхностную яркость в системе V 11^m.2 с 1^с или 12^m.2 с 1^с в B. Ошибка определения интегральной

величины и поверхностной яркости туманности этим способом составляет $\pm 0^m.4$, если считать, что величины η известны с точностью ± 0.01 .

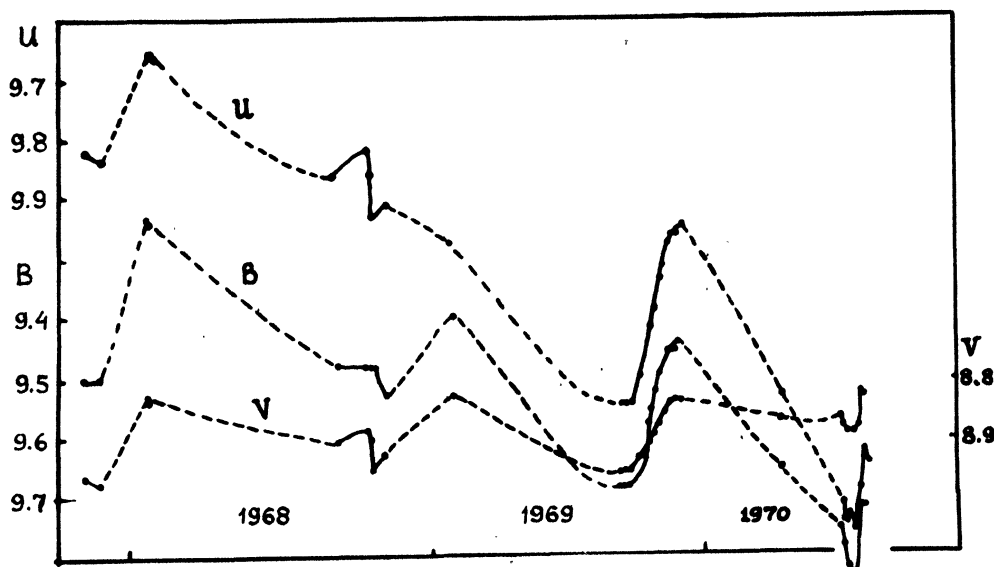


Рис.1

Все наблюдения FG Sge, полученные на Крымской станции ГАИШ, показаны на рис. 1. В табл. 2 приводятся даты наблюдений, число наблюдений звезды за ночь и средние значения за ночь V, B-V и U-B.

Наблюдения в августе 1968 г. проводились М. В. Савельевой при помощи фотометра АФМ-6, система которого может слегка отличаться от фотометрической системы, использовавшейся нами. Редукционные формулы, связывающие инструментальную систему АФМ-6 со стандартной U, B, V, для этого сезона не определялись, поэтому нельзя исключить небольших систематических различий между наблюдениями, проведенными при помощи АФМ-6 и автоматического фотометра. Наблюдения в августе 1969 г. выполнены также М. В. Савельевой, но уже в системе, использованной нами.

На рис. 2 приводятся средние значения блеска FG Sge за каждый сезон наблюдений в 1967-70 гг. и предшествующие средние величины блеска звезды по систематическим наблюдениям Венцеля и Фюртига в 1962-66 гг., а также отдельные фотоэлектрические наблюдения различных авторов (см. [2]). Средняя скорость возрастания блеска FG Sge в 1960-70 гг., как и раньше [3], составляет около $0^m.07$ в год в системе V. Очень четко выражено систематическое увеличение показателей цвета звезды, связанное с изменением ее спектра в направлении все более поздних спектральных классов.

О характере неправильных изменений блеска FG Sge

Все наблюдатели FG Sge отмечают присутствие неправильных вариаций блеска в пределах до $0^m.5$ и продолжительностью от нескольких суток до 100^d .

