

УДК: 524.354.6-337

ОЦЕНКА ШКАЛЫ СЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ
КОНТАКТНЫХ ДВОЙНЫХ ТИПА WUMa

Г.Н.ДРЕМОВА, М.А.СВЕЧНИКОВ

Поступила 24 октября 2001

Принята к печати 25 января 2002

В работе оцениваются временные шкалы перехода из контактных двойных систем типа WUMa в одиночные звезды класса «голубые бродяги». Для расчета этих шкал используются модель одностороннего перетекания вещества с главного компонента на спутник, заключенных в общую оболочку (Eggen и др.) и модель контактной двойной, принадлежащей начальной главной последовательности НГП с теряющим массу спутником (F. van't Veer). Расчет времени слияния компонентов проводился для 304 контактных систем типа WUMa из Каталога приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных в шкале потери массы и орбитального углового момента, вызванного магнитным торможением в предположении синхронизации осевого вращения и орбитального обращения. На основе полученной статистики, характерные шкалы слияния составляют $0.4 + 0.6$ и $0.5 + 0.7$ Гигаlet, соответственно, для двух вышеуказанных моделей. Обсуждаются результаты сравнения с другими авторами.

1. *Введение.* В данной работе исследуется динамическая эволюция контактных двойных систем (ДС) типа WUMa в результате потери орбитального углового момента (УМ) из-за звездного ветра и магнитной активности.

На основе анализа фотометрических кривых блеска и кривых лучевых скоростей сделан вывод, что все WUMa ДС солнечного типа обладают общими оболочками [1]. Из статистического изучения функции отношения масс выводится среднее отношение масс $q = M_2/M_1$, близкое к 0.3, и четко прослеживается рост числа контактных ДС с уменьшением q .

Асимметричность кривых блеска, связанная с наличием темных пятен на поверхности главного компонента [2], указывает на магнитное поле, порожденное турбулентностью и дифференциальным вращением, приводящими к механизму динамо. Внезапные скачки орбитального периода у контактной ДС, которые нельзя объяснить эффектом удаленного третьего тела, также иллюстрируют проявление магнитной активности. Природа этих скачков исследовалась в [3] и связана с процессом переноса массы, как в пределах контактной системы, так и из системы.

Итак, перенос массы и потеря орбитального УМ рассматриваются здесь как основные факторы, определяющие процесс слияния компонентов.

Объектами нашего исследования являются KW-системы из каталога приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменно-

переменных звезд [4]. Это сокращение принято согласно классификации [5]:

KW - контактные системы типа W UMa с обоими компонентами, сравнительно близкими к соответствующим внутренним критическим поверхностям (ВКП), с периодами $P \leq 0.5$ и спектрами главных компонентов Sp_1 более поздними, чем $\approx F0$. Численность KW-систем в данном каталоге - 304.

2. *Оценка шкалы слияния компонентов KW-систем в модели одностороннего перетекания.* Первый вариант оценки времени слияния компонентов в KW-системах основан на сценарии Eggen и др. [6], описывающем процесс одностороннего перетекания массы от главного компонента на спутник и потерю орбитального УМ из-за магнитного звездного ветра, выдувающегося с общей оболочки контактной системы.

Динамика эволюции предполагается следующей: первоначально более массивный компонент первым заполняет свою полость Роша, и начинается процесс перетекания массы на спутник, в ходе аккреции масса и размеры спутника увеличиваются, что приводит к формированию общей оболочки [7]. Устанавливается относительно стабильная конфигурация, в которой оба компонента заполнили свои полости Роша. Процесс же перетекания массы продолжается от когда-то более массивного, а теперь уже истощенного компонента на массивный к этому времени спутник (одностороннее перетекание даже в случае перемены ролей).

Вещество общей оболочки, которое в отсутствие магнитного поля могло бы просто выдуваться звездным ветром во внешнее пространство под действием давления излучения, вынуждено вследствие вмороженности в линии магнитного поля коротировать с системой, расходуя при этом энергию ее вращения. В силу предполагаемой синхронизации, которая имеет место в тесных ДС из-за приливного трения, это приводит к уменьшению орбитального УМ, что эквивалентно сближению компонентов.

