

А7



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

им. П.К. ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи

А.Е.Василювский

ЗВЕЗДЫ ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ  
ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ В РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Диссертация написана на русском языке

Специальность 01.031 – Астрофизика

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА • 1972

A7

Работа выполнена в Уральском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете им. А.М.Горького.

Научный руководитель - профессор К.А.Бархатова

Официальные оппоненты:

Доктор физ.-мат. наук, действ. член АН Груз. ССР Е.К.Харадзе

(Абастуманская астрофизич. обсерват. АН Груз.ССР)

Кандидат физ.-мат. наук Ю.Н.Ефремов (Астросовет АН СССР)

Оппонирующая организация - Специальная астрофизическая обсерватория  
АН СССР

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1972 г.

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1972 г.

на заседании Ученого Совета Государственного Астрономического института им. П.К.Штернберга при МГУ (Москва, Университетский проспект, 13)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ГАИШ

канд. ф.м.н.

Л.Н.Бондаренко

Красные гиганты, т.е. звёзды поздних спектральных классов (G,K,M) высокой светимости, являются весьма интересными объектами звёздного мира. Насыщенные линиями и полосами поглощения спектры, высокие светимости и, как следствие высоких светимостей, видимое обилие на небе - всё это делает красные гиганты весьма доступными и удобными объектами для изучения строения, происхождения и развития Галактики. Тем не менее, интенсивное исследование этих звёзд началось лишь около 20 лет назад. За эти годы получено много наблюдательных данных о физических и пространственно-кинематических характеристиках красных гигантов, построены модели атмосфер и фотосфер, рассчитаны пути эволюции этих звёзд.

Накопленные наблюдательные данные и теоретические расчёты требуют обобщения, дополнения и сопоставления. В этом плане особенно важны сведения о красных гигантах, членах звёздных группировок, так как для них возможно точное определение таких важных характеристик, как светимость, стадия эволюции, возраст. Кроме того, диаграммы цвет-светимость звёздных скоплений являются основным критерием правильности теории звёздной эволюции, в частности, эволюции красных гигантов.

Реферируемая работа посвящена уточнению особенностей химического состава красных гигантов, членов звёздных группировок, в зависимости от эволюционных и пространственных характеристик скоплений, а также изучению закономерностей распределения гигантов на диаграммах цвет-величина и цвет-цвет рассеянных скоплений.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, приложений и заключения.

Во введении кратко охарактеризовано состояние проблемы и дана предварительная постановка задачи.

В первой главе, представляющей обзор литературных данных, да-

ётся обобщение фотометрических, спектральных и пространственно-кинематических характеристик красных гигантов, особенностей их химического состава. В главе рассмотрены также вопросы переменности красных гигантов. Заключительный раздел главы посвящён проблеме связи звёзд-гигантов с рассеянными звёздными скоплениями. В конце раздела поставлены задачи исследования: определение содержания металлов у возможно большего числа красных гигантов, членов звёздных группировок, с целью уточнения особенностей химического состава звёзд плоской составляющей Галактики, а также изучение особенностей распределения красных звёзд высокой светимости на диаграммах цвет-величина скоплений, выявление эволюционных связей между различными фотометрическими характеристиками красных гигантов.

Во второй главе приведены результаты определения относительного содержания металлов у красных гигантов, членов рассеянных звёздных скоплений и динамических групп. Для пяти скоплений относительные содержания железа  $[Fe/H]$  были найдены на основе спектрограмм, полученных автором в 1968-1969 гг. на 70-см менисковом телескопе Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузинской ССР. Программа наблюдений включала получение спектров красных гигантов, членов звёздных скоплений, красных гигантов с известным отношением  $[Fe/H]$  и звёзд с известным распределением энергии в спектре.