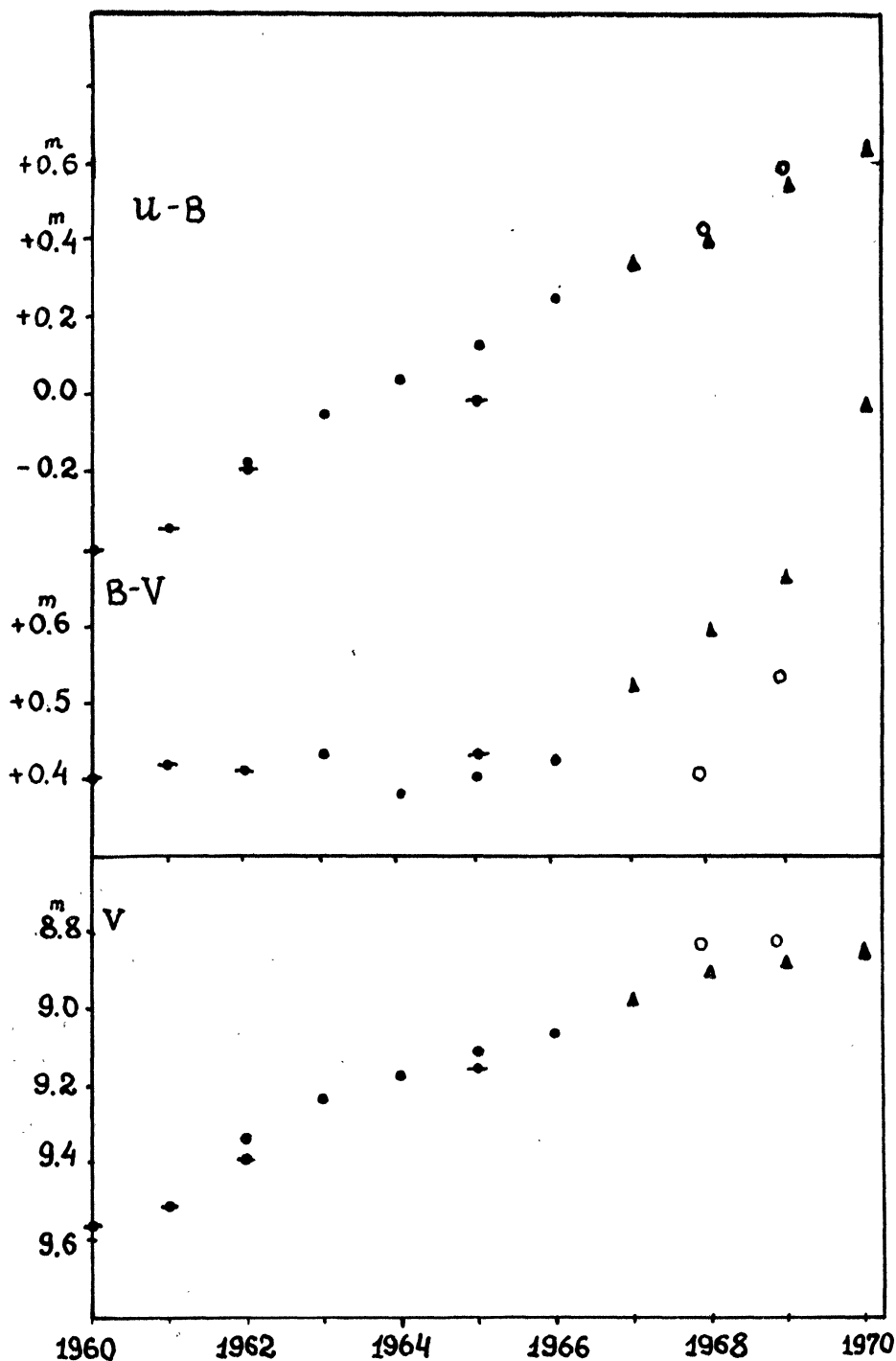


Рис.2. • Венцель и Фюртиг; ▲ Архипова; ○ Савельева ; ◆ оценки различных авторов [2].

Наиболее детальные данные о характере этих вариаций получены в результате длительных систематических наблюдений GG Sge в Зоннебергской обсерватории [1]. Авторы [1] отмечают следующие характерные черты этих флуктуаций:

1. Изменения продолжительностью 10–20 дней с амплитудой $0^m.1 - -0^m.3$ в области V,
 2. Присутствие двух компонентов короткопериодических колебаний: с максимальной амплитудой в области V и вспышек, наиболее ярко выраженных в лучах B и U. Первые обычны, тогда как вторые нечасты,
 3. Показатель цвета B–V минимален в моменты максимума блеска,
 4. Наблюдается смещение фаз между кривыми вспышек в U, B и V.
- Начало подъема в U и максимум блеска происходит по времени раньше, чем в V.