Подход в оценке времени слияния $\tau_{\text{слияния}}$ в сценарии из [6] определяется отношением массы главного компонента к темпу потери его массы $M_1/\dot{M}_1$. Следуя [6], орбитальный УМ контактной ДС имеет вид:

$$H_{\text{orb}} \sim \left(0.027 \cdot \frac{M_1^{1.88} + M_2^{1.88}}{M_1^{0.88}} + \frac{M_1 M_2}{M} \right) A^2 w. \quad (1)$$

Дифференцирование по времени (1) дает выражение для потери орбитального УМ.

Расход собственного УМ контактной системы dH_{spin}/dt построен по аналогии с одиночными звездами, для которых справедлив закон Скуманича [8]. Согласно этому закону экваториальная скорость одиночной звезды замедляется со временем из-за магнитного поля как $V_{\text{rot}} = \alpha/t^{1/2}$. Поэтому потерю собственного УМ контактной системы можно записать как

$$\frac{dH_{\text{spin}}}{dt} = -(M_1 R_{1L}^4 + M_2 R_{2L}^4) \omega^3 / (20\alpha^2), \quad (2)$$

где коэффициент α в данной работе полагался 12 км/с - верхнее значение от калибровки по молодым звездам скопления Плеяды.

Из-за действия приливных сил предполагается, что сколь угодно малое изменение орбитального УМ сразу же синхронизируется с изменением вращательного УМ. Из равенства $dH_{\text{orb}}/dt = dH_{\text{spin}}/dt$ можно выделить величину $M_1/\dot{M}_1$, которая и определяет $\tau_{\text{слияния}}$, сгруппировав в правой части все остальные члены уравнения.

$$\tau_{\text{слияния}} = 297.6 \frac{\alpha^2}{GM/A} \cdot \frac{M^{0.76}}{M_1^{1.76} + M_2^{1.76}} \cdot \left[(M_1 - M_2 - M\delta) \cdot \frac{M_2}{M_2 + M\varepsilon} - 0.28M_2 \right], \quad (3)$$

где

$$\delta = 0.027 - 0.051 \cdot (M_2/M_1)^{0.88} \quad \text{и} \quad \varepsilon = 0.027 \cdot (1 + (M_2/M_1)^{1.88}).$$

Зная всего три физических параметра контактной системы M_1 , M_2 и большую полуось орбиты A , можно в грубом приближении оценить $\tau_{\text{слияния}}$. Для каждой из 304 KW-систем из каталога [4] была рассчитана индивидуальная шкала слияния. На гистограмме рис.1 видно, что характерное $\tau_{\text{слияния}}$ в модели Eggen и др. [6] варьирует в диапазоне от 0.4 до 0.6 Гигалет (1 Гигалет = 10^9 лет).

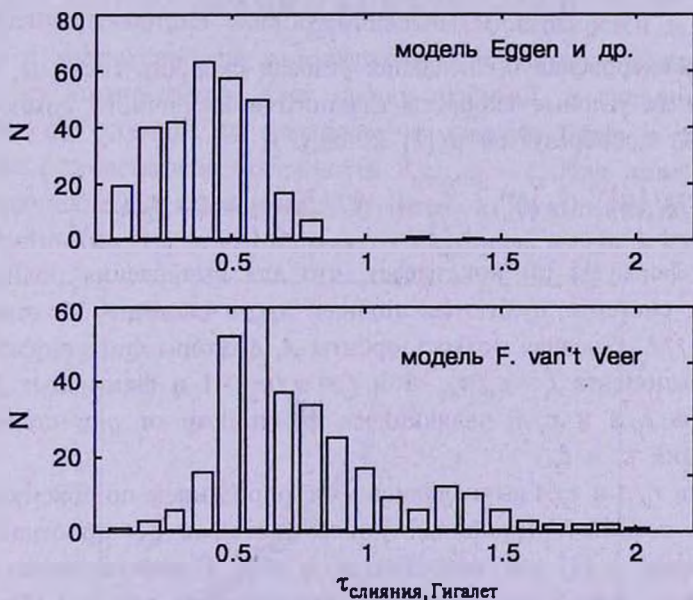


Рис.1. Гистограммы распределения числа KW-систем по шкалам слияния.