На основе полученных относительных распределений энергии в спектрах 22 гигантов с известным содержанием металлов были разработаны критерии химического состава, определяемые формулами:

$$\mu_1 = m(4048) - \frac{1}{2} [m(4080) - m(4016)], \quad (1)$$

$$\mu_2 = m(4148) - \frac{1}{2} [m(4221) - m(4080)], \quad (2)$$

$$\mu_3 = m(4184) - m(4221) + \frac{1}{4} [m(4221) - m(4080)], \quad (3)$$

где  $m(\lambda)$  — квазимонохроматическая звёздная величина. Методом наименьших квадратов были получены эмпирические формулы, связывающие исправленные за показатель цвета величины  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , а также величину  $\mu_3$ , которая в первом приближении не зависит от температуры звёзд в интервале спектральных классов G5 — K5, с относительным содержанием железа  $[Fe/H]$ :

$$\mu_1 = 0.14 \cdot \exp(0.60 [Fe/H]) - 0.04, \quad (4)$$

$$\mu_2 = 0.20 \cdot \exp(2.15 [Fe/H]), \quad (5)$$

$$\mu_3 = 0.22 \cdot \exp(1.40 [Fe/H]). \quad (6)$$

Точность определения содержания металлов по формулам (4), (5) и (6) в области  $[Fe/H] > -1$  оказалась равной соответственно  $\pm 0.20$ ,  $\pm 0.11$  и  $\pm 0.13$ . По формулам (4), (5) и (6) были найдены значения  $[Fe/H]$  для членов скоплений NGC 752, NGC 1662, NGC 2281, NGC 6633 и IC 4756. Средние величины  $[Fe/H]$  для указанных скоплений приведены в табл. I.

Таблица I

| NGC     | $[Fe/H]$ | Число звёзд | Группа | $[Fe/H]$ | Число звёзд | NGC  | $[Fe/H]$ | Число звёзд |
|---------|----------|-------------|--------|----------|-------------|------|----------|-------------|
| 752     | -0.30    | 7           | Плеяды | -0.05    | 5           | 2287 | -0.30    | 3           |
| 1662    | -0.25    | 2           | U Ma   | -0.10    | 9           | 2632 | -0.10    | 4           |
| 2281    | +0.05    | 2           | б Pup  | -0.40    | 7           | 2682 | -0.15    | 10          |
| 6633    | -0.20    | 4           | ζ Her  | -0.10    | 5           | 6705 | +0.20    | 4           |
| IC 4756 | -0.25    | 7           | 61 Cyg | -0.10    | 3           |      |          |             |
|         |          |             | ε Ind  | -0.05    | 3           |      |          |             |

Относительные содержания металлов для красных гигантов, членов динамических групп (средняя часть табл. I), были определены по опубликованным данным о фотоэлектрических циановых показателях  $\tau(CN)$  [I]. Возможность использования полос циана для определения  $[Fe/H]$  была обоснована в I главе диссертации. Калибровка показателя  $\tau(CN)$  в зависимости от  $[Fe/H]$ , выполненная по 27 звёздам, привела к сле-

дущей эмпирической формуле:

$$r(\text{CN}) = 0,30 \cdot \exp(1,25 [\text{Fe}/\text{H}]) + 2,00, \quad (7)$$

где  $r(\text{CN})$  — исправленный за цвет звезды циановый показатель. Точность формулы (7) — порядка  $6 [\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,20$ . Средние значения  $[\text{Fe}/\text{H}]$  для динамических групп, полученные с привлечением опубликованных данных о химическом составе некоторых членов этих групп, приведены в средней части табл. I.

Относительные содержания железа для красных гигантов, членов ещё четырёх скоплений, были вычислены по формулам из работы Г. Хелфера [2] на основе опубликованных данных о показателях цвета (B-V), (U-B) и (V-I) этих звёзд. Результаты приведены в правой части табл. I.

На основе полученных в диссертации (а также опубликованных в печати) данных о содержании тяжёлых элементов у членов звёздных группировок были сделаны следующие выводы:

1) Объекты плоской и сферической составляющих Галактики резко различаются по содержанию металлов; в среднем в 25 раз.