Венцель и Фюртиг полагают, что вспышки сопровождаются повышением температуры, в результате чего уменьшается показатель цвета B–V. Звезда при повышении блеска сжимается, а блеск растет за счет увеличения поверхностной яркости звезды. Затем наступает расширение, при котором температура падает и показатель цвета B–V увеличивается.

Наблюдения FG Sge на Крымской станции ГАИШ в 1967–68 гг. [4] не обнаружили таких изменений. Частично это обусловлено малым числом наблюдений, но частично, по-видимому, и более спокойным периодом фотометрического поведения звезды. Наблюдения, проведенные в октябре 1969 г. в исключительно благоприятных атмосферных условиях, показали, что блеск звезды менялся в довольно значительных пределах. Кривая блеска для октября 1969 г. представлена на рис. 3. Из-

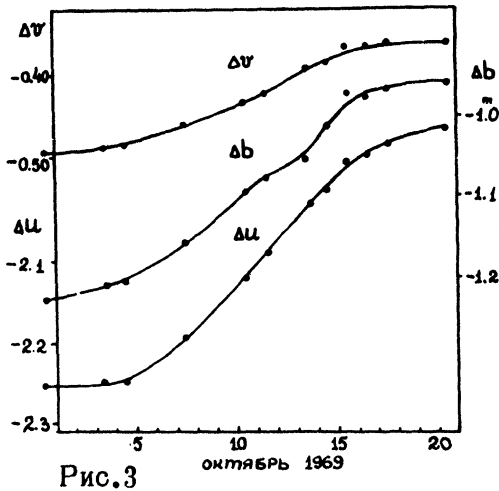


Рис.3

менение скорости возрастания блеска после 15 октября, очевидно, указывает, что звезда приближалась к относительному максимуму блеска. Аналогично можно допустить, что в начале октября блеск звезды был около минимума. Наблюдаемое изменение блеска составляло $0^m.14$ в v, $0^m.26$ в b, $0^m.32$ в u (в инструментальной системе). В силу этого можно считать, что здесь наблюдалась вспышка второго типа по Венцелю и Фюртигу. Амплитуда изменения показателя цвета b–v составляет $0^m.12$, u–b – $0^m.07$. Макси-

муму блеска соответствовало минимальное значение b–v, т. е. вспышка связана с увеличением температуры звезды.

Таблица 2

дата наблюдения	J.D. 24...	n	V	B–V	U–B
18–19 окт. 1967	39773	1	$8^m.97$	$+0^m.53$	$+0^m.32$
25–26 окт.	790	7	$8^m.98$	0.52	0.34