3. Оценка шкалы слияния компонентов KW-систем в модели F. van't Veer. В сценарии, предложенном F. van't Veer [1], рассматривается ДС типа WUMa, которая образовалась в результате деления протозвезды

с избыточным УМ. На момент выхода на НГП, то есть до инициации ядерного горения водорода, ДС становится контактной системой.

С поверхности главного компонента в такой системе выдувается вещество во внешнее пространство, которое из-за магнитной вязкости уносит часть углового вращательного момента. Это приводит к десинхронизации всей системы. Первая лагранжева точка L_1 начинает отодвигаться от теряющего массу главного компонента [9], в результате чего развивается динамическая неустойчивость в окрестности L_1 . Из расчетов для малых отклонений от синхронизации в [10] получено, что вещество, вытекающее через L_1 , будет возвращаться обратно на главный компонент, увлекая за собой под действием приливных сил вещество спутника. Таким образом, синхронизация восстанавливается за счет перетекания вещества от спутника на главный компонент или, другими словами, за счет "проглатывания" спутника главным компонентом.

Для определения $\tau_{\text{слияния}}$ в [1] используется отношение полного УМ, запасенного в вышедшей на НГП контактной системе к темпу его расхода. Полагая, что эксцентриситет орбиты равен 0 и пренебрегая деформацией поверхностей компонентов из-за приливных возмущений, полный УМ можно записать как

$$H = \frac{M_1 M_2}{M} \cdot A^2 w_{\text{orb}} + \sum_{i=1}^2 M_i k_i r_i^2 w_i, \quad (4)$$

где w_{orb} - кеплеровская орбитальная угловая скорость системы, w_1 и w_2 - собственные угловые скорости главного и вторичного компонентов. Формула (4) преобразуется в [1] к виду:

$$H = (GM^3 A)^{0.5} \cdot (1+q)^{-1} \cdot \left\{ \frac{q}{q+1} + (1+f_1) k_1^2 \left(\frac{r_1}{A} \right)^2 + q(1+f_2) k_2^2 \left(\frac{r_2}{A} \right)^2 \right\}. \quad (5)$$

Анализ формулы (5) показывает, что для вычисления полного УМ контактной системы требуются: полная масса системы M , отношение масс $q = M_2/M_1$, большая полуось орбиты A , факторы синхронизации для каждого компонента $f_1 = w_1/w_{\text{orb}} - 1$ и $f_2 = w_2/w_{\text{orb}} - 1$ и фиктивные радиусы компонентов r_1/A и r_2/A , являющиеся функциями от q и степеней их контактизации c_1 и c_2 .

Значения r_1/A и r_2/A вычислялись интегрированием по объему точного положения эквипотенциальных поверхностей в 3D-пространстве и затабулированы в [1] как функции от q и c . Изучение синтетических кривых блеска дает оценку степени контактности для WUMa систем солнечного типа в районе 0.7-1, а ректифицированные кривые блеска уточняют значение $c \approx 1$. Поэтому, полагая $c_1 = c_2 = 1$ и по известному q из каталога [4] путем линейной интерполяции мы находили фиктивные радиусы компонентов для каждой из 304 KW-систем.

Используя оценку темпа потери полного УМ контактной ДС как $dH/dt = 7.81 \cdot 10^{42} \text{ г см}^2/\text{с год}$ из [1] (для сравнения у Солнца $dH/dt = 3 \cdot 10^{38} \text{ г см}^2/\text{с год}$), мы вычислили индивидуальные шкалы слияния $\tau_{\text{слияния}} = H/\dot{H}$ для 304 KW-систем. Данное значение dH/dt вычислено на основе приведенной для контактных ДС в [1] зависимости временная шкала - темп потери полного УМ. В качестве временной шкалы рассматривалось время, требуемое для $\sim \text{KW} \rightarrow \text{KW}$ перехода, как процесса, предшествующего слиянию компонентов в KW-системах. По оценкам, сделанным в [15], время $\sim \text{KW} \rightarrow \text{KW}$ перехода составляет 0.25 Гигалет. Пик в распределении числа KW-систем по $\tau_{\text{слияния}}$ в модели F. van Veer [1] приходится на интервал $0.5 + 0.7$ Гигалет.