2) Объекты плоской составляющей имеют примерно одинаковый химический состав ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,12 \pm 0,11$ ), хотя некоторые различия в содержании металлов вполне реальны, но не зависят ни от возраста, ни от положения этих объектов в Галактике.

Третья глава диссертации посвящена изучению особенностей распределения красных гигантов на диаграммах цвет-светимость рассеянных звёздных скоплений. Основное внимание в главе уделено калибровке в функции возраста средних абсолютных величин и показателей цвета гигантов, образующих на диаграммах цвет-светимость чёткие концентрации. Так как всякую калибровку необходимо проводить на однородном материале, в работе заново были определены такие характеристики скоплений, как возрасты, избытки цвета и модули рассто-

яния.

В первом разделе III главы описана методика построения теоретической диаграммы  $M_V - (B-V)_0$  для скоплений различного возраста на основе расчётов эволюции звёзд. При построении этой диаграммы предложено не пользоваться болометрическими поправками, которые в настоящее время определены неуверенно, а пользоваться кривыми эволюционного уклонения  $\lg T_e - \Delta M_{\ell, \ell}$ , пересчитанными при помощи шкалы эффективных температур в координаты  $(B-V)_0 - \Delta M_{\ell, \ell}$ , и эмпирической главной последовательности нулевого возраста (НГП). Известно, что при небольшом различии в светимостях болометрические поправки звёзд являются функциями только температуры. Иными словами, с большой степенью точности можно принять  $\Delta M_{\ell, \ell} = \Delta M_V$ . Теперь, имея эволюционные кривые  $(B-V)_0 - \Delta M_V$  и НГП, легко построить теоретические главные последовательности скоплений различного возраста.

Начальная главная последовательность была построена в работе заново, поскольку имеется ряд указаний на ненадёжность ранее определённых параметров НГП. При построении этой последовательности использовалось известное положение о почти полной идентичности кривых эволюционного уклонения для скоплений весьма широкого интервала возрастов. В соответствии со сказанным, НГП определялась как линия, по отношению к которой эволюционные кривые ряда скоплений (Плеяды, M 41, NCC 2281, Гиалды и Ясли) оказываются наиболее близкими между собой. Параметры полученной таким образом НГП приведены в табл. 2.

Таблица 2

| $(B-V)_0$          | $M_V$               | $(B-V)_0$          | $M_V$               | $(B-V)_0$          | $M_V$               |
|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| -0 <sup>m</sup> .2 | -0 <sup>m</sup> .30 | +0 <sup>m</sup> .2 | +2 <sup>m</sup> .40 | +0 <sup>m</sup> .6 | +4 <sup>m</sup> .75 |
| -0.1               | +0.90               | +0.3               | +2.90               | +0.7               | +5.30               |
| 0.0                | +1.55               | +0.4               | +3.45               | +0.8               | +5.85               |
| +0.1               | +2.00               | +0.5               | +4.10               | +0.9               | +6.30               |

Теоретические главные последовательности в реферируемой работе были построены с использованием опубликованных в печати эволюционных расчётов для звёзд начального химического состава  $X=0.67$ ,  $Z=0.03$ .

Для определения возрастов рассеянных звёздных скоплений в диссертации предложено использовать исправленный за покраснение показатель цвета некоторой точки главной последовательности скопления при фиксированной абсолютной величине  $M_V$ . Этот показатель  $(B-V)_M$ , как оказалось, практически линейно связан с возрастом скопления, т.е.

$$t_M = a + b(B-V)_M \quad (8)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$ , полученные из теоретической диаграммы  $(B-V)_0 - M_V$  для ряда фиксированных значений  $M_V$ , приведены в табл.3. При усреднении отдельных значений возраста необходимо учитывать веса, указанные в последнем столбце таблицы. Точность (внутренняя) определения возрастов скоплений по формулам (8) порядка 3-4%.

