

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

М. В. Попов

Группа тесных двойных систем, в которых оба компонента лежат вблизи главной последовательности, сравнивается статистически с группой тесных двойных с субгигантами, с целью выяснения вопроса о генетической связи этих двух групп двойных звезд.

Statistical Investigation of Close Binary Systems

by M. V. Popov

The group of close binary systems, with both components lying near the main sequence, is statistically compared with the group of close binaries with subgiants, which is aimed to clear up the question about the genetical relation between these groups of binaries.

1. Введение. В работе [1] мы рассмотрели вопрос об учете вероятности открытия и условий видимости при статистических исследованиях тесных двойных систем. Учитывая сделанные в этой работе выводы, мы сейчас сопоставим статистические данные для двух групп тесных двойных систем. Первую группу составляют системы, в которых оба компонента являются звездами главной последовательности, а вторую — системы, в которых спутник — субгигант. Цель этого сопоставления состоит в том, чтобы выяснить вопрос о генетической связи названных групп двойных звезд и получить некоторые параметры, характеризующие процесс перехода от систем первой группы к системам второй.

Абсолютные размеры для систем, включенных в исследование, были определены по опубликованным в печати элементам спектральных и фотометрических орбит. В группу двойных, оба компонента которых принадлежат к главной последовательности, вошло 85 систем, из них для 46 систем абсолютные размеры определены по элементам фотометрической и спектральной орбиты; для 13 известны лишь элементы фотометрической орбиты, и абсолютные размеры определялись по зависимостям масса-светимость и масса-спектр; для оставшихся 26 систем известны только элементы спектральной орбиты, массы компонентов этих систем определялись по зависимости масса-спектр, а радиусы — по зависимости масса-радиус. Все эти зависимости для звезд главной последовательности были получены нами в работе [2]. В

группу двойных с субгигантами вошло 98 систем. Из них для 69 известны элементы как фотометрической так и спектральной орбиты, и абсолютные размеры определялись в предположении о принадлежности более массивной звезды к главной последовательности; для 29 систем известны лишь элементы фотометрической орбиты, масса главной звезды определялась по спектру, а отношение масс по величине относительного радиуса спутника в предположении, что этот радиус совпадает с радиусом предела Роша.

При построении статистических распределений по различным параметрам суммировались величины $N_t = \frac{1}{p \cdot t \cdot V}$, где p — вероятность открытия системы, V — отношение объема, в котором видны системы данной M_V , к объему сферы радиуса 500 пс; t — время существования систем данного типа. Смысл и способ определения всех этих величин обсуждался в работе [1].

Прежде чем перейти к анализу распределения звезд по различным параметрам, сравним общие численности звезд обеих групп, исправленные за вероятность открытия, условия видимости и время жизни. Для двух генетически связанных групп звезд должно выполняться равенство $\sum N_t^{(1)} = \sum N_t^{(2)}$. Для систем главной последовательности получилось $\sum N_t^{(1)} = 1190$. Для систем с субгигантами $\sum N_t^{(2)} = 1240$. Мы считаем, что эти цифры, полученные по не очень большому числу систем, свидетельствуют о существовании генетической связи между рассматриваемыми группами звезд.

2. Некоторые статистические зависимости для систем, оба компонента которых находятся вблизи главной последовательности.

На рис. 1^a построена гистограмма распределения звезд главной последовательности по массам. Для построения гистограммы использовались только двойные системы, абсолютные размеры которых определены по элементам фотометрической и спектральной орбиты, т.е. без каких-либо дополнительных предположений. Бросается в глаза немонотонный ход гистограммы, наличие отчетливых минимумов. Это также отмечал Свечников [3]. Чтобы разрешить сомнения относительно реальности немонотонного хода гистограммы (такие сомнения, естественно, возникают, так как число звезд, включенных в статистику, не велико), мы выполнили следующую работу. По каталогу спектральной классификации Яшика и соавторов [4] было построено исправленное должным образом за влияние условий видимости и время жизни распределение по спектрам для звезд класса светимости $\bar{V}$ в интервале спектральных классов от B0 до G0. Всего таких звезд набралось 3293. Затем это распределение было пересчитано в распределение по массам по зависимости спектр-масса, и