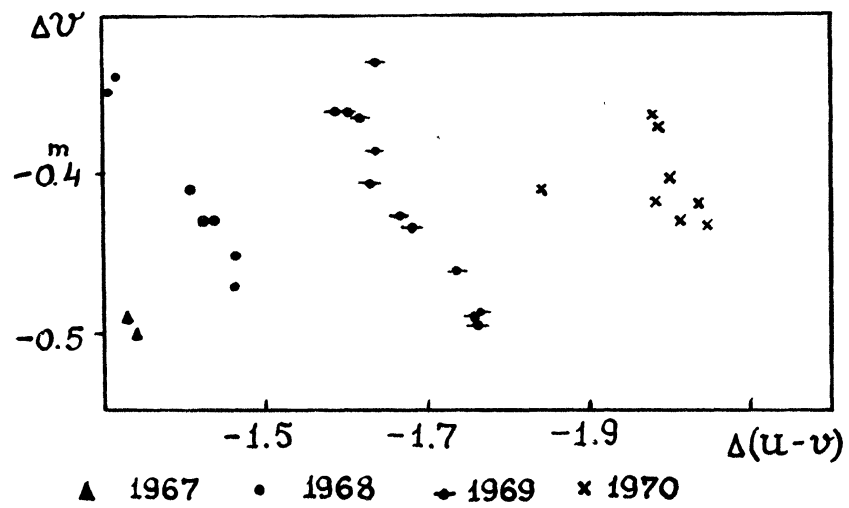
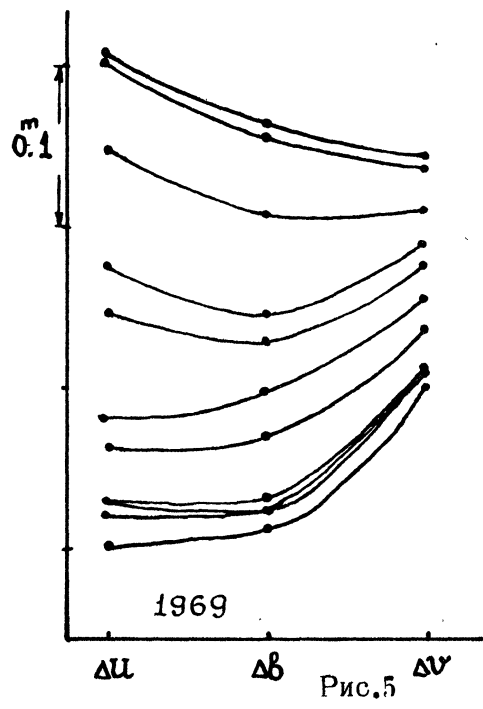
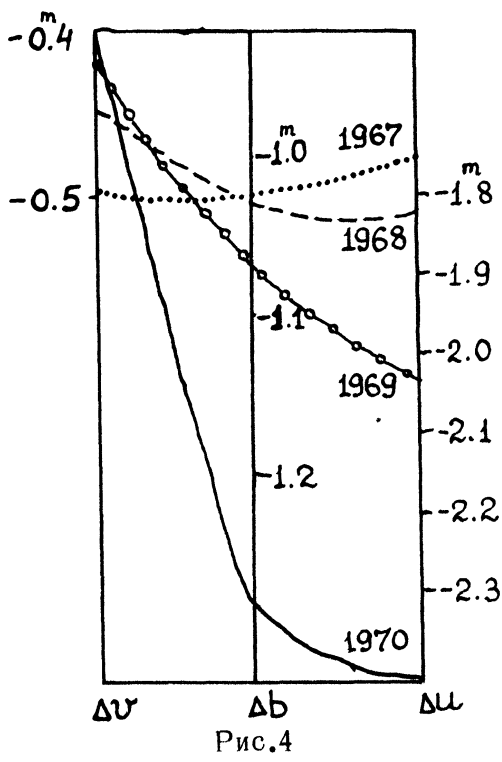
Таблица 2
(продолжение)

Дата наблюдения	J.D.24...	n	V	B-V	U-B
11-12 авг. 1968	40081	4	8 ^m .93	+0 ^m .41	+0 ^m .42
12-13 авг.	082	10	8 .84	0 .39	0 .42
15-16 окт.	146	11	8 .91	0 .57	0 .38
23-24 окт.	154	1	8 .89	0 .59	0 .34
26-27 окт.	157	3	8 .91	0 .57	0 .38
27-28 окт.	158	6	8 .96	0 .52	0 .45
1- 2 нояб.	163	15	8 .93	0 .60	0 .38
4- 5 авг. 1969	439	5	8 .83	0 .56	0 .58
30- 1 окт.	496	17	8 .96	0 .72	0 .56
3- 4 окт.	499	9	8 .96	0 .72	0 .56
4- 5 окт.	500	10	8 .96	0 .72	0 .56
7- 8 окт.	503	4	8 .93	0 .70	0 .56
10-11 окт.	506	8	8 .91	0 .66	0 .54
11-12 окт.	507	8	8 .90	0 .65	0 .53
13-14 окт.	509	3	8 .88	0 .64	0 .51
14-15 окт.	510	7	8 .86	0 .63	0 .52
15-16 окт.	511	5	8 .84	0 .61	0 .52
16-17 окт.	512	5	8 .84	0 .61	0 .51
17-18 окт.	513	3	8 .84	0 .61	0 .51
20-21 окт.	516	6	8 .84	0 .60	0 .50
9-10 авг. 1970	809	5	8 .87	0 .78	0 .58
27-28 сент.	858	2	8 .86	0 .89	0 .64
29-30 сент.	860	6	8 .88	0 .90	0 .66
30- 1 окт.	861	5	8 .89	0 .93	0 .61
1- 2 окт.	862	8	8 .89	0 .94	0 .63
8- 9 окт.	869	1	8 .88	0 .83	0 .67
10-11 окт.	871	6	8 .82	0 .89	0 .61
11-12 окт.	872	8	8 .83	0 .88	0 .63

Изменение распределения энергии в спектре FG Sge

Трехцветные наблюдения FG Sge позволяют проследить изменения распределения энергии в ее спектре. На рис. 4 представлены изменения блеска переменной по отношению к звезде сравнения α за период наших наблюдений 1967-70 гг. С течением времени блеск FG Sge систематически растет в области V и весьма значительно падает в области U. В результате распределение энергии в спектре соответствует все более красной звезде. Отдельные флуктуации кривой распределения энергии в течение сезона наблюдений можно видеть на рис. 5.