4. *Результаты.* На гистограммах рис.1 показаны распределения числа KW-систем по временам слияния их компонентов, рассчитанных в моделях Eggen и др. [6] и F. van't Veer [1]. Из графиков видно, что характерная шкала слияния, рассчитанная по 1-ой модели [6], составляет $0.4 + 0.6$ Гигалет, а для 60% KW-систем 2-я модель [1] дает $0.5 + 0.7$ Гигалет, при этом для 25% KW систем шкала слияния варьирует в пределах 1 Гигалет и для 17 % KW-систем - $1 + 2$ Гигалет.

То есть модель F. van't Veer [1], используя более реалистичное представление геометрии эквипотенциальных поверхностей и истечения вещества с учетом степени контактизации и факторов синхронизации каждого из компонентов, дает шкалу слияния, в среднем, на 500 миллионов лет длиннее по сравнению с моделью Eggen и др. [6].

На рис.2 представлена зависимость $\tau_{\text{слияния}} - q$. При этом, учитывая, что нынешние главные компоненты KW-систем из [4] являлись до "перемены ролей" спутниками [11], и что в процессе «перемены ролей» в KW-системах

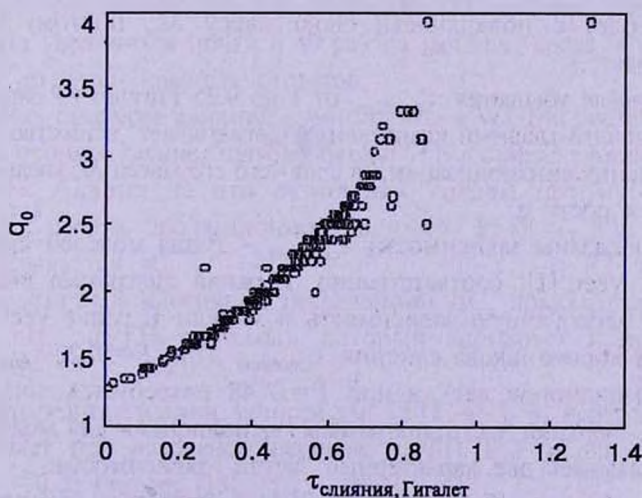


Рис.2. Зависимость начального отношения масс KW-систем от шкалы слияния в модели Eggen и др.

произошел переход от начальных отношений масс $q_0 > 1$ к $q < 1$, для модели одностороннего перетекания от главного компонента на спутник Eggen и др. [6], правильно будет использовать значения $q_0 = (M_2/M_1)^{-1}$. Тогда, график на рис.2 имеет простую интерпретацию: чем ближе q_0 к 1 (компоненты имеют почти равные массы), тем меньше времени потребуется спутнику на заполнение своей полости Роша в ходе аккреции и, соответственно, будет короче шкала слияния.

На рис.3 построена аналогичная зависимость для модели F. van't Veer [1]. Ввиду качественного различия между моделями, интерпретация этого графика будет другой:

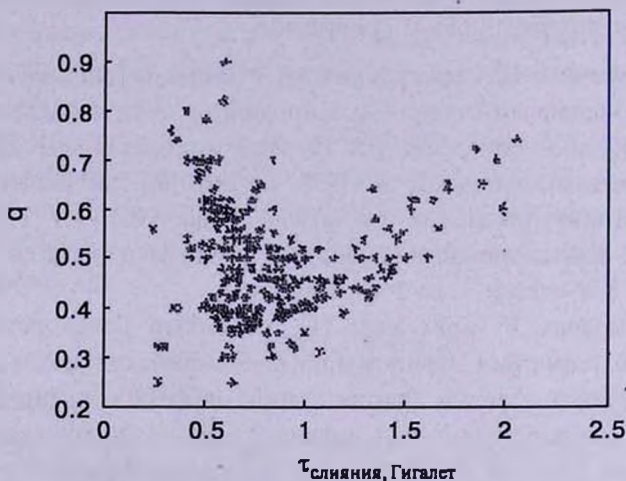


Рис.3. Зависимость отношения масс KW-систем от шкалы слияния в модели F. van't Veer.