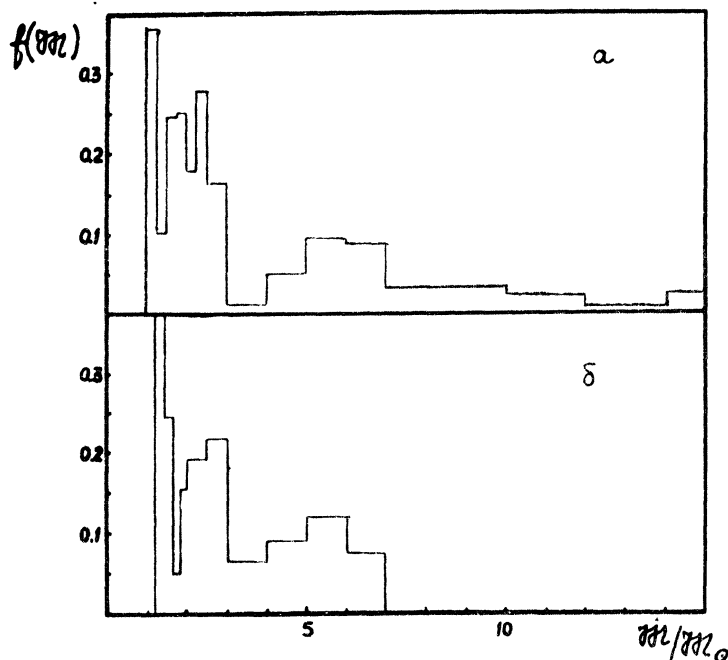


Рис. 1. Гистограмма распределения звезд главной по — следовательно по массам. Гистограмма в верхней части рисунка получена по двойным системам, нижняя гистограмма пересчитана из распределения по спектрам звезд главной последовательности.

гистограмма этого распределения приведена на рис. 1^б. Нижняя гистограмма показывает несомненное сходство с верхней. Смещение первого минимума можно объяснить неточностью пересчета распределения по спектрам в распределение по массам, так как спектральная классификация имеет дискретный характер.

Построенные распределения совершенно независимы, так как массы звезд, использованных для построения рис. 1^а, определены по элементам спектральной и фотометрической орбиты. Таким образом, немонотонность функции звездообразования по массе следует считать установленным фактом.

Гистограмма 1^б в одном отношении сильно отличается от гистограммы 1^а. Ордината первого столбца гистограммы равна 1.24 (вышла за пределы рисунка), а соответствующая ордината на гистограмме 1^а составляет лишь 0.36. Такой недостаток маломассивных звезд среди двойных систем объясняется тем, что в статистику не включены затменные переменные типа W UMa, компоненты которых имеют массы 1-2 $M_{\odot}$ и которые довольно многочисленны в окрестностях Солнца.

Распределение по отношению масс для всех систем,

обе звезды которых находятся около главной последовательности, изображено на рис. 2. По этому распределению полу-

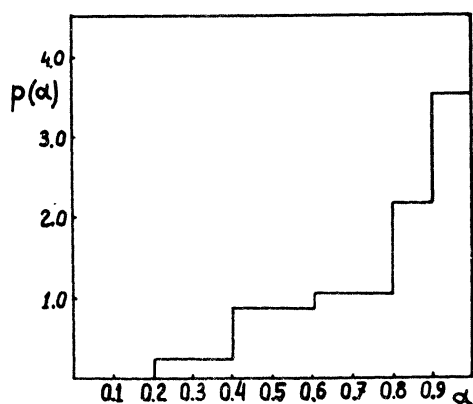


Рис. 2. Распределение по отношениям масс для тесных двойных систем главной последовательности.

чено, что наиболее вероятное значение α равно 1.0, а среднее — 0.77.

3. Метод анализа статистических данных. Рассмотрим кратко вопрос о сопоставлении распределений двух непрерывных случайных величин x и y в случае, если $y = f(x)$. Пусть $P(x)$ будет обозначать вероятность того, что рассматриваемая случайная величина не превосходит числа x .

$P(x)$ называется тогда функцией распределения случайной величины или накопленной вероятностью. Если $y = f(x)$ — неубывающая функция, то неравенства $x \leq x_0$ и $y = f(x) \leq f(x_0) = y_0$ всегда выполняются одновременно, так что $P(x_0) = P(y_0)$. Значения переменных, которые соответствуют данным накопленным вероятностям, называются квантилями. Квантиль, соответствующая накопленной вероятности P , называется P -квантилью и обозначается через x_P . Таким образом, должно выполняться равенство: $y_P = f(x_P)$.

