

УДК 524.3

**НАРИМАН ИСМАИЛОВ¹, САБАХАДДИН АЛЫШОВ¹,
УЛЬВИ ВЕЛИЕВ², ФАИДА ГУСЕЙНОВА²**

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРАХ ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ФОТОМЕТРИИ

В представленной работе изложен метод построения распределения энергии в спектрах звезд в спектральном диапазоне 0,36-100 мкм. Для этого были использованы результаты многоцветных фотометрических наблюдений UBVIJHKL, а также данные каталогов WISE и IRAS. Приводятся в простом виде методы трансформации величины потока в единой системе единиц. В доступном виде приведены значения потоков фотометрического нуль-пункта для систем рассматриваемых каталогов. Показаны примеры кривых распределения энергии в спектрах для разного типа звезд.

Ключевые слова: спектр звезд, распределения энергии в спектрах, фотометрические наблюдения, космические объекты, многоцветная фотометрия.

В практической астрофизике представляет интерес построение распределение энергии в спектрах (РЭС) исследуемых космических объектов. Известно, что, например, звезды, обладающие околозвездным газопылевым диском, имеют значительное инфракрасное (ИК) излучение в ближней и дальней ИК области спектра. К таким объектам можно отнести звезды типа Т Тельца, Ae/Be Хербига, Be звезды, разные типы пекулярных галактик с активными ядрами, и т.д. Характер излучения околозвездного диска в ИК части спектра может дать исчерпывающую информацию о физике и строении околозвездных дисков у названных объектов. К тому же, изучение распределения энергии (РЭ) в спектрах молодых звезд является одним из важных методов исследований таких объектов. Это позволяет исследовать характер излучения околозвездных дисков, оценить их физические параметры и процессы формирования планет в околозвездных дисках на ранней стадии эволюции звезд.

Существуют разные методы построения РЭС у космических объектов в зависимости от наблюдательного материала, на основании которого выполняется такая работа. Один из методов построения РЭС основан на данных наблюдений многоцветной фотометрии. В настоящей работе мы будем подробно излагать метод построения РЭС у молодых звезд на основании данных международной широкополосной UBVIJHKLM фотометрии. Кроме того, для более широкого ИК диапазона можно использовать данные каталогов *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE) [1] и *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS) [2], о которых мы будем писать ниже.

Многоцветная фотометрическая система. Многоцветная фотометрическая система UBVIJHKLM формировалась на базе классической системы UBV Джонсона [3], и далее, с развитием технологии производства светоприемников в ИК части спектра, была дополнена разными фильтрами, которые позволяют охватывать диапазон длин волн $\lambda \sim 0,36\text{--}34$ мкм. Мы не будем подробно останавливаться на характеристиках данной фотометрической системы и только представим методику, по которой мы строили кривые РЭС. В табл. 1 приведены эффективные длины волн разных полос в микронах и адаптированные абсолютные потоки излучения звезды нулевой величины спектраль-

ного класса A0V. Как видно, с применением этих фильтров можно покрыть область спектра 0,36-34 мкм. Кроме того, в зависимости от задачи исследования, с привлечением архивных наблюдательных данных разных космических миссий этот диапазон можно значительно расширить.

Принцип построения РЭС у разных объектов на основании звездных величин, полученных в разных полосах широкополосной фотометрии, состоит в переводе имеющихся звездных величин m_λ в абсолютные потоки F_λ по известному выражению

$$F_\lambda = F_0 \cdot 10^{-0,4(m_\lambda - m_0)} \quad (1)$$

Здесь F_0 – адаптированный поток излучения для нуль-пункта системы, когда m_0 принимается равным нулю. Привязка обычно выполняется к адаптированному абсолютному потоку излучения стандартной звезды A0V нулевой величины во всех полосах излучения [4]. Таким стандартом с определенным приближением может быть и звезда Вега.