1) на участке убывания $\tau_{\text{слияния}}$ от 2 до 1 Гигалет (для периода P это соответствует его изменению примерно от $0^d.5$ до $0^d.4$) бывший главный компонент теряет с поверхности свою массу M_2 , поэтому значение $q = M_2/M_1$ падает;

2) на интервале убывания $\tau_{\text{слияния}}$ от 1 до 0.25 Гигалет (P варьирует от $0^d.4$ до $0^d.2$) бывший главный компонент "проглатывает" вещество спутника для восстановления синхронизации, за счет чего его масса M_2 увеличивается, что приводит к росту q .

На рис.4 показаны зависимости $\tau_{\text{слияния}} - P$ для моделей Eggen и др. [6] и F. van't Veer [1], соответственно. Нижняя диаграмма рис.4 четко иллюстрирует однозначную зависимость в модели F. van't Veer [1]: чем меньше P , тем короче шкала слияния $\tau_{\text{слияния}}$. При $P = 0^d.2$, $\tau_{\text{слияния}} = 0.3$ Гигалет (300 миллионов лет), а при $P = 0^d.48$ потребуется шкала уже в 6 раз длиннее. Верхняя часть диаграммы, выполненная для модели Eggen и др. [6] показывает две характерные "ветви" зависимости:

1) с уменьшением P от $0^d.5$ до $0^d.4$ q_0 растет к экстремальным значениям, поэтому шкала слияния увеличивается;

2) на участке изменения P от $0^d.4$ до $0^d.2$ q_0 стремится к 1, что эквивалентно укорачиванию $\tau_{\text{слияния}}$ от 0.6 Гигалет до 0.2 Гигалет.

Таким образом, особенности каждой рассмотренной модели четко проявляются в вышеописанных зависимостях $N - \tau_{\text{слияния}}$, $P - \tau_{\text{слияния}}$ и $q - \tau_{\text{слияния}}$.

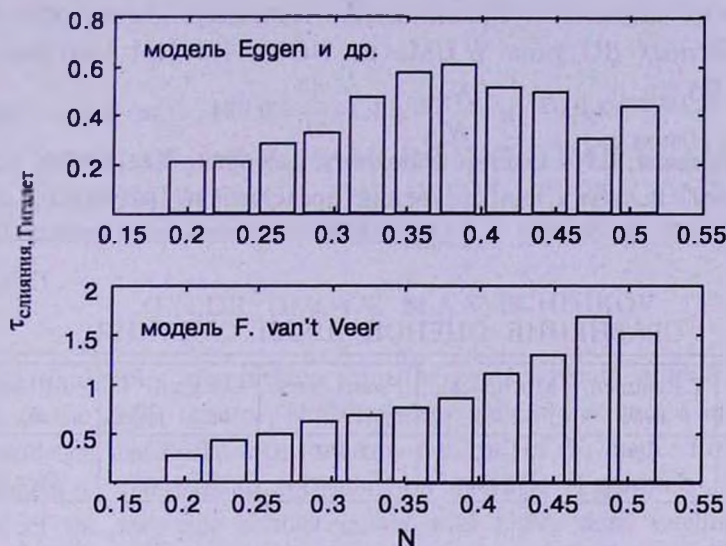


Рис.4. Гистограммы распределения KW-систем по шкалам слияния и периодам обращения.

5. **Обсуждение.** Слияние компонентов в контактных ДС представляет собой сложный процесс. Вторичный компонент может быть полностью "проглочен" главным компонентом. По оценкам R.Webbink [12] в предположении "нетеплового равновесия", однородного синхронизованного вращения и сохранения полной массы и УМ-системы, радиус главного компонента увеличится почти в 40 раз на момент, когда остаток слияния доберется до ветви красных гигантов.