Если из наблюдений известны функции распределения случайных величин x и y , то мы можем найти зависимость

y от x , сравнивая одинаковые квантили этих распределений. При статистическом сравнении системы тесных двойных, оба компонента которых принадлежат главной последовательности, с системой тесных двойных, у которых менее массивная звезда — субгигант, нас интересует связь величин $m_1^{(1)} - m_1^{(2)}$, $m_2^{(1)} - m_2^{(2)}$, $(m_1 + m_2)^{(1)} - (m_1 + m_2)^{(2)}$, $H_1^{(1)} - H_1^{(2)}$ и $H_2^{(1)} - H_2^{(2)}$, где m — масса звезды,

H — момент количества движения системы, h — удельный момент количества движения системы; индекс 1 внизу относится к более массивной звезде системы, индекс 2 — к менее массивной; индекс (1) вверху относится к системам

главной последовательности, индекс (2)-к системам с субгигантами.

Если нам удастся определить связь между указанными величинами, то мы получим сведения о том, какую долю своей массы теряет более массивная звезда, становясь субгигантом ($m_1^{(1)} - m_2^{(2)}$), какую часть этой массы захватывает спутник ($m_2^{(1)} - m_1^{(2)}$), сколько массы теряет система, как изменяется в среднем момент количества движения системы, какой момент количества движения приходится на единицу массы вещества, покидающего систему.

Сравнивая в дальнейшем кривые вероятностей распределений по соответствующим параметрам, мы будем считать, что между этими параметрами существует однозначная связь.

Попытаемся обосновать существование такой связи для величин $m_1^{(1)}$ и $m_2^{(2)}$. Более массивная звезда $m_1^{(1)}$ в системе, где оба компонента на главной последовательности, расширяясь в ходе эволюции, заполняет внутреннюю критическую поверхность и теряет массу, становясь субгигантом $m_2^{(2)}$. Течение этого процесса зависит от массы самой звезды, так как масса определяет скорость эволюции, и от характеристик двойной системы (период, отношение масс), определяющих картину критических поверхностей и изменение этой картины в процессе потери массы главной звездой. Внутреннее строение главной звезды к моменту достижения ею стадии корпускулярной неустойчивости зависит от массы звезды и от абсолютных размеров предела Роша, а эти размеры, в свою очередь, зависят от суммы масс, величины орбитального периода и отношения масс.

Обратив внимание на тот факт, что распределение тесных двойных систем главной последовательности по величине отношения масс весьма компактно и что изменение отношения масс около среднего значения, близкого к единице, слабо влияет на размеры критических поверхностей, мы можем считать, что ход процесса потери массы зависит от массы главной звезды и от величины периода. Наконец, имея в виду тот факт, что период и сумма масс тесных двойных систем есть величины статистически независимые, предположим, что потеря массы главной звездой в среднем однозначно зависит от массы самой звезды, а период является второстепенным фактором, который обуславливает индивидуальные особенности эволюции отдельных систем. Конечно, если мы будем интересоваться изменением периодов тесных двойных за время передачи материи, то мы примем период за определяющую величину, а сумму масс звезд назовем второстепенным фактором (иначе сравнить два распределения и получить какие-либо выводы невозможно). Однако, в последнем случае мы допустим большую неточность, чем в первом, так как распределение систем главной последовательности по периодам довольно монотонное и компактное (см.рис. 10),

а по сумме масс тесные двойные системы отчетливо разделяются, по крайней мере, на две обособленные группы.

Если мы убеждены, что имеет смысл рассматривать связь величин $m_1^{(1)} - m_2^{(2)}$, то нетрудно показать, что анализ зависимостей $m_2^{(1)} - m_1^{(2)}$ и $(m_1 + m_2)^{(1)} - (m_1 + m_2)^{(2)}$ тоже может дать реальные результаты. Связь величин $m_2^{(1)}$ и $m_1^{(2)}$ показывает, на сколько увеличивается масса спутника в процессе передачи материи. Естественно считать, что это увеличение зависит от массы, потерянной главной звездой, величина которой, как мы уже приняли, зависит от массы самой главной звезды, а, следовательно, и от первоначальной массы спутника, имея в виду компактность распределения тесных двойных по отношениям масс. Зависимость от периода в этом случае играет такую же роль как и в предыдущем.

Существование связи $(m_1 + m_2)^{(1)} - (m_1 + m_2)^{(2)}$ является следствием существования двух предыдущих соотношений. Анализ распределений по сумме масс дает лишь контроль данных, полученных из анализа распределений по массе отдельных звезд систем.