Перемещение FG Sge на диаграмме величина-показатель цвета видно на рис. 6, где наряду со средними за сезон представлены также индивидуальные значения за каждую ночь наблюдений. На рис. 6 четко вы-



деляются две противоположных тенденции: 1. общее вековое увеличение яркости звезды, сопровождаемое систематическим покраснением, 2. увеличение блеска типа вспышек, связанное с уменьшением показателя цвета. Это указывает на два различных механизма изменений блеска FG Sge. Один, связанный с эволюцией спектра звезды от ранней В (или, может быть, О) к Г, состоит, по-видимому, в том, что звезда выбрасы-

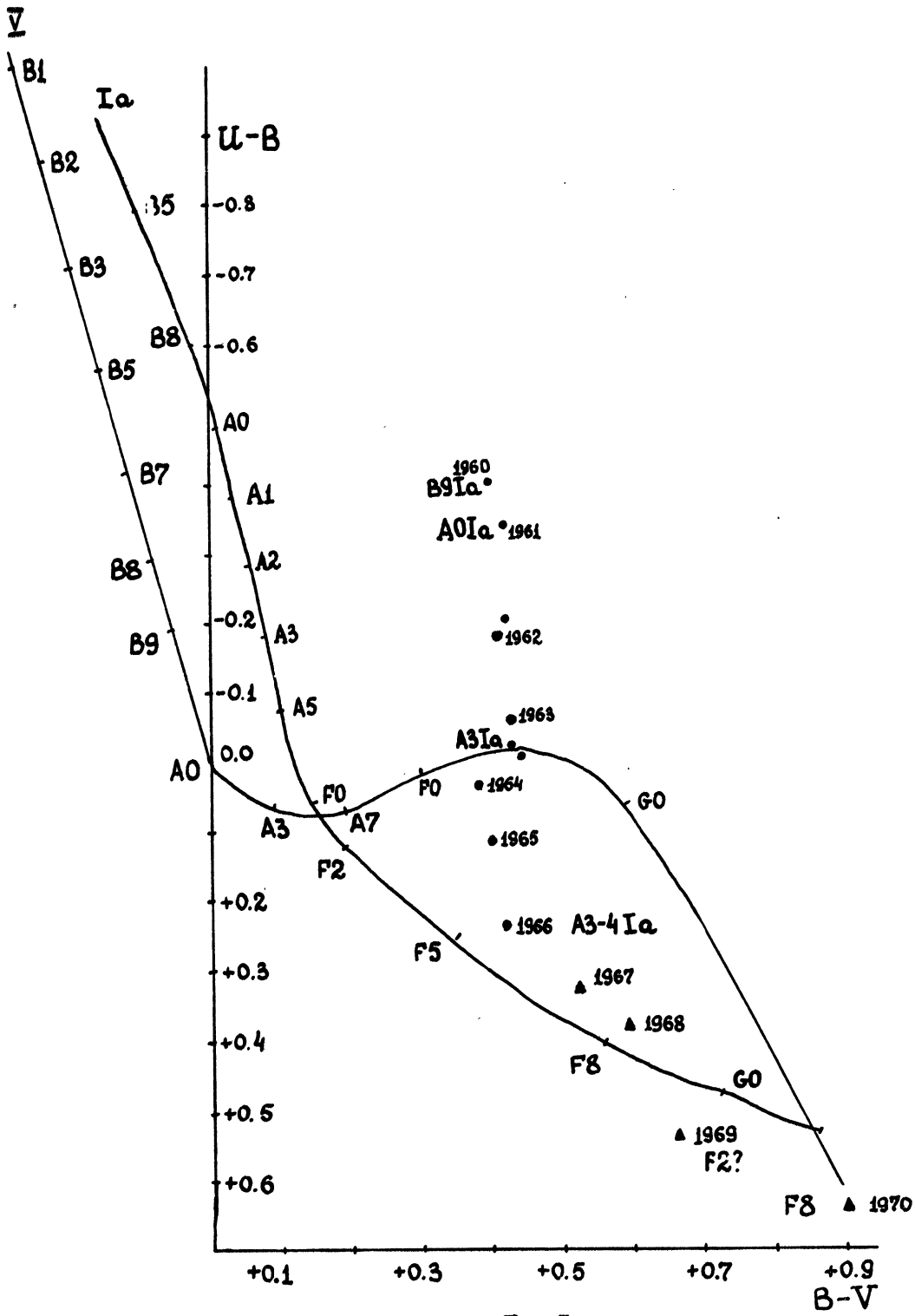


Рис.7

вает оболочку [2], которая, будучи оптически толстой, играет роль расширяющейся фотосферы звезды и ответственна за прогрессивное изменение блеска и спектра. Расширение фотосферы вызывает систематическое повышение блеска из-за увеличения светящейся поверхности, а падение температуры приводит к образованию все более позднего спектра, что и наблюдается на протяжении последних 15 лет. Однако, как показали расчеты Хербига и Боярчука, звезда, по-видимому, увеличивает свою светимость также и за счет взаимодействия движущейся оболочки с веществом, выбрасываемым до сих пор центральной звездой.

В результате систематического уменьшения температуры FG Sge перемещается на двухцветной диаграмме вниз и вправо (рис. 7), примерно параллельно линии сверхгигантов.

О втором механизме, связанном с неправильными вариациями блеска FG Sge, уже говорилось о предыдущем разделе. Можно рассчитать величину изменения температуры звезды при таких вариациях. В частности, для октября 1969 г. можно воспользоваться приводимыми ниже данными о распределении энергии в непрерывном спектре FG Sge. Считая в нормальном состоянии блеска излучение звезды планковским со спектротометрической температурой в области $\lambda\lambda 4000-6000$ $T \approx 10000^\circ$ (см. ниже), и зная изменения блеска при вспышке в фильтрах В и V, мы получили спектротометрическую температуру звезды при вспышке, которая составляет около 12300° . В области U амплитуда изменения блеска, равная $0^m.33$, также может быть согласована с этим изменением температуры, если использовать значение бальмеровского скачка для сверхгигантов F0 Ia, приводимое Алленом [5]. Таким образом, все изменение блеска, наблюдавшееся в октябре 1969 г., можно интерпретировать как следствие повышения температуры звезды примерно на 2000° за ~ 20 дней.

