

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 2

ДЕКАБРЬ, 1966

ВЫПУСК 4

НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ СЕЛЕКЦИЯ И СТАТИСТИКА ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ СИСТЕМ.

1. УЧЕТ СЕЛЕКЦИИ

Б. И. ФЕСЕНКО

Поступила 13 августа 1966

Для учета наблюдательной селекции в статистике визуально-двойных систем предлагается разбить все системы на группы по значениям двух параметров, не зависящих от расстояния. Первый параметр — разность величин компонентов, второй параметр зависит от видимой величины главной звезды m и от углового разделения компонентов ρ . Показано, что при отсутствии селекции по значениям m и ρ наблюдаемое распределение значений m у систем некоторой группы должно соответствовать равномерному распределению систем в пространстве. Сравнение с этим распределением наблюдаемого распределения, искаженного селекцией, позволяет оценить эффект селекции. Вводится понятие веса системы, определенного так, что сумма весов систем данного типа соответствует числу этих систем в единице объема в окрестности Солнца.

На примере систем с известными спектральными классами или цветами двух компонентов показано, что системы, кратности большей 2, встречаются чаще, чем чистые двойные системы. Это относится к системам, у которых абсолютная величина главного компонента заключена в интервале $-2^m < M < +7^m$.

Результаты статистики с учетом селекции визуально-двойных систем с известными спектральными классами двух компонентов будут изложены во второй части этой работы.

1. *Введение.* В настоящее время принято считать, что компоненты одной двойной системы формируются из вещества с одинаковым химическим составом, причем почти одновременно. Поэтому результаты статистики двойных систем могут быть с удобством использованы для проверки космогонических гипотез.

Среди визуально-двойных систем для статистики наиболее интересны те, у которых известны элементы орбит, спектральные классы компонентов (Sp_1 и Sp_2), цвета (C_1 и C_2), звездные величины главных компонентов (m) и разности величин (Δm). Число систем с известными

ми элементами орбит уже превысило 500. Однако у большинства их либо не известны спектральные классы (цвета) каждого компонента, либо отсутствуют точные данные о разностях величин.

Ниже будут рассмотрены системы с известными значениями Sp_1 , Sp_2 , (C_1, C_2) , m и Δm (элементы орбит обычно неизвестны). Это системы из неопубликованного сводного каталога автора (см. [1]). Каталог включает все те системы из каталога разностей величин Валленквиста, [2], для которых из различных источников до 1964 года включительно удалось найти сведения о спектральных классах или цветах обоих компонентов. Спектральные классы и цвета были приведены к одним и тем же системам (MK и UBV).

Полный учет селекции в статистике подобных систем еще не производился. Отчасти это объясняется тем, что до недавнего времени число систем с известными спектральными классами каждого компонента было невелико.

Еще в 1924 году Эпик выполнил фундаментальную работу по статистике визуально-двойных систем [3]. Были рассмотрены системы с известными спектральными классами главных компонентов. Истинное число звезд данного типа получалось путем деления наблюдаемого их числа на коэффициент p („coefficient of perception“). Предполагалось, что этот коэффициент зависит от „меры трудности“ обнаружения системы, s . Для последней величины принято эмпирически установленное выражение: $s = \Delta m - 4 \lg p$, где p — угловое расстояние компонентов. Строго теоретически это выражение не было обосновано. Распределение значений характеристик строились отдельно для звезд различных спектральных классов; звезды делились на гигантов и карликов.

Ниже излагается другой способ учета наблюдательной селекции.

2. *Способ учета селекции.* Учет селекции необходим при переходе от статистики *наблюдаемых* систем к статистике *всех* систем данного типа, содержащихся в определенном объеме пространства.

Селекция, в частности, проявляется в том, что наибольшая звездная величина m главного компонента, при которой система еще обнаруживается, зависит от Δm и углового расстояния между компонентами p .

Чем меньше Δm , тем больше m и, при прочих равных условиях, больше объем пространства, в котором возможно обнаружение системы. Это рассуждение справедливо и в том случае, когда речь идет о системах не просто обнаруженных, но и с измеренными спектральными классами.