Таблица 1
Потоки излучения от звезды A0V в разных полосах системы Джонсона.
Ниже приведены характеристики систем WISE и IRAS

	λ_0 (мкм)	F_λ (erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹)		λ_0 (мкм)	F_λ (erg s ⁻¹ cm ⁻² Å ⁻¹)
U	0,36	4,22x10 ⁻⁹		L	3,5
B	0,44	6,40x10 ⁻⁹		M	5,0
V	0,55	3,75x10 ⁻⁹		N'	8,4
R	0,71*	1,75x10 ⁻⁹		N	10,4
I	0,97*	8,4x10 ⁻¹⁰		N''	10,7
J	1,25	3,1x10 ⁻¹⁰		O	11,0
H	1,62	1,2x10 ⁻¹⁰		P	12,2
K	2,2	3,3x10 ⁻¹¹		Z	34,0
WISE					
W1	3,4	$8,178 \cdot 10^{-12}$		W3	12
W2	4,6	$2,415 \cdot 10^{-12}$		W4	22
IRAS					
[12]	12		[60]	60	
[25]	25		[100]	100	

Но прежде, чем выполнять эту работу, необходимо знать коэффициент межзвездного покраснения для каждой звезды и полученные звездные величины для каждой фотометрической полосы нужно очищать от межзвездного покраснения. В каталогах часто можно найти коэффициент покраснения в V-полосе Av, или так называемый, избыточный показатель цвета, или колор-эксцесс E(B-V). Колор-эксцесс E(B-V) определяется соотношением

$$E(B-V) = B-V - (B-V)_0 \quad (2)$$

Здесь B-V наблюдаемый показатель цвета звезды, а $(B-V)_0$ показатель цвета стандартной звезды, свободной от межзвездного покраснения, с тем же спектральным классом и классом светимости. Существуют специальные таблицы, составленные по

многочисленным эмпирическим данным, где приведены нормальные показатели цвета для разных спектральных классов звезд (см., например, [2, 5]). Величина межзвездного поглощения A_V определяется выражением

$$A_V = R \cdot E(B-V) \quad (3)$$

Таблица 2

Закон межзвездной экстинкции

λ	$E(\lambda-V)/E(B-V)$	A_λ/A_V	Van de Hulst №15
U	1,64	1,531	1,555
B	1,00	1,324	1,329
V	0,0	1,000	1,000
R	-0,78	0,748	0,738
I	-1,6	0,482	0,469
J	-2,22±0,02	0,282	0,246
H	-2,55±0,03	0,175	0,155
K	-2,744±0,024	0,112	0,0885
L	-2,91±0,03	0,058	0,045
M	-0,302±0,03	0,023	0,033
N	-2,93	0,052	0,013
8	-3,03	0,020±0,003	
8,5	-2,96	0,043±0,006	
9,0	-2,87	0,074±0,011	
9,5	-2,83	0,087±0,013	
10,0	-2,86	0,083±0,012	
10,5	-2,87	0,074±0,011	
11	-2,91	0,060±0,009	
11,5	-2,95	0,047±0,007	
12	-2,98	0,037±0,006	
12,5	-3,00	0,030±0,004	
13	-3,01	0,027±0,004	

Для нормального закона межзвездного поглощения коэффициент $R \sim 3,1$. В пределах длины волны меньше 3,5 мкм закон межзвездного покраснения имеет в основном одинаковый характер [6]. Для определения величины межзвездного поглощения для любой другой длины волны A_λ можно применить формулу

$$A_\lambda/E(B-V) = E(\lambda-V)/E(B-V) + R \quad (4)$$

На участках около 3-5 мкм и при больших длинах волн увеличивается силикатное поглощение, и характер закона распределения межзвездного покраснения усложняется. В табл. 2 приводится величина межзвездной экстинкции для разных длин волн в многоцветной системе для интервала 0,36-13 мкм [7]. Зная величину A_V можно определить A_λ для любой другой длины волны, по отношению A_λ/A_V из табл. 2. Таблица была составлена по обзорным данным авторов [8, 9, 10]. Как видно из табл. 2, уже при $\lambda \geq 1$ мкм величина A_λ становится значительно меньше.

Данные каталога WISE. В табл. 2 приведены эффективные длины волны фотон-

метрических полос системы каталога WISE (NASA). Эффективные длины волн фильтров равны 3,4, 4,6, 12 и 22 мкм (W1, W2, W3, W4). Для точечных источников в неискаженных галактической пылю участках неба чувствительность отдельных полос на уровне 5σ составляет 0,08, 0,11, 1 и 6 mJy, соответственно. В каталоге WISE данные приводятся в звездных величинах, поэтому нужно выполнить трансформацию этих величин в потоки.