Распределение энергии в непрерывном спектре и спектротометрическая температура FG Sge в 1969 году

Две спектрограммы FG Sge были получены на Крымской станции ГАИИ 12–13 ноября 1969 г. при помощи 50-см камеры Максудова и 7° объективной призмы, дающей дисперсию $190\text{Å}/\text{мм}$ у Н γ . Фотографирование производилось на пластинках Kodak OaD с экспозициями 18^m и 3.2^m . Расширение спектров 0.32 мм .

Для определения спектротометрического градиента FG Sge были использованы следующие звезды сравнения: HD 191946 и j, служащие в качестве звезд сравнения при оценках блеска переменной, и HD 192498 спектрального класса A2(9 $^{m.0}$).

Записи всех спектров в почернениях были получены на саморегистрирующем микрофотометре и затем по обычной методике переведены в интенсивности. Для измерения непрерывного спектра проводилось интерполирование уровня континуума над наиболее сильными линиями поглощения. Измерения охватывали область $\lambda\lambda 3800-5200$, где было выбрано 15 точек. По двум пластинкам относительный спектротометри-

ческий градиент относительно каждой звезды сравнения j , HD 191946 и HD 192498 равен: 0.94 ± 0.02 , 0.87 ± 0.11 и 1.06 соответственно. Абсолютный спектрофотометрический градиент звезд сравнения принят согласно их спектральному классу, так как поглощение света для них мало и незначительно влияет на абсолютный градиент. Так, для самой слабой звезды j $E(B-V) = 0^m.02$ и $A_V = 0^m.06$, что дает увеличение градиента всего на 0.03 .

Итак, если принять, что $\Phi_j = 1.00$, $\Phi(191946) = 0.96$, $\Phi(192498) = 1.06$ [6], то с учетом весов

$$\Phi(FG Sge) = 1.93 \pm 0.07.$$

Приведенная ошибка представляет собой среднюю арифметическую ошибку сходимости $\Phi(FG Sge)$ по разным звездам сравнения и не учитывает неопределенности в принятых значениях их абсолютных градиентов.