Зависимость $\tilde{m}$ от ρ более сложная. Существуют верхняя и нижняя границы значений ρ , за пределами которых системы обнаружить невозможно. Нижняя граница зависит от применяемого телескопа, верхняя же граница обычно определяется известным критерием Айткена. Нижняя граница зависит еще от Δm .

Если используется наблюдательный материал, полученный несколькими наблюдателями, на разных телескопах и в течение длинного ряда ночей, то приходится еще учитывать, что величина $\tilde{m}$ не постоянна, а распределена по некоторому закону, не известному заранее.

Большинство систем с измеренными спектральными классами близко к Солнцу и распределено в пространстве равномерно. Пусть α — проекция линейного расстояния между компонентами на картинную плоскость. При отсутствии селекции наблюдаемое распределение систем с фиксированными M , Δm и α по видимым звездным величинам главного компонента m соответствовало бы распределению звезд в пространстве с постоянной плотностью. В этом случае выполнялось бы соотношение

$$N(m) = k 10^{0.6 m}, \quad (1)$$

где $N(m)$ — число звезд ярче m и равномерно распределенных в пространстве, k — постоянная.

Пусть $N'(m)$ — соответствующее число наблюдаемых звезд. Из-за селекции $N'(m) < N(m)$. Множитель ξ , такой что

$$N'(\tilde{m}) \xi = N(\tilde{m}),$$

позволяет учесть селекцию по видимым величинам m . Его можно определить, имея наблюдаемое значение $N'(\tilde{m})$ и постоянную k в (1). Оценку последней получим, используя приближенное равенство $N(m) \approx N'(m)$, выполняющееся при достаточно малых m .

При этом важно, чтобы при исследовании функции $N'(m)$ рассматривались однородные группы систем. Условие однородности не выполняется, если функцию $N'(m)$ определять сразу для всех систем. Тогда при увеличении m , и, следовательно, при увеличении расстояний все чаще будут встречаться системы с большими значениями α ; в то же время системы с малыми значениями α , начиная с определенного расстояния, не встретятся вовсе. Кроме того максимальное расстояние, на котором еще возможно обнаружение системы, зависит от M и Δm .

Поэтому даже при отсутствии селекции по m распределение систем, образующих неоднородную группу, не будет равномерным в пространстве.

Рассмотрим диаграмму $\lg \rho - m$ для систем с одинаковыми значениями Δm . Покажем, что системы, расположенные на какой-нибудь прямой с уравнением

$$\lg \rho + 0.2 m = C, \quad (3)$$

где C — некоторая постоянная, образуют однородную группу.

Из соотношений

$$a = \rho r, \quad \lg r = 0.2(m - M) + 1, \quad (4)$$

где r — расстояние до системы в парсеках, следует

$$\lg \rho + 0.2 m = \lg a + 0.2 M - 1, \quad (5)$$

или

$$\lg \rho + 0.2 m = C,$$

где

$$C = \lg a + 0.2 M - 1. \quad (6)$$

Рассматривая (3) и (6), приходим к выводу, что если система с фиксированными значениями a и M удаляется от наблюдателя, она остается на прямой (3).

Рассмотрим теперь всевозможные пары значений a и M ($\Delta m = \text{const}$), удовлетворяющие уравнению (6) при $C = \text{const}$. При отсутствии селекции по m , каждой паре a и M будут соответствовать наблюдаемые системы, равномерно распределенные в пространстве, причем при всех $m < \bar{m}$ будет выполняться закон (1). При этом коэффициент k будет свой для каждой пары a и M . Для систем со всевозможными a и M , удовлетворяющими соотношению (6), распределение значений m также подчиняется закону типа (1). В этом можно убедиться, суммируя равенства (1) при различных значениях k и учитывая, что величина $\bar{m}$ одна и та же.

Заметим, что все эти системы принадлежат одной и той же прямой (3) на диаграмме $\lg \rho - m$.

Итак, можно принять, что у систем, попавших на прямую (3), распределение значений m , если оно не искажено селекцией, должно подчиняться закону (1).