Для калибровки нуль-пункта этой системы по абсолютному потоку в веб сайте миссии (https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/expsup/sec4_4h.html#WISEZMA) приводятся следующие коэффициенты для полос 3,4, 4,6, 12 и 22 мкм: $8,178 \cdot 10^{-15} \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, $2,415 \cdot 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$, $6,515 \cdot 10^{-17} \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ и $5,09 \cdot 10^{-18} \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, соответственно. Эти потоки легко выразить в ангстремах, и тогда получим нужные нам коэффициенты нуль-пункта для перехода в абсолютные потоки:

$$\begin{aligned} (F_{W1})_0 &= 8,178 \cdot 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}, \\ (F_{W2})_0 &= 2,415 \cdot 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}, \\ (F_{W3})_0 &= 6,515 \cdot 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}, \\ (F_{W4})_0 &= 5,09 \cdot 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Эти величины также нами приведены в табл. 2.

Таким образом, звездные величины, приведенные в каталоге WISE легко можно перевести в абсолютные потоки.

Данные каталога IRAS. Для дополнения кривых РЭС программных звезд вдалекой ИК части спектра мы использовали фотометрические данные каталога миссии IRAS (США, Англия и Нидерланды), (<https://irsa.ipac.caltech.edu/IRASdocs/iras.html>) приведенные в следующих эффективных длинах волн: 12, 25, 60 и 100 мкм, соответственно. Плотности потока излучения в этих полосах приводятся во внесистемной единице Янских (Jy), поэтому приходится перевести их в более популярную и привычную единицу потока в $\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$.

Для осуществления такого перевода нужно вычислить коэффициенты трансформации для каждой из четырех полос. Поскольку единица Jy в системе СГС выражается частотой следующим соотношением, $1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ sm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, для перевода на длины волны в Å, нужно вычислить поток, соответствующий к единице частоты. Из известного соотношения для элементарного участка длин волн $\delta\lambda$ и частоты $\delta\nu$ можно написать

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \delta\nu = -\frac{c}{\lambda^2} \delta\lambda \Rightarrow \frac{\delta\lambda}{\delta\nu} = -\frac{\lambda^2}{c} \quad (5)$$

После вычисления из выражения (5) величину, приведенную плотность потока в Jy нужно поделить на эту величину. Для полосы $\lambda = 120000 \text{ Å} = 12 \mu\text{m}$ получим

$$\frac{\delta\lambda}{\delta\nu} = -\frac{(1,2 \cdot 10^5 \text{ Å})^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ Å s}^{-1}} = -\frac{1,44 \cdot 10^{10} \text{ Å}^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ Å} \cdot \text{Hz}} = -0,48 \cdot 10^{-8} \text{ Å} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

Тогда получим,

$$1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ sm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} / 0,48 \cdot 10^{-8} \text{ Å} \cdot \text{Hz}^{-1} = 2,08 \cdot 10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1} \quad (6)$$

Сейчас на примере данных звезды HD 33917, мы вычислим потоки во всех полосах ИК области. Нужно просто значение, соответствующее 1 Jy из (6) умножать на величину плотности потока, приведенной в полосе 12 мкм. Из каталога находим, что $F_{12} = 0,252 \text{ Jy} = 5,24 \cdot 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$.

Аналогичные вычисления сделаем для остальных трех полос. Для полосы $\lambda = 25 \mu\text{m} = 250000 \text{ Å}$

$$\frac{\delta\lambda}{\delta\nu} = -\frac{(2,5 \cdot 10^5 \text{ Å})^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ Å Hz}} = -\frac{6,25 \cdot 10^{10} \text{ Å}^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ Hz}} = -2,08 \cdot 10^{-8} \text{ Å} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

$$1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ sm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} / 2,08 \cdot 10^{-8} \text{ Å} \cdot \text{Hz}^{-1} = 4,807 \cdot 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1} \quad (7)$$

и для той же звезды из каталога берем $F_{25} = 0,25$, $\text{Jy} = 1,2 \cdot 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$.

Для двух остальных полос получаем, соответственно, $\lambda = 60 \mu\text{m} = 6 \cdot 10^5 \text{ Å}$

$$\frac{\delta\lambda}{\delta\nu} = -\frac{(6 \cdot 10^5 \text{ Å})^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ Å Hz}} = -\frac{36 \cdot 10^{10} \text{ Å}^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ Hz}} = -12 \cdot 10^{-8} \text{ Å} \cdot \text{Hz}^{-1} = -1,2 \text{ Å} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

$$1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ sm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} / 1,2 \cdot 10^{-7} = 8 \cdot 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1} \quad (8)$$

$$F_{60} = 0,4, \text{ Jy} = 3,2 \cdot 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$$