Избыток цвета для FG Sge, полученный по двухцветной диаграмме, составляет [1] $E(B-V) = 0^m.3$, тогда поправка к градиенту за поглощение света [7] равна 0.41 .

Исправленный за межзвездное поглощение света абсолютный спектрофотометрический градиент FG Sge в области $\lambda\lambda 5200-3800$, $\lambda^{-1} = 2.34$, равен

$$\Phi_0 = 1.52 \pm 0.07 \text{ и } T = 9900^\circ \pm 500^\circ,$$

что, согласно новой калибровке шкалы спектрофотометрических градиентов для сверхгигантов, проведенной Ардеббергом [6], соответствует звезде класса светимости Ia в спектральном интервале F0-F2. Учет межзвездного поглощения света звезд сравнения, которым мы пренебрегаем, может лишь несколько увеличить значение Φ_0 , не изменяя, однако, приписываемого спектрального класса.

Положение FG Sge на двухцветной диаграмме B-V, U-B, исправленное за межзвездное поглощение света в предположении нормального закона поглощения, также показывает, что в конце 1969 г. звезда имела спектр сверхгиганта около F0.

По нашей просьбе Т. А. Уранова определила спектральный класс FG Sge на основе критериев спектральной классификации, разработанных для спектров, полученных с указанным выше инструментом. Он оказался в пределах F0-F5. Присутствие слабой полосы G указывает спектр F5-F6, тогда как по линии K и водороду спектр ближе к F0. Регистрограмма спектра в почернениях приводится на рис. 8.

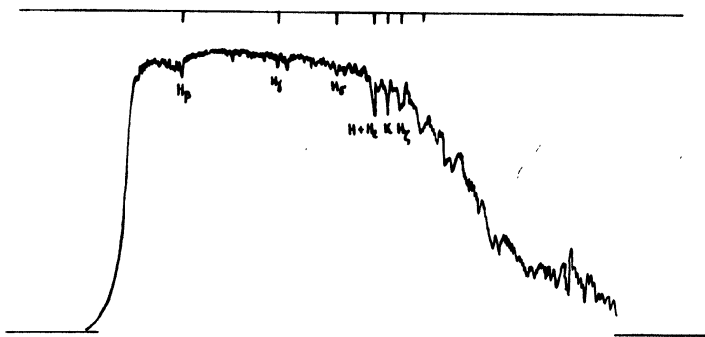


Рис.8

Распределение энергии в непрерывном спектре и температура FG Стрелы в 1970 году

В сентябре 1970 г. при помощи уже упоминавшейся выше 50-см ме-
нисксовой камеры Крымской станции ГАИШ были получены 3 спектрограм-
мы FG Sge в области $\lambda\lambda 3700-6500$ (использовались пластинки ORWO
НР-22). Применяя описанную выше методику обработки, мы получили
следующие значения относительного спектрофотометрического градиен-
та FG Sge: относительно HD 191946 $\Phi = 1.50$, относительно j $\Phi = 1.29$
и относительно HD 191947 $\Phi = 1.52$. Принимая абсолютные спектрофото-
метрические градиенты звезд сравнения для $\lambda 5000 \text{ \AA}$ $\Phi(j) = 1.10$,
 $\Phi(\text{HD 191946}) = 1.00$, $\Phi(\text{HD 191947}) = 1.10$, получим наблюдаемый абсо-
лютный градиент FG Sge в 1970 г.

$$\Phi(\text{FG Sge}) = 2.46 \pm 0.13$$

и исправленный за межзвездное поглощение света $\Phi_0 = 1.91$, чему соот-
ветствует температура $T = 7700^\circ \pm 500^\circ$. Согласно калибровке Арде-
берга [6], эту температуру имеют сверхгиганты Ia спектрального
класса F6.

Спектральная классификация FG Sge в 1970 г., проведенная нами
по линиям, дает спектр F6-F8. В спектре звезды присутствуют абсорб-
ционные линии водорода, H и K Ca II, полоса G, линии D Na I.

Таблица 3

Абсолютное распределение энергии в непрерывном
спектре FG Стрелы в 1969 и 1970 г.