Таблица 3

| $M_V$ | $a$   | $b$   | Вес |
|-------|-------|-------|-----|
| $0^m$ | +0.33 | 1.80  | 100 |
| +1    | +0.24 | 2.65  | 50  |
| +2    | -0.58 | 5.80  | 10  |
| +3    | -6.05 | 19.00 | 1   |

По формулам (8) были определены возрасты 35 скоплений, содержащих гиганты

Модули расстояния рассеянных звёздных скоплений определялись методом кривых эволюционного уклонения, причём для большинства объектов были переопределены избытки цвета.

Для калибровки абсолютных величин и показателей цвета центров концентраций красных гигантов были отобраны 33 скопления. Путём

усреднения индивидуальных значений  $V$ ,  $B-V$  и  $U-B$  красных гигантов, входящих в концентрации, были получены звёздные величины  $V_K$  и показатели цвета  $(B-V)_K$  и  $(U-B)_K$  центров концентраций гигантов для этих 33 скоплений.

Для вычисления истинных показателей цвета и абсолютных величин центров концентраций необходимо было найти избытки цвета красных гигантов. Для этой цели, во-первых, было заново определено положение линии нормальных цветов гигантов плоской составляющей на двухцветной диаграмме и, во-вторых, были найдены наклоны линий покраснения для этих звёзд. Линия нормальных цветов определялась на основе опубликованных фотометрических данных о всех гигантах ярче  $V = +5^m.5$ , имеющих  $B-V > +0^m.8$ . Гиганты были отобраны по пространственным скоростям. Кроме того, был проведён учёт межзвёздного покраснения по формуле среднего поглощения. Полученные параметры линии нормальных цветов приведены в табл.4.

Таблица 4

| $(B-V)_0$ | $(U-B)_0$ | $(B-V)_0$ | $(U-B)_0$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $0^m.82$  | $0^m.46$  | $1^m.29$  | $1^m.43$  |
| 0.92      | 0.65      | 1.41      | 1.62      |
| 1.01      | 0.84      | 1.54      | 1.82      |
| 1.10      | 1.03      | 1.58      | 1.92      |
| 1.19      | 1.22      |           |           |

Наклоны линий покраснения для красных гигантов были найдены при помощи показателей цвета  $(B-V)_K$  и  $(U-B)_K$  центров концентраций 20 скоплений. Скопления были разбиты на три группы по возрасту. Поправки показателей  $(B-V)_K$  и  $(U-B)_K$  за некоторые различия возрастов внутри каждой группы определялись по приближённым зависимостям  $(B-V)_{K,0}$  и  $(U-B)_{K,0}$  от возраста скоплений, выведенным по скоплениям с надёжной фотометрией и малыми избытками цвета. В табл.5 приведены наклоны ли-

ний покраснения  $\tau$ , найденные по показателям  $(B-V)_K$  и  $(U-B)_K$ , а также теоретические значения этих наклонов по А.Ажусенису и В.Страйжису [3].

Таблица 5

| Группа | Число скопл. | $(B-V)_{K,0}$      | Спектр             | $\tau$      | $\tau_{\text{теор}}$ |
|--------|--------------|--------------------|--------------------|-------------|----------------------|
| I      | 15           | 0 <sup>m</sup> .95 | G8 III             | 0.94 ± 0.04 | 0.90                 |
| II     | 3            | 1.08               | K0 II              | 0.93        | 0.94                 |
| III    | 2            | (1.69)             | M1 Ia <sup>b</sup> | 1.11        | 1.11                 |

При помощи полученных данных о положении линии нормальных цветов и о наклонах линий покраснения красных гигантов были определены избытки цвета этих звезд в скоплениях. Найденные избытки, как оказалось, незначительно отличаются от избытков цвета звезд главной последовательности.