Предположение о существовании зависимости $H^{(1)} - H^{(2)}$ не менее обосновано, чем сделанные выше предположения. Правда, в этом случае влияние других параметров будет более сильным, так как один и тот же момент количества движения может быть образован различными комбинациями величин α , $m_1 + m_2$ и p .

Дополнительного предположения о существовании зависимости $h^{(1)} - h^{(2)}$ делать не приходится, так как эта зависимость является следствием существования зависимостей $H^{(1)} - H^{(2)}$ и $(m_1 + m_2)^{(1)} - (m_1 + m_2)^{(2)}$. Данные, полученные из распределения по h , служат контролем других результатов.

4. Результаты анализа и выводы. На рисунках 3-7 сопоставляются распределения по соответствующим параметрам исследуемых групп звезд. Везде рис. "а" и "б" представляют собой гистограммы относительных частот для систем главной последовательности и систем субгигантов соответственно; на рисунке "г" даны кривые накопленных вероятностей сравниваемых параметров; на рис. "в" показана зависимость квантилей кривых вероятностей, т.е. устанавливается искомая связь между данными параметрами. Некоторые качественные выводы можно сделать уже из простого рассмотрения гистограмм относительных частот. Из рис. 5 видно, что сумма масс систем с субгигантами в среднем меньше суммы масс систем, оба компонента которых принадлежат к главной последовательности. На рис. 4 нетрудно заметить, что масса главной звезды в системах с субгигантом в среднем превышает массу спутника в

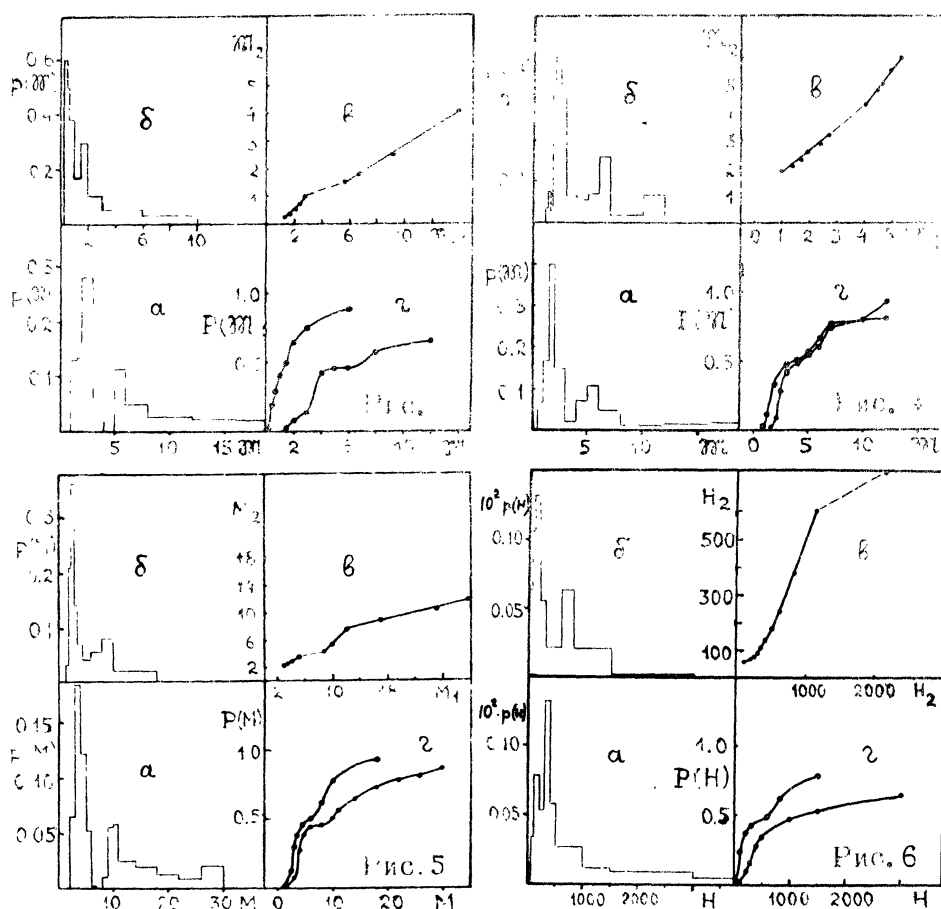


Рис. 3. Сопоставление распределений по массам $m_1^{(1)} - m_2^{(2)}$ для систем главной последовательности и систем с субгигантами: а) — гистограмма относительных частот для систем главной последовательности; б) — гистограмма относительных частот для систем с субгигантами; г) — кривые накопленных частот (кривая, проведенная через кружки, относится к системам с субгигантами, а кривая, проведенная по точкам, — к двойным главной последовательности); в) — сопоставление соответствующих квантилей рисунка "г".