Пусть число $\bar{m}$ таково, что при $m < \bar{m}$ наблюдаемое распределение m согласуется с законом (1). Обозначим ξ_c вероятность того, что система с фиксированным значением C (см. (3) и (6)) и $m < \bar{m}$ будет замечена и измерена наблюдателем. Очевидно, $\xi_c < 1$, так как при

$\bar{m} < m < \tilde{m}$ часть систем наблюдатель не заметит или не измерит. В этом и заключается селекция по значениям m .

Имеем

$$\xi_c = \frac{N'_c(\tilde{m})}{N_c(\tilde{m})}, \quad (7)$$

где $N'_c(\tilde{m})$ — число наблюдаемых систем при $m < \tilde{m}$, $C = \text{const}$; $N_c(\tilde{m})$ — истинное число систем при том же условии.

Используя равенства

$$N'_c(\bar{m}) = k 10^{0.6\bar{m}}, \quad (8)$$

$$N_c(\tilde{m}) = k 10^{0.6\tilde{m}}, \quad (9)$$

получаем

$$N_c(\tilde{m}) = N'_c(\bar{m}) 10^{0.6(\tilde{m}-\bar{m})}. \quad (10)$$

Последнее выражение подставим в (7):

$$\xi_c = \frac{N'_c(\tilde{m})}{N'_c(\bar{m})} \cdot 10^{0.6(\bar{m}-\tilde{m})}. \quad (11)$$

Пусть M — абсолютная величина главного компонента системы с фиксированными значениями C и Δm . Обозначим через $\tilde{r}$ максимальное расстояние, на котором наблюдатель может еще обнаружить и измерить эту систему. Очевидно, значение $\tilde{r}$ соответствует предельной величине $\tilde{m}$. Отсюда получим максимальный объем пространства, в котором можно обнаружить систему:

$$V_c = \omega 10^{0.6(m-M)+3}, \quad (12)$$

где ω — величина, зависящая от размеров области неба.

Найдем объем пространства V'_c такой, что если бы были обнаружены все имеющиеся в нем системы (с фиксированными M , Δm и C), то их число было бы равно наблюдаемому числу систем во всем объеме V_c . Объем V'_c определяется, следовательно, так, чтобы отношение последнего числа к V'_c соответствовало истинной пространственной плотности звезд рассматриваемого типа.

Имеем очевидное равенство:

$$V'_c = \xi_c V_c, \quad (13)$$

или, используя (11) и (12),

$$V'_c = \omega \frac{N'_c(\bar{m})}{N'_c(\bar{m})} \cdot 10^{0.6(\bar{m}-M)+3}. \quad (14)$$

Припишем теперь каждой системе, которая наблюдалась, вес, равный $1/V'_c$. Этот вес зависит от M , Δm и C , или, иначе говоря, от M , Δm и α . Если теперь требуется определить пространственную плотность систем, главный компонент которых имеет спектральный класс A0, то достаточно найти сумму весов всех таких систем: $\sum_{(i)} (1/V'_c)_i$. Эта сумма равна искомой плотности. Аналогично определяется пространственная плотность систем с любой другой характеристикой.

Оценку величины ω в (12) найти трудно, так как необходимо учитывать, что разные участки неба исследованы не одинаково тщательно. Поэтому пространственную плотность систем будем определять с точностью до постоянного множителя, выбранного произвольно. Соответственно, будут рассматриваться только нормированные к единице распределения характеристик систем.

Учитывая сказанное, вес ω системы с данными значениями M , Δm и C определим так:

$$\omega = \alpha_c \beta_M, \quad (15)$$

где

$$\alpha_c = \frac{N'_c(\bar{m})}{N'_c(\bar{m})} \cdot 10^{4-0.6\bar{m}}, \quad (16)$$

$$\beta_M = 10^{0.6M}. \quad (17)$$

Хотя селекция зависит от значений α , M и Δm , для вывода величины α_c достаточно разбиения систем на группы только по двум характеристикам: Δm и C . В этом достоинство предлагаемого способа учета селекции. Достоинство его и в том, что определив однажды веса всех рассматриваемых систем, можно переходить к построению распределения систем по значениям *любой* характеристики. Для этого достаточно просуммировать веса соответствующих систем.