После исправления величин  $V_K$ ,  $(B-V)_K$  и  $(U-B)_K$  за межзвездное покраснение и перевода  $V_{K,0}$  в  $M_K$ , были построены зависимости абсолютных величин и показателей цвета центров концентраций от возраста скоплений. В качестве возрастной характеристики использовалась ширина пробела Герцшпрунга, определяемая в данном случае выражением:

$$q = (B-V)_K - (B-V)_T, \quad (9)$$

где  $(B-V)_T$  — минимальный показатель цвета главной последовательности скопления. Очевидно, что величина  $q$  почти на подвержена влиянию межзвездного покраснения.

Методом наименьших квадратов были получены следующие эмпирические формулы для связи  $M_K$ ,  $(B-V)_{K,0}$  и  $(U-B)_{K,0}$  с величиной  $q$ :

$$M_K = 4^m.3 - 5.0 \cdot q, \quad (10)$$

$$(B-V)_{K,0} = 0^m.87 - 0.10 \cdot q + 0.27 \cdot q^2, \quad (11)$$

$$(U-B)_{K,0} = 0^m.41 + 0.18 \cdot q + 0.31 \cdot q^2, \quad (12)$$

Дисперсии соотношений (10), (11) и (12) равны соответственно ±0<sup>m</sup>.4,

±0<sup>m</sup>.03 и ±0.07. Таким образом, полученные формулы (10) и (11) позволяют определять избытки цвета и модули расстояния богатых гигантами рассеянных звездных скоплений по двухцветной фотометрии BV.

В последнем разделе II главы дан анализ особенностей ветвей гигантов рассеянных скоплений. Показано, что вряд ли можно рассматривать концентрации гигантов как аналог горизонтальных ветвей шаровых скоплений [4].

В третьей главе диссертации приводятся методика и результаты построения полуэмпирической функции светимости для красных гигантов поля, находящихся в стадии "концентрации". Функция светимости была построена при помощи формулы:

$$(M_K) = v_m(M_K) \cdot f(t) \cdot [\Psi(M_T + m + \Delta) - \Psi(M_T + \delta)] \cdot \left| \frac{dt(M_K)}{dM_K} \right|, \quad (13)$$

где  $v_m$  — отношение числа гигантов, образующих концентрацию, к числу звезд главной последовательности в интервале абсолютных величин  $M_T \div (M_T + m)$ ,  $M_T$  — абсолютная величина точки поворота,  $m$  — фиксированная величина (в реферируемой работе  $m = 2^m$ ),  $\Psi(M)$  — начальная интегральная функция светимости,  $\Delta$  и  $\delta$  — изменения абсолютной величины звезды в процессе эволюции от НПП до  $M_T$  и  $M_T + m$  соответственно,  $f(t)$  — функция скорости звездообразования. Весьма удобным для расчетов оказалось то обстоятельство, что в пределах ошибок  $M_T = M_K$ . Величины поправок  $\Delta$  и  $\delta$  были определены по опубликованным эволюционным трекам.

Таблица 6

| $M_K$              | $\Psi(M_K)$ | $M_K$             | $\Psi(M_K)$ | $M_K$              | $\Psi(M_K)$ |
|--------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|
| -2 <sup>m</sup> .0 | 1           | 0 <sup>m</sup> .0 | 23          | +2 <sup>m</sup> .0 | 98          |
| -1.5               | 2           | +0.5              | 45          | +2.5               | 100         |
| -1.0               | 5           | +1.0              | 69          | +3.0               | 96          |
| -0.5               | 12          | +1.5              | 88          | +3.5               | 78:         |

В таблице 6 приведена вычисленная функция светимости  $\Psi(M_r)$ . Сравнение этой функции с наблюдаемой  $\Psi(M)$  для гигантов в окрестностях Солнца показало, что, по крайней мере, в течение последних 2-2.5 миллиардов лет скорость звездообразования в Галактике не менялась. Сказать что-либо об этой скорости на более ранних этапах существования Галактики не представляется возможным из-за ненадёжности эмпирических функций светимости красных гигантов в области слабых абсолютных величин.

В Заключении диссертации приведены основные выводы и дан анализ результатов работы.