Рис. 4. Сопоставление распределений по массам $m_2^{(1)} - m_1^{(2)}$ для тесных двойных систем главной последовательности и систем с субгигантами. Содержание рисунка и обозначения такие же как и на рисунке 3.

Рис. 5. Сопоставление распределений по суммам масс. Содержание рисунка и обозначения такие же как и на рис. 4.

Рис. 6. Сопоставление распределений по моменту количества движения. По содержанию и обозначениям рисунок аналогичен рис. 3.

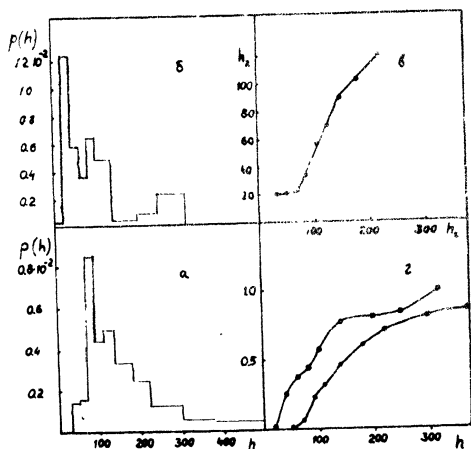


Рис. 7. Сопоставление распределений по удельному моменту количества движения. По содержанию и обозначениям рисунок аналогичен рис. 3.

массы, теряемой системой, почти в три раза превышает начальный удельный момент количества движения системы. Для более массивных систем ($8 M_{\odot} \leq M_1 + M_2 \leq 12 M_{\odot}$) главная звезда теряет около 75% своей массы, из которых 9/10 покидают систему и лишь 1/10 захватывает спутник. Момент количества движения, приходящийся на единицу массы теряемого системой вещества, в полтора раза превышает начальный удельный момент количества движения системы.

Для еще более массивных систем $M_1 + M_2 > 12 M_{\odot}$ получить непротиворечивые соотношения не удалось, по-видимому, из-за меньшего числа таких объектов.

Свечников [3], исследуя зависимость различных характеристик тесных двойных систем с субгигантами от отношения масс компонентов, приходит к выводу, что основную роль в процессе образования систем с субгигантами из систем главной последовательности играет выброс вещества из системы, причем этот выброс должен происходить сферически-симметрично.

При этом Свечников предполагает, что тесные двойные системы с "контактными" субгигантами образовались из тесных двойных главной последовательности, периоды которых были меньше одного дня. Он отмечает аномально малое количество систем с такими периодами и объясняет это тем,

системах главной последовательности. Последний факт говорит о том, что часть вещества, теряемого главной звездой, захватывает спутник. Не останавливаясь на подробном описании рисунков, которые достаточно наглядны, суммируем основные выводы, которые были получены в результате анализа статистических распределений.

За время эволюции тесно двойной системы главной последовательности в систему с субгигантом в маломассивных системах ($M_1 + M_2 < 6 M_{\odot}$) главная звезда теряет в среднем 80% своей массы, из которых примерно 2/3 уходит из системы, а 1/3 захватывает спутник, при этом момент количества движения, приходящийся на единицу

что звезды этих систем еще в стадии эволюции вблизи главной последовательности расширяются до размеров критической поверхности и превращаются в системы с субгигантами. Из систем главной последовательности с большими периодами, по мнению Свечникова, должны образоваться системы с "отделенными" субгигантами. Мы рассматриваем другой возможный путь образования систем с субгигантами, а именно, мы предполагаем, что как системы с "контактными" субгигантами, так и системы с "отделенными" субгигантами образуются из наблюдаемых систем главной последовательности, причем, образование контактного или отделенного субгиганта зависит от того, на какой стадии эволюции главная звезда достигает предела Роша. Отсутствие систем главной последовательности с периодами меньше одного дня объясняется, по нашему мнению, первоначальным распределением по периодам.

Так как можно надеяться, что распределения по массам и отношению масс для систем с короткими периодами, если таковые существовали, должны быть такими же, как и для тесных двойных с большими периодами, то наши выводы о величине потери массы системами главной последовательности при превращении их в системы с субгигантами справедливы и для гипотезы Свечникова.