И наконец, для $\lambda = 100 \mu\text{m} = 10^6 \text{ Å}$

$$1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ sm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} / 3,3310^{-7} \text{ Å Hz}^{-1} = 3 \cdot 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1} \quad (9)$$

$$F_{100} = 5,623, \text{ Jy} = 1,68 \cdot 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$$

Таким образом, в выражениях (6)-(9) мы получили коэффициенты перевода для плотности потока, приведенные в единицах Jy, к единицам $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$. Заметим, что существуют сайты, которые в онлайн режиме могут перевести потоки в желаемую форму единиц (см. например, <https://www.gemini.edu/sciops/instruments/midir-resources/imaging-calibrations/flux-conversion-tool>, и еще <https://www.nebulosousresearch.org/codes/fluxunits>). На последнем сайте можно проверить свои вычисления, чтобы убедится в правильности перевода единиц.

Надо отметить, что данные каталога IRAS искажены определенными факторами, которые значительно влияют на результаты наблюдений (<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>). Особенно сильно искажены данные межзвездной пыли галактики, из-за которых ошибки измерения в разных координатах могут превосходить до 100% самой величины. Для нашей звезды HD 33917 по специальному серверу IRAS мы определили, что искажений в 1998 г. в отдельных полосах достигали от 0,0877 до 0,0935 Jy (см. также [11]), а в 2011 г. от 0,27 до 0,32 Jy (см. также [12]), что практически равно самой измеряемой величине.

На рис.1 для примера приведены кривые РЭС звезд типа AeBe Хербига AB Aur и V380 Ori (верхние панели), а также звезды HD 33917 и HD 35039 (нижние панели). Из панелей a и b хорошо видно избыточное излучение, характерное для молодых звезд Хербига, который объясняется присутствием мощного околозвездного газопылевого диска.

Внизу приведенные кривые РЭС двух звезд в туманности Ориона показали значительное отклонение от нормального распределения, которое можно объяснить искажением из-за излучения туманности Ориона.

Заключение. Таким образом, в работе была детально изложена методика построения кривых РЭС в спектральном диапазоне от 0,36 до 100 мкм. Это позволит изучить распределение потока излучения различных космических объектов, звезд, галактик, и т.д. Работа будет полезна всем научным работникам, которые интересуются таким вопросом.

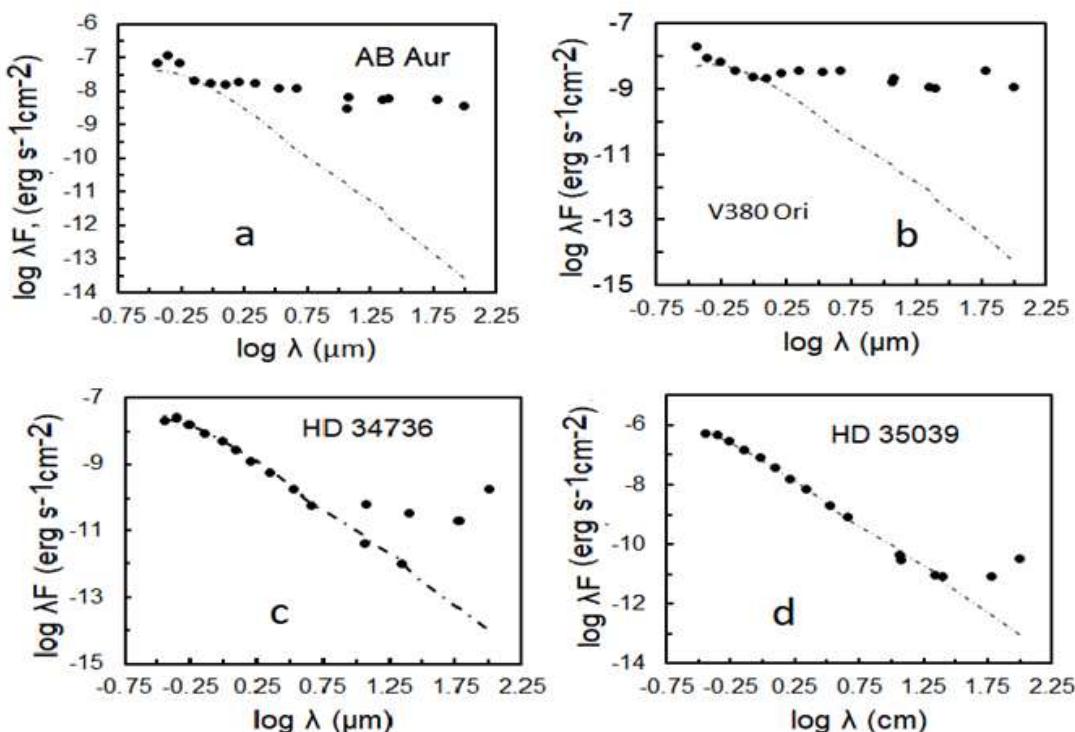


Рис. 1. Примеры кривых РЭС для двух звезд AeBe Хербига (панели а и б) и двух звезд в туманности Ориона (панели с и д). Пунктирной линией показано излучение абсолютно черного тела с той же температурой.