λ	$\lg F_{\lambda} + C$ наблюдаемое		$\lg F_{\lambda}^0 + C$ исправленное за поглощение	
	1969	1970	1969	1970
6250		1.55		1.45
5910		1.60		1.52
5670		1.64		1.58
5470		1.62		1.58
5290		1.63		1.65
5200	1.56	1.66	1.53	1.63
4960	1.61	1.67	1.60	1.66
4820	1.64	1.71	1.64	1.71
4690	1.61	1.70	1.63	1.72
4570	1.64	1.67	1.67	1.70
4460	1.62	1.66	1.67	1.71
4350	1.65	1.65	1.71	1.71
4270	1.66	1.64	1.73	1.71
4190	1.65	1.59	1.73	1.67
4110	1.64	1.62	1.72	1.70
4040	1.61	1.60	1.70	1.69
3970	1.63	1.57	1.74	1.68
3900	1.68	1.66	1.79	1.77
3850	1.69		1.81	
3790	1.68		1.80	

Положение FG Sge на двухцветной диаграмме с учетом межзвездного поглощения света также указывает спектральный класс около F8.

Нами было получено также абсолютное распределение энергии в непрерывном спектре звезды. При этом мы принимали, что распределение энергии в спектре звезды сравнения j спектрального класса A0 совпадает со "средней" кривой распределения энергии звезд A0, выведенной в [8]. На рис. 9 и в табл. 3 приводится ход величины абсолютно-го монохроматического потока FG Sge с длиной волны в 1969 и 1970 гг.

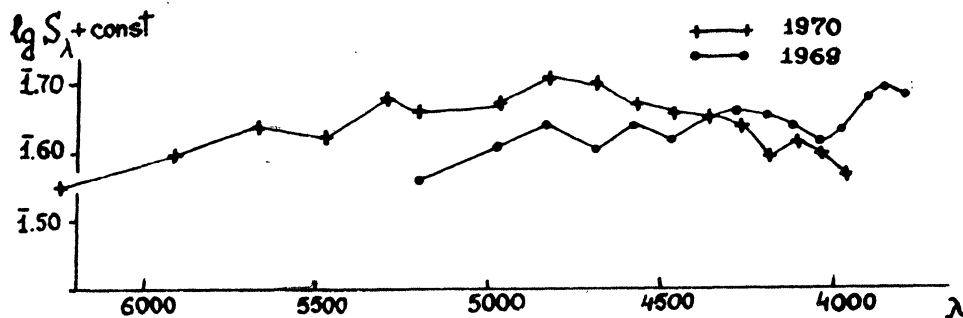


Рис. 9

По положению максимума излучения на кривой 1970 г., исправленной за поглощение света в пространстве, можно определить эффективную температуру звезды. Так как $\lambda_{\max} \approx 4600$, то $T_e = 6300^\circ$, что в шкале эффективных температур сверхгигантов, приводимой Джонсоном [9], соответствует спектральному классу F7.

Таким образом, распределение энергии в непрерывном спектре, спектральный класс, определенный по линиям, и положение FG Sge на диаграмме U-B, B-V показывают, что в конце 1970 г. звезда имела спектр F позднего подкласса.

Итак, за последние 15 лет FG Sge из звезды B4 превратилась в звезду F. Дальнейшую эволюцию звезды, по-видимому, трудно предсказывать с какой-либо достоверностью. Необходимы дальнейшие систематические наблюдения блеска и спектра этой удивительной переменной.

В заключение выражаю глубокую благодарность М. В. Савельевой, предоставившей свои наблюдения блеска FG Sge в августе 1968 и 1969 гг. и Т. А. Урановой за спектральную классификацию звезды в 1969 г.

Литература:

1. W. Wenzel, W. Fürtig, Sterne 43, 19, 1967.
2. G. H. Herbig, A. A. Boyarchuk, ApJ 153, 397, 1968.
3. G. Richter, AN 285, 274, 1960.
4. В. П. Архипова, АЖ 45, 1312, 1968.
5. К. У. Аллен, Астрофизические величины, ИИЛ, Москва, 1960, перев. с англ.
6. A. Ardeberg, Astron. and Astrophys. 3, 257, 1969.
7. В. П. Архипова, АЖ 40, 71, 1963.
8. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. Б. Костякова, О. Д. Докучаева, В. П. Архипова, АЖ 42, 730, 1965.
9. H. L. Johnson. Bol. Ton. y Tac. №25, 305, 1964.

Гос. астрономический ин-т им. П. К. Штернберга

Январь, 1970 г.