Полученные нами выводы о величине потери массы системой не противоречат основному выводу Свечникова о преимущественной роли выброса вещества из системы, но конкретизируют этот вывод. Методика, которой пользовался Свечников, позволяет сделать выбор между двумя крайними типами передачи вещества: полным перетеканием от одного компонента к другому и полным истечением вещества из системы, но, пользуясь этой методикой, нельзя категорически утверждать, что некоторая доля вещества не может быть захвачена спутником. На рис. 8 мы повторили рис. 4с из работы Свечникова [3], но построенный по нашим данным. Сплошные линии соответствуют случаю, когда $2/3$ вещества, теряемого главной звездой, уходит из системы, а $1/3$ захватывает спутник. Как видно, кривые неплохо проходят через точки. Следует заметить, что точки на этом рисунке, вообще говоря, не представляют собой последующие стадии эволюции одной системы, а скорее являются конечными пунктами, в которых эта эволюция заканчивается, и поэтому для сравнения следует провести набор теоретических линий для различных значений начальной суммарной массы и отношения масс звезд в системе.

Вывод Свечникова о том, что истечение вещества из системы происходит сферически симметричным образом, сделан на основе анализа зависимости момента количества движения систем с субгигантами от отношения масс. На рис. 9 заштрихованная полоса соответствует наблюдаемой зависимос-

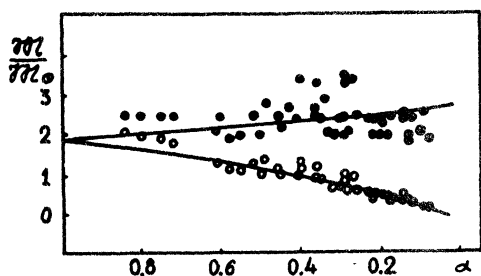


Рис.8. Зависимость масс компонентов m_1 и m_2 у тесных двойных систем с субгигантами от отношения масс. Главные компоненты и спутники обозначены соответственно значками $\bullet$ и $\circ$. Проведенные на рисунке линии соответствуют случаю, когда $1/3$ вещества, теряемого главной звездой, захватывает спутник.

чение; кривая 2 – сферически-симметричное истечение с захватом $1/3$ вещества спутником; кривая 3 – участок "а" – полное истечение вещества из системы через критическую точку L_1 , участок "в" – полное перетекание вещества к спутнику. Имея в виду тот факт, что заштрихованная полоса представляет собой не полосу, вдоль которой должна происходить эволюция систем, а скорее полосу, в которой должны лежать концы эволюционных кривых, мы замечаем, что в этой полосе могут заканчиваться кривые, соответствующие самым различным способам передачи массы. По гипотезе Свечникова системы главной последовательности, из которых образовались системы с субгигантами, имели начальные периоды меньше одного дня, и теоретические кривые, соответствующие случаю сферически симметричного истечения вещества из системы, будут проходить через заштрихованную полосу. По нашей гипотезе, как будет показано ниже, начальные периоды большинства систем больше двух дней, так что конечные точки эволюционных кривых для таких периодов должны попадать в заштрихованную полосу, если истечение вещества происходит способом, соответствующим кривой 3.

Еще один параметр, по которому можно судить о характере движения материи в системе – это орбитальный период системы. Однако вероятность открытия тесных двойных, особенно затменных переменных, сильно зависит от периода, и без учета ее влияния статистику периодов производить нельзя, так как можно получить результаты, совершенно противоположные истинным (с чем мы столкнемся ниже).

На рис. 10. сравнивается распределение по периодам для систем, оба компонента которых лежат вблизи главной по-

ти удельного момента количества движения от отношения масс для систем с субгигантами, в которых масса главной звезды заключена в интервале $1.8-3.5 M_{\odot}$, т.е. для тех же систем, для которых построен и рис. 8.