В Приложениях даны список спектрограмм, использованных для определения содержания металлов у красных гигантов, членов пяти рассеянных звёздных скоплений, таблицы распределений энергии в спектрах звёзд с известным содержанием железа и звёзд, членов скоплений, таблица нормальных точек главных последовательностей 42 рассеянных звёздных скоплений, значения  $(B-V)_M$  и  $t_M$  для 35 скоплений и др.

Подводя итог, можно перечислить следующие основные результаты и выводы работы:

1. Разработаны критерии определения содержания металлов у красных гигантов классов G5-K5 по спектрограммам с малой дисперсией.
2. Сделан вывод о постоянстве и независимости от возраста и положения в Галактике химического состава объектов плоской составляющей.
3. Дан способ построения теоретической диаграммы цвет-светимость по эволюционным трекам для скоплений различного возраста без привлечения болометрических поправок.
4. Определены по новой методике параметры начальной главной последовательности.
5. Предложен параметр  $(B-V)_M$  для определения возрастов рассея-

ных звёздных скоплений.

6. Определено положение линии нормальных цветов и найдены наклоны линий покраснения для красных гигантов.

7. Проведена калибровка абсолютных величин и показателей цвета центров концентраций красных гигантов в функции возраста, что позволит находить модули расстояния и избытки цвета богатых гигантами рассеянных скоплений по двухцветной фотометрии.

8. Из факта наличия концентраций гигантов на диаграммах цвет-величина рассеянных звёздных скоплений сделан вывод о существовании в жизни звёзд двух этапов медленной эволюции: стадии главной последовательности и стадии "концентрации".

9. Построена полуэмпирическая функция светимости красных гигантов, находящихся в стадии "концентрации". Сравнение этой функции с наблюдаемым распределением гигантов поля по светимостям показало, что, по крайней мере, в течение последних 2-2.5 миллиардов лет скорость звездообразования в Галактике не менялась.

Отдельные главы диссертации докладывались на Советании Рабочей группы по спектральной классификации Комиссии звёздной астрономии Астрономического совета АН СССР в декабре 1969 г. в Абастумани и на Юбилейной научной конференции, посвящённой 50-летию Уральского государственного университета в 1970 г. Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. К.А. Бархатова, А.Е. Василевский, Переменные звезды, 16, 191, 1967.
2. А.Е. Василевский, Астрон. циркуляр № 478, 1968.
3. А.Е. Василевский, Астрон. журнал, 46, 616, 1969.
4. А.Е. Василевский, Астрон. циркуляр, № 598, 1970.
5. А.Е. Василевский, Астрон. циркуляр, № 631, 1971.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. Griffin, R. Redman, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 120, 287, 1960.
2. H. Helfer, *Astron. J.*, 74, 1155, 1969.
3. А. Ажусенис, В. Стрэйжис, *Бюлл. Вильн. обс.*, № 18, 3, 1966.
4. R. Cannon, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 150, III, 1970.
5. К. А. Бархатова, А. Е. Василевский, *Переменные звезды*, 16, 191, 1967.
6. А. Е. Василевский, *Астрон. циркуляр*, № 478, 1968.
7. А. Е. Василевский, *Астрон. журнал*, 46, 616, 1969.
8. А. Е. Василевский, *Астрон. циркуляр*, № 598, 1970.
9. А. Е. Василевский, *Астрон. циркуляр*, № 631, 1971.
10. А. Е. Василевский, *Астрон. журнал*, в печати.
11. А. Е. Василевский, *Астрон. циркуляр*, в печати.
12. А. Е. Василевский, *Бюлл. Абастуманск. обс.*, в печати.

ПОДП. К ПЕЧАТИ 24/1-72 Г. Л-53019. Ф. 80x80/18  
ФИЗ.ПЛ. 0,75. ЗАКАЗ 1085. ТИРАЖ 200 ЭКЗ.

ОТПЕЧАТАНО НА РОТАПРИНТАХ В ТИП. ИЗД. МГУ  
МОСКВА, ЛЕНГОРЫ