Для учета селекции можно было бы использовать метод, применяющийся при выводе средней звездной плотности в окрестности

Солнца (см. [4]). Объем пространства разбивается на части сферами убывающего радиуса и с центрами в Солнце. Далее определяется наблюдаемая звездная плотность в каждом из полученных сферических колец и находится предел этой плотности при устремлении средних радиусов колец к нулю. Для применения этого метода к двойным системам последние следует вначале разбить на группы по значениям трех характеристик: M , Δm и α ; затем предельную плотность (после разбиения систем на группы еще и по расстояниям) следует определять для каждой из таких групп. Однако с увеличением числа групп уменьшается надежность окончательного результата, так как увеличивается значение случайных флуктуаций чисел звезд в группах. В то же время нельзя ограничиться разбиением систем на группы по значениям только двух характеристик. Распределения значений M , Δm и α , вообще говоря, взаимно связаны, а наблюдаемое распределение систем по значениям этих характеристик еще зависит от расстояния. В результате, предельные плотности систем при $M = \text{const}$ и $\Delta m = \text{const}$ и произвольных значениях α (разбиение систем по двум характеристикам: M и Δm) будут соответствовать средним значениям α , зависящим от M и Δm . То есть распределение систем по значениям M и Δm будет искажено неучтенной селекцией по значениям α .

По аналогичной причине нельзя ограничиться разбиением систем на группы по значениям одной характеристики.

3. *Учет селекции.* Для использования формулы (15) необходимо знать абсолютную величину главного компонента. Для ее определения использовались данные о спектрах звезд, а если имелась возможность, то и данные о динамических или тригонометрических параллаксах систем.

Известно, что если абсолютная величина звезды определяется из спектральных данных, то наиболее надежный результат получается при классе светимости V. В дальнейшем рассматриваются только те системы, у которых один из компонентов имеет класс светимости V. Для обеспечения однородности материала это правило соблюдалось и для систем с известными параллаксами. При отсутствии данных о классе светимости звезды абсолютная величина оценивалась по приближенному параллаксу и видимой величине; если расстояние по вертикали от звезды до главной последовательности на диаграмме $Sp - M$ при этом не превышало 1^m в ту или другую сторону, то звезде приписывался класс светимости V. Рассматривались *визуальные* абсолютные величины. Данные о главной последовательности взяты из [4].

Из 735 систем упоминавшегося ранее каталога автора было отобрано 424 системы с одним из компонентов на главной последователь-

ности. 12 систем, которые по данным различных авторов оказались оптическими двойными, были исключены.

По разностям величин Δm системы были разделены на 6 групп; каждая из групп делилась на подгруппы в зависимости от значений параметра C . Подавляющее большинство систем вошло в первые четыре группы с $\Delta m < 4^m$. Значение весового множителя α_c (см. (16)) определялось отдельно для каждой подгруппы. Значения α_c в подгруппах малочисленных групп для уменьшения случайных флуктуаций сглаживались. Значения α_c при $\Delta m > 4^m$ прямо не определялись, так как число систем оказалось небольшим. Эти значения находились путем экстраполяции значений α_c , полученных при $\Delta m < 4^m$. Величина $\bar{m}$ в (16) с увеличением Δm уменьшалась от 7^m до 4^m ; она зависела и от параметра C . Значение $\bar{m}$ выбиралось таким, чтобы при $m < \bar{m}$ выполнялся закон (1).

Результаты собраны в табл. 1, где $C = \lg a + 0.2 M - 1 = \lg \rho + 0.2 m$, a выражено в а. е., ρ — в сек. дуги.