Изучение процесса слияния компонентов в WUMa системах позволяет объяснить происхождение "голубых бродяг" ГБ в старых скоплениях (старше 5 Гигалет). Акцент на эти скопления сделан потому, что возраст "слиянцев", следуя эволюционной цепочке РГП $\rightarrow$ $\sim$ KW $\rightarrow$ KW $\rightarrow$ ГБ [13], складывается из:

1) возраста маломассивной разделенной ДС, локализованной на ГП, с $M_1 \leq 1.5 M_{\odot}$, (РГП системы), который варьирует в пределах 3+5 Гигалет [14];

2) шкалы контактизации, которая для РГП $\rightarrow$ KW переходов составляет ≈ 1.8 Гигалет при начальном периоде у РГП $1^d.2$, и для $\sim$ KW $\rightarrow$ KW переходов - 0.25 Гигалет [15],

3) шкалы слияния, оцененной в данной работе, в среднем 0.5 + 1 Гигалет.

Следует дополнить, что класс $\sim$ KW-систем, известных в литературе как RS CVn, рассматривается согласно классификации [5] как промежуточный в эволюционном развитии между маломассивными короткопериодическими РГП-системами и контактными ДС типа KW.

Итак, "слиянцев" отождествляют с "голубыми бродягами" по результатам сравнения их возрастов и численностей. Например, для выборки 47 ГБ и 3 контактных ДС типа WUMa из NGC 5466 [16] получено, что $\frac{\tau_{\text{слияния}}}{\tau_{\text{ГБ}}} = \frac{0.5 \text{ Гигалет}}{7 \text{ Гигалет}} \geq 0.07$ и $\frac{N_{\text{KW}}}{N_{\text{ГБ}}} \approx 1.3 \cdot \frac{3}{47} \approx 0.084$, где $\tau_{\text{ГБ}}$ - возраст голубого бродяги, 1.3 - фактор неполноты выборки. Как видно, оценки сопоставимы. В табл.1 для сравнения представлены результаты других авторов [17-19] по оценке $\tau_{\text{слияния}}$ для компонентов контактных ДС.

Таблица 1

СРАВНЕНИЕ ОЦЕНОК ШКАЛ СЛИЯНИЯ

L.Stryker, 1993	T.Rahunen, 1981	Mochnecki, 1981	F.van't Veer 1979	O.Eggen, I. Iben, 1989	M.Mateo et. al., 1990
0.05-5 Гигалет	0.5 Гигалет	1-10 Гигалет	0.05-0.1 Гигалет	0.02-0.26 Гигалет	0.5 Гигалет

Можно заключить, что шкала контактизации ($1.8 + 0.25$ Гигалет) в предположении потери орбитального УМ через тепловой магнитный звездный ветер почти в три раза превышает $\tau_{\text{слияния}}$, так как для процесса слияния важно учесть перенос массы между компонентами в дополнение к потере орбитального УМ из-за магнитной вязкости.

Также представляет интерес соотнести полученные возрасты РГП, $\sim$ KW и KW-систем с их пространственными плотностями в окрестности Солнца. По результатам [20] пространственные плотности РГП, $\sim$ KW и KW-систем составляют 660, 100 и $290 \text{ } 1/10^6 \cdot \text{пк}^3$. Возраст РГП-систем составляет $3 + 5$ Гигалет, в состоянии $\sim$ KW-систем ДС пребывает 0.25 Гигалет [15], а в состоянии WUMa систем - $0.5 + 1$ Гигалет.