Сплошными линиями изображены теоретические кривые изменения удельного момента для системы с суммарной массой $4 M_{\odot}$, отношением масс 0.82 и начальным периодом 2 дня при различных способах истечения вещества из системы: кривая 1 – сферически-симметричное полное исте-

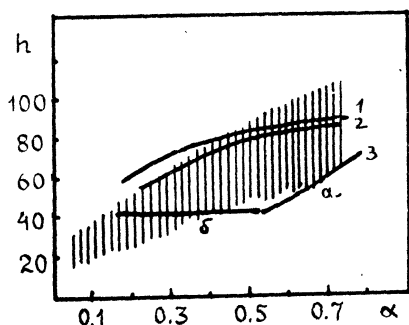


Рис. 9 Зависимость удельного момента количества движения у тесных двойных систем с субгигантами от отношения масс компонентов. Заштрихованная полоса соответствует наблюдаемой зависимости. Сплошными линиями изображены теоретические кривые изменения удельного момента для системы с начальной суммарной массой $4 M_{\odot}$, отношением масс 0.82 и начальным периодом 2 дня при различных способах истечения вещества из системы.

Алголя, для которых были определены абсолютные размеры, мы построили распределения по амплитуде изменения блеска отдельно для систем главной последовательности и систем с субгигантами. Кривые накопленных вероятностей этих распределений изображены на рис. 11. Из рисунка видно, что среди алголей с амплитудой больше одной звездной величины почти не встречаются системы главной последовательности (одна система из 43), и всего 5% затменных систем с субгигантами имеют амплитуду изменения блеска меньше 0.7. Таким образом, амплитуда изменения блеска может служить надежным при-

следовательности, с распределением по периодам для систем с субгигантами. Средние значения периодов для этих распределений совпадают (4.0), наиболее вероятное значение периода для систем главной последовательности равно 1.75, для систем с субгигантами - 1.25. Статистическую выборку для построения распределений по периодам можно было бы значительно увеличить, если бы мы могли указать такие признаки, по которым с достаточной вероятностью можно было бы отличить затненную систему с субгигантом от затменной системы главной последовательности. Оказалось, что такие признаки существуют. Во-первых, среди 98 систем с субгигантами, для которых нами определены абсолютные размеры, всего 4 системы имеют кривую блеска типа β Lyr. Таким образом, подавляющее большинство систем типа β Lyr состоят из звезд главной последовательности. Конечно, среди затменных типа β Lyr могут содержаться системы, по физическим параметрам сходные с самой β Lyr, но и таких систем будет очень мало из-за их редкой встречаемости.

Для всех затменных переменных с кривой блеска типа

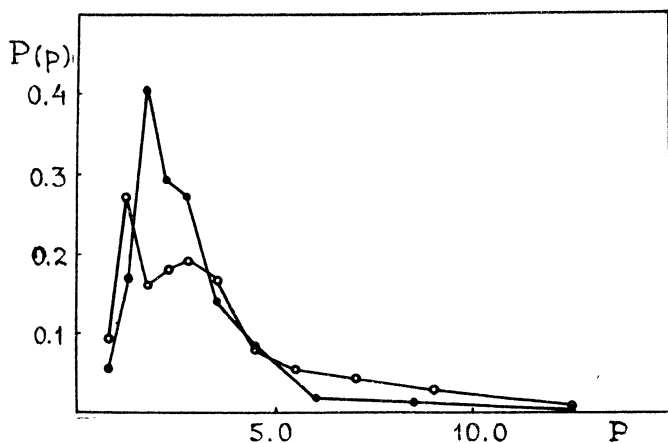


Рис. 10. Полигоны распределений по периодам для систем главной последовательности (ломаная линия, проходящая через точки) и для систем с субгигантами (ломаная, проходящая через кружки).

знаком для выделения из всех алголей систем, оба компонента которых на главной последовательности, и систем с субгигантами. Для этого все алголи, для которых известны амплитуда и период, были разбиты на две группы. В первую группу мы включили алголи с амплитудой изменения блеска $0^m.7$. В эту же группу были включены все затменные типа β Lyr. Во вторую группу вошли алголи с амплитудой больше $1^m.0$. Первая группа звезд, в которую должны входить только системы главной последовательности, будет все-таки содержать примесь систем с субгигантами (не более 10%), а вторая группа звезд, представляющая системы с субгигантами, практически свободна от примеси систем главной последовательности. По каталогам переменных звезд (ОКПЗ, 1958 и дополнения к нему) для каждой группы звезд было построено распределение по периодам. В первую группу вошло 975 звезд, во вторую — 863. Как было показано в работе [1], вероятность открытия затменной переменной зависит от периода, причем эта зависимость различна для систем главной последовательности и систем с субгигантами. Так как эта зависимость одинакова для систем с весьма различными суммами масс, то ею можно пользоваться для исправления наблюдаемого распределения по периодам.