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ ВЕСОВОГО МНОЖИТЕЛЯ α_c

$\Delta m \backslash C$	0.0—0.99	1.0—1.99	2.0—2.99	3.0—3.99	4.0—4.99	5.0—5.99
0.80—1.19	1.7	5.6	17.8	45	(126)	(350)
1.20—1.59	0.80	2.5	8.0	20	(55)	(140)
1.60—1.99	0.45	1.2	4.1	8.9	(25)	(63)
2.00—2.39	0.28	0.68	2.5	5.0	(14)	(28)
2.40—2.79	0.20	0.42	1.4	3.2	(7.1)	(17)
2.80—3.19	0.18	0.32	1.0	2.0	(4.4)	(10)
3.20—	0.16	0.28	0.80	1.6	(3.2)	(6.3)

Как и следовало ожидать, α_c увеличивается с ростом Δm . Уменьшение α_c при увеличении C понятно, если принять во внимание равенство (3). При фиксированном m увеличение C сопровождается увеличением ρ ; при этом системы обнаруживать и измерять легче, следовательно вес уменьшается.

По данным табл. 1 с помощью формулы (15) был вычислен вес w каждой системы.

Применение формулы (15) оправдано в двух различных случаях:

- 1) истинное распределение систем в пространстве равномерное;
- 2) истинное число систем в единице объема, начиная с некоторого расстояния, убывает, но не зависит от направления.

В последнем случае использование формулы (15) равносильно приведению пространственной плотности систем к той плотности, которая должна наблюдаться в окрестности Солнца.

При $M > 2^m$ наблюдаемые системы близки к Солнцу и их галактическая концентрация не заметна.

Это подтверждается тем, что процент систем при $|b| \leq 30^\circ$ среди всех систем не зависит от абсолютной величины:

интервал значений M	процент систем при $ b \leq 30^\circ$
2—3	42
3—4	44
4—5	40
> 5	46

В среднем этот процент равен 43 ± 1.3 , что немного меньше 50 — ожидаемого значения при одинаковой видимой плотности звезд во всех направлениях. Получается, что системы с известными спектральными классами как бы избегают располагаться в низких галактических широтах. Это можно объяснить только неодинаковой изученностью различных областей неба. Так как при $M > +2^m$ здесь нет зависимости от абсолютной величины, то учет селекции с помощью формулы (15) не приведет к ошибкам в *нормированных* распределениях различных характеристик систем.

При $M < +2^m$ концентрация систем к галактической плоскости уже заметна. Веса w этих систем были увеличены в x раз, где

$$x = \left(\frac{n_b}{n} \right) / \left(\frac{n'_b}{n'} \right),$$

n' и n — соответственно числа всех систем при $M > 2^m$ (n') и в данном интервале абсолютных величин (n); n'_b и n_b — числа таких же систем, но при $|b| \leq |b|$.

Множитель x как бы приводит наблюдаемое число систем к такому числу, которое было бы при отсутствии уменьшения звездной плотности с удалением от галактического экватора. В действительности изменяются не числа систем, а веса.

В промежутке $0^m < M < 2^m$ принято $\bar{b} = 30^\circ$. При $M < 0$ использованы меньшие значения $\bar{b}$: от 30° до 5° при увеличении расстояний

систем от 100 пс до 300 пс и более. Значения x заключались в интервале от 1 (при $r < 100$ пс) до 15 (при $r > 300$ пс). Наибольшая галактическая концентрация систем обнаружена при $-2^m < M < 0^m$. При $M < -2^m$ концентрация меньше.

4. *Роль кратных систем.* Часто визуально-двойная система в действительности состоит из трех и более компонентов. По данным А. Н. Дейча, [4, 5], тройные системы составляют 18% от числа двойных систем.

Системы с известными спектральными классами нескольких компонентов изучены значительно лучше других систем, поэтому у них можно ожидать большего процента тройных, четверных и т. д. систем (за счет выявления, в частности, спектрально-двойных звезд). Соответствующие данные для различных интервалов расстояний в сфере радиусом в 100 пс приводятся в табл. 2. При увеличении расстояний процент

Таблица 2

ЧИСЛА СИСТЕМ ДВОЙНЫХ (n_2), ТРОЙНЫХ (n_3) И ВСЕХ СИСТЕМ БОЛЬШЕЙ КРАТНОСТИ (n_k)