Работа выполнена при поддержке Фонда Развития Науки при Президенте АР (грант № EIF-BGM-4-RFTF- 1/2017-21/07/1).

ЛИТЕРАТУРА

1. SIMBAD-Vizer, 2012yCat.2311, 0C
2. <https://irsa.ipac.caltech.edu/IRASdocs/exp.sup/>
3. Johnson H.L. // ApJ., 1950, v. 112, p. 240.
4. Страйжис В.Л. Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас, 1977, 312 с.
5. İsmayılov N.Z. Praktik astrofizika. Bakı: Bakı Universiteti nəşriyyatı, 2012, 180 s.
6. Savage B.D., Mathis J.D. // Ann. Rev. Astr. Ap., 1979, v. 17, p. 73.
7. Rieke G.H., Lebofsky M.J. // Astrophys. J., 1985, v. 288, p. 618.
8. Nandy K., Thompson G.L. et al. // Astr. Ap., 1976, v. 51, p. 63.

9. Schultz G.V., Wiemer W. // Astr. Ap., 1975, v. 43, p. 133.
10. Hulst H.C. van de // Rech. Astr. Obs. Utrecht, 1949, v. 11, part 2.
11. Schlegel et al. // ApJ., 1998, v. 500, p. 525.
12. Schlafly & Finkbeiner // ApJ, 2011, v. 737, p. 103

¹Шамахинская Астрофизическая Обсерватория
E-mail: ismailovnshao@gmail.com

²Научыванское Отделение НАН Азербайджана
E-mail: veliyev_ulvu@mail.ru

Nəriman İsmayılov, Sabahəddin Alişov, Ülvi Vəliyev, Faidə Hüseynova

**GENİŞZOLAQLI FOTOMETRİYA VERİLƏNLƏRİNƏ GÖRƏ ULDUZ
SPEKTRİNDƏ ENERJİNİN PAYLANMASI ƏYRİLƏRİNİN QURULMASI
METODU**

Məqalədə ulduz spektrində, 0,36-100 mkm spektral diapazonda enerjinin paylanması qurulması metodu şərh edilmişdir. Bunun üçün, UBVRİJHKL çoxrəngli fotometrik müşahidələrin nəticələri habelə, WISE və IRAS kataloq verilənlərindən istifadə olunmuşdur. Eyni vahidlər sistemində sel kəmiyyətlərinin fotometriyası sadə şəkildə istifadə olunmuş, baxılan kataloqların fotometrik sıfır-məntəqələrinin sel kəmiyyətləri, anlaşılan şəkildə verilmişdir. Müxtəlif tip ulduzlar üçün, spektrdə enerjinin paylanması nümunələri göstərilmişdir.

Açar sözlər: ulduz spektri, enerji spektrinin paylanması (ESP), fotometrik müşahidələr, kosmik obyektlər, çoxrəngli fotometriya.

Nariman Ismayilov, Sabahaddin Alyshov, Ulvi Valiyev, Faida Husseinova

**METHOD FOR PLOTTING ENERGY DISTRIBUTION CURVES IN
SPECTRA OF STARS ACCORDING TO BROADBAND PHOTOMETRY DATA**

This paper presents a method for constructing the energy distribution in the spectra of stars in the spectral range of 0,36-100 micron. For this, we used the results of multicolor photometric observations UBVRİJHKL, as well as data from the WISE and IRAS catalogs. Methods for transforming the flow value in a single system of units are presented in a simple form. In an accessible form, the values of the photometric zero-point fluxes are given for the systems of the catalogs under consideration. Examples of spectral energy distribution curves for different types of stars are shown.

Keywords: spectrum of stars, energy distribution in spectra (EDS), photometric observations, space objects, multicolor photometry.

(AMEA-nın müxbir üzvü Namiq Cəlilov tərəfindən təqdim edilmişdir)

**Daxilolma tarixi: İkin variant 26.04.2021
Son variant 16.05. 2021**