На рис. 12 показаны кривые наблюдаемой плотности вероятности для обеих групп звезд: сплошная линия — для систем главной последовательности и пунктирная — для систем с субгигантами. На рис. 13 приведены те же кривые, но построенные с учетом вероятности открытия. Из сравнения кривых на рис. 13 следует, что при превращении системы главной последовательности в систему с субгигантом период должен в среднем уменьшаться. Заметим, что по данным, не исправленным

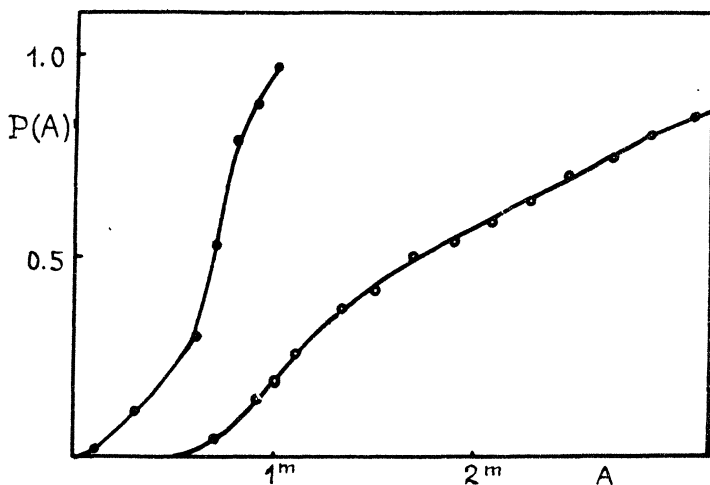


Рис. 11. Кривые накопленных частот распределений по амплитудам главного минимума для затменных переменных систем главной последовательности (кривая, проходящая по точкам) и систем с субгигантами (кривая, проходящая через кружки).

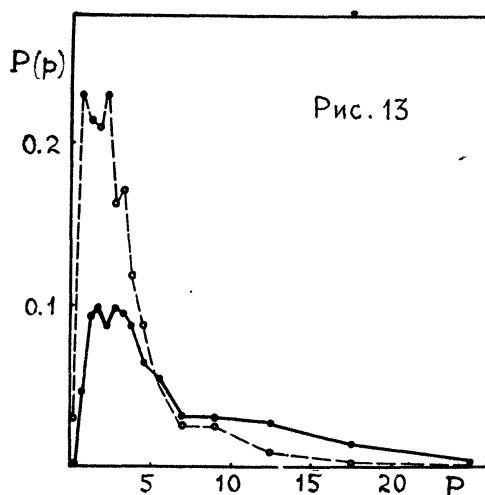
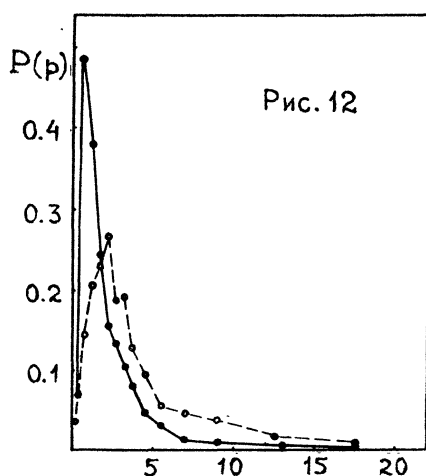


Рис. 12 Наблюдаемое распределение по периодам для двух групп затменных переменных звезд. В первую группу (кривая, проходящая по точкам) входят в основном системы главной последовательности, а во вторую (кривая по кружкам) — системы с субгигантами.

Рис. 13 Распределение по периодам для тех же звезд, что и на рисунке 12, исправленное за влияние вероятности открытия.

за вероятность открытия, следовал противоположный вывод.

На основе вывода о том, что орбитальный период уменьшается в процессе передачи вещества, и по полученным выше данным о соотношении между величиной массы, потерянной системой и захваченной спутником, можно сделать определенные заключения о характере движения газа в системе. Этот вопрос мы предполагаем рассмотреть в дальнейшем.

Литература:

1. М.В. Попов, ПЗ 17, 209, 1970.
2. М.В. Попов, АЖ 45, № 4, 1968.
3. М.А. Свечников, ПЗ 16, 276, 1967.
4. C. Jaschek, La Plata Obs. Publ. 28, 1964.

Гос.астрономический ин-т
им. П.К. Штернберга
Москва, сентябрь 1968 г.