M	Расстояние в пс	n_2	n_3	n_k
-2- +1	0-50	2	1	4
	50-100	11	11	4
+1- +4	0-20	3	6	3
	20-40	15	12	5
	40-70	35	20	12
	70-100	34	9	4
	0-10	2	2	6
+4- +7	10-20	3	4	2
	20-30	12	4	6
	30-50	17	7	3
	50-100	17	4	2

тройных систем уменьшается. На малых расстояниях этот процент приблизительно одинаков при любых значениях M в интервале $-2^m < M < +7^m$. Суммируя числа табл. 2 в первых двух интервалах расстояний при всех значениях M , получаем: $n_2 = 36$ и $n_3 = 36$ (n_2 и n_3 — числа двойных и тройных систем). Отсюда находим: $n_3/n_2 = 1.00 \pm 0.23$ (указана средняя ошибка). Это почти в 5.5 раз больше,

чем получено в [4] и [5]. В том, что этот результат не слишком занижен, можно убедиться рассмотрев значения n_2 и n_3 при меньших расстояниях от Солнца. Суммируя числа табл. 2 в первых интервалах расстояний, получаем: $n_2 = 7$ и $n_3 = 8$.

Аналогично получим оценку снизу для отношения n_k/n_2 (n_k — число всех систем кратности больше 3): $n_k/n_2 = 1.9 \pm 0.87$. При этом в табл. 2 рассматривались только первые интервалы расстояний.

Таким образом, системы кратности, большей 2, при $-2^m < M < +7^m$ встречаются чаще, чем чистые двойные системы.

Согласно [4] среди систем ближе 5 пс от Солнца имеется 9 двойных и 2 тройных, то есть $n_3/n_2 = 0.22$. Средняя абсолютная визуальная величина главных компонентов этих систем близка к $+10^m$. Отличие найденного выше процента тройных систем от последнего результата объясняется, вероятно, различием абсолютных величин.

При статистических исследованиях системы кратности больше 2 рассматриваются нами совместно с двойными системами. Полное исключение таких кратных систем невозможно, так как среди систем, которые сегодня считаются двойными, наверняка имеются системы большей кратности. Число последних по всей вероятности значительно больше той оценки, которая была получена выше, так как не учитывались очень слабые, еще не обнаруженные компоненты.

В рассмотренных нами тройных и четверных системах обычно известны спектральные классы (цвета) только двух самых ярких компонентов; при статистике они рассматривались как двойная система.

Результаты статистики визуально-двойных систем содержатся во второй части настоящей работы.

Псковский педагогический институт

OBSERVATIONAL SELECTION AND STATISTICS OF THE VISUAL DOUBLE SYSTEMS.

I. CONSIDERATION OF THE SELECTION

B. I. FESSENKO

To take into account the observational selection in statistics of the visual double systems a division of all systems on groups according to values of two parameters not depending on the distances is proposed. The first parameter is the difference of the apparent magnitudes of components. The second parameter depends on the apparent magnitude of primary star (m) and on the angular separation of components (p). That the apparent distribution of the values m in systems of any group

should correspond to the uniform distribution of the systems in space if the selection on values m and ρ is absent is proved. By comparison of this distribution with apparent distribution distorted with selection the effect of selection may be estimated.

Conception of the weight of the system is introduced. The sum of the weights for systems of any class is equal to the density of these systems in the neighbourhood of the Sun.

Systems with known spectral types or colours of two components are examined. Multiple systems constitute the most part of all systems including the pure double systems if absolute magnitude of primary star is varied from -2^m to $+7^m$.

The second part of this work contains some other results on the statistics of visual double systems.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б. И. Фесенко, Труды АО ЛГУ, (в печати).
2. А. Wallenquist, Апп. Uppsala Astr. Obs., v. 4, № 2, 1954.
3. E. J. Öpik, Tartu Publ., 25, № 6, 1924.
4. Курс астрофизики и звездной астрономии, т. II, ГИФМЛ, М., 1962.
5. А. Н. Дейч, Изв. ГАО в Пулково, 23, в. 1, № 171, 1962.