$N_{\text{РГП}}/N_{\text{KW}} \approx 2.3$ и $t_{\text{РГП}}/t_{\text{KW}} \approx 4 + 5$ отличаются более чем в два раза, в то время как аналогичные оценки $N_{\text{KW}}/N_{\sim\text{KW}} \approx 2.9$ и $t_{\text{KW}}/t_{\sim\text{KW}} \approx 2 + 4$ почти совпадают. Это значит, что эволюционная цепочка РГП $\rightarrow \sim$ KW $\rightarrow$ KW - не единственный источник пополнения класса KW-систем, и вполне возможно, что часть РГП-систем выпадает из этого сценария. Вероятно, существуют и другие механизмы образования контактных KW-систем, например, из контактных ранних О-А спектральных классов с периодами, превышающими $0^d.5$ (согласно классификации [5] это КР-системы). Этот вопрос ранее обсуждался в [11] на основе современных распределений систем этих типов. Близость областей

современного пространственного распределения этих систем, построенных в окрестности Солнца, позволяет предположить эволюционную "миграцию" $KP \rightarrow KW$.

Уральский государственный университет,
Россия, e-mail: g.n.dryomova@mail.ru

ESTIMATION OF THE MERGING TIME SCALE FOR COMPONENTS OF THE WUMa-TYPE CONTACT SYSTEMS

G.N.DRYOMOVA, M.A.SVECHNIKOV

The time scales of transition from the contact binary systems of WUMa type into the single stars of "blue stragglers" class are estimated in this paper. The model of the binary with "one-way outflow" of the matter from the main component to the satellite and common envelope (Eggen, et. al.) and the model of the zero age contact binary with losing mass satellite (F. van't Veer) are used to calculate the time of the merging. For 304 WUMa-type contact systems from the catalogue "Approximate photometric and absolute elements of eclipsing variable stars" the merging times of components were evaluated in mass loss scale and in orbital angular momentum loss scale due to magnetic braking with the assumption of spin and orbital rotation synchronization. On the basis of obtained statistics the characteristic time scale for component merging are equal to $0.4 + 0.6$ and $0.5 + 0.7$ Gy for models by Eggen, et. al. and by F. van't Veer, respectively. Results of comparison with other authors data are discussed.

Key words: (*stars:*) *binaries: close-binaries: merging*

ЛИТЕРАТУРА

1. F. van't Veer, Astron. Astrophys., **80**, 287, 1979.
2. L.Binnendijk, Vistas Astron., **21**, 359, 1977.
3. J.M.Kreiner, IAU Coll., No42, Eds. R.Kippenhahn, W.Strohmeier, Bamberg, 1977, p.393.
4. М.А.Свечников, Э.Ф.Кузнецова, Каталог приближенных фотометрических

- и абсолютных элементов затменных переменных звезд, Изд. УрГУ, Екатеринбург, 1990.
5. М.А.Свечников, Л.Ф.Истомин, О.А.Грехова, Перемен. звезды, 21, N3, 399, 1980.
 6. O.J.Eggen, I.Iben, Astron. J., 97, 431, 1989.
 7. F.Meyer, E.Meyer-Hofmeister, Astron. Astrophys., 78, 167, 1979.
 8. A.Scumanich, Astrophys. J., 171, 565, 1972.
 9. M.Plavec, Mem. Soc. Roy. Sci. Liege, 20, 411, 1958.
 10. A.Kruszewski, Acta Astron., 14, 231, 1964.
 11. G.N.Dryomova, M.A.Svechnikov, Odessa Astronomical Publ., 12, 187, 1999.
 12. R.F.Webbink, Astrophys. J., 209, 829, 1976.
 13. Г.Н.Дремова, М.А.Свечников, Астрон. ж., 78, N3, 248, 2001.
 14. Г.Н.Дремова, М.А.Свечников, Кинемат. и физ. небесн. тел, 16, N2, 169, 2000.
 15. Г.Н.Дремова, М.А.Свечников, Кинемат. и физ. небесн. тел, 17, N2, 121, 2001.
 16. L.Stryker, Publ. Astron. Soc. Pacif., 105, 1081, 1993.
 17. T.Rahunen, Astron. Astrophys., 102, 81, 1981.
 18. S.Mochnicki, Astrophys. J., 245, 650, 1981.
 19. M.Mateo, H.Harris, J.Nemec, E.Olszewski, Astron. J., 100, N2, 469, 1990.
 20. М.А.Свечников, О.В.Еретнова, Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменно-переменных звезд типа РГП и некоторые результаты его статистической обработки, Изд. УрГУ, 1999.