

Лекция 4. Законы движения небесных тел

Небесная механика как астрономическая наука основана на теории Всемирного тяготения. Следствиями закона Всемирного тяготения являются многочисленные космические явления и процессы, обусловленные действием сил гравитации. Почти все они могут объясняться в рамках трех разделов механики: кинематики, динамики и статики. Поскольку расстояния между космическими объектами во много раз больше их размеров, понятие «космического тела» в небесной механике часто заменяется понятием «небесного тела» – астрономическим аналогом понятия «материальная точка» в физике. Основной задачей становится определение положения материальной точки при известных начальных координатах и скорости в любой последующий момент времени.

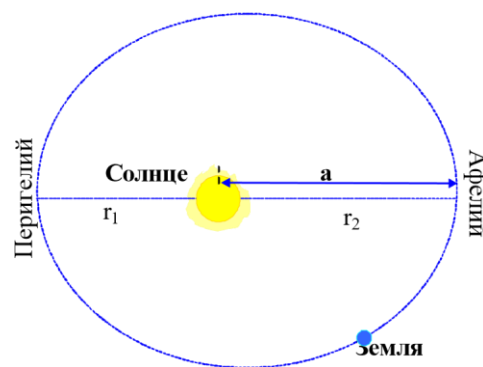
Исследование движения небесных тел предусматривает установление общих закономерностей движения, определение их положения и скорости по отношению к избранной системе координат для произвольного момента времени.

• Движение космических тел в центральных полях тяготения

Закон Кеплера: Траектории движения небесных тел в центральном поле тяготения представляют собой коническое сечение (кривую II порядка): эллипс, окружность, параболу или гиперболу, в одном из фокусов которой находится центр масс системы.

Орбиты планет Солнечной системы имеют форму эллипса, в одном из фокусов которого находится Солнце. Масса Солнца в 750 раз больше массы всех остальных тел Солнечной системы, поэтому центр масс Солнечной системы находится внутри Солнца, почти совпадая с его геометрическим центром. Эллиптические орбиты

имеют спутники планет, в том числе ИСЗ, астероиды и часть комет. Эксцентриситет e планет- Рис. 52. Первый закон Кеплера ных орбит очень мал ($e_{\oplus} = 0,017$). Эксцентриситеты орбит астероидов значительно больше, многие кометы имеют параболические и гиперболические орбиты.



Перицентром называется ближайшая к центру масс системы точка орбиты небесного тела; **апоцентром** – наиболее удаленная. Для орбит небесных тел, вращающихся вокруг Солнца, они будут соответственно называться перигелием и афелием; для орбит тел, вращающихся вокруг Земли – перигеем и апогеем и т.д.

Большая полуось орбиты a является средним расстоянием космического тела от Солнца и определяет размеры его орбиты: $a = \frac{r_1 + r_2}{2}$, $r_1 = a(1-e)$, $r_2 = a(1+e)$, где

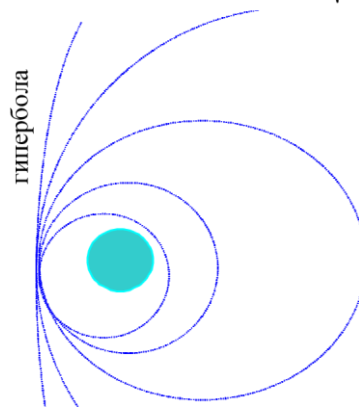
2

r_1 – расстояние космического тела от Солнца в перигелии, r_2 – в афелии.

Большая полуось земной орбиты принята за астрономическую единицу расстояний: $a_{\oplus} = 1 \text{ а. е.} = 149000000000 \text{ м.}$

Орбита небесного тела зависит от его скорости в данной точке пространства. I космическая скорость является скоростью кругового движения: $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$

Для ИСЗ, запускаемых на низкие около- $u > u_{\text{в}}$ $u = u_{\text{в}}$ земные орбиты ($h = 200 \text{ км}$), $u_I = 7,78 \text{ км/с.}$ – парабола



II космическая скорость – скорость параболического движения:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Для стартующих с Земли автоматических межпланетных станций $u_{II} = 11,02 \text{ км/с.}$ $u = u_I$ $-u_I < u < u_{II}$

При $u_I < u < u_{II}$ тело движется по эллип- эллипс окружность эллипс тической орбите. При $u < u_I$ тело также движется по эллиптической орбите, которая за ис- Рис. 53. Космические скорости. ключением точки апоцентра будет целиком Зависимость формы орбиты лежать внутри круговой орбиты. Такие траек- от скорости небесного тела тории полета земных космических летательных

аппаратов (КЛА) называются баллистическими. Период вращения небесных тел вокруг центра масс можно определить по формуле: $T = 2\pi \sqrt{a^3 / G(M+m)}$.

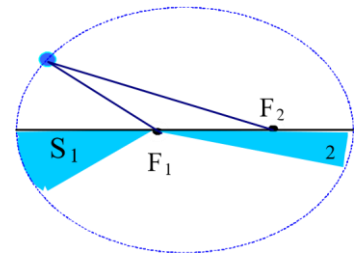
$$G(M+m)$$

При $u > u_{II}$ траектория движения небесного тела представляет собой гиперболу.

Скорость, с которой запущенный с Земли КЛА покинет пределы Солнечной системы, называют иногда третьей космической скоростью. Она равна сумме скоростей движения Земли вокруг Солнца и II космической скорости

КЛА относительно Земли, $u_{III} = 42$ км/с.

II закон Кеплера: Прямая, соединяющая небесное тело с центром масс, описывает равные площади в равные промежутки времени. Площадь, описанная радиус-вектором тела, пропорциональна времени, в течение которого она описана: при $t_1 = t_2$, $S_1 = S_2$, и u_1, u_2 ($u_1 > u_2$).



Так как за одно и то же время небесное тело проходит разные по протяженности участки орбиты, M

его движение будет неравномерным. Небесные тела v_1 S v_2 вблизи перигея имеют скорость большую, чем $t_1 - t_2$ вблизи апогея.

III закон Кеплера: Второй закон Кеплера

Произведение сумм масс небесных тел и их спутников с квадратами их сидерических периодов обращения относятся как кубы больших полуосей их орбит: $(m_1 + M_1) T_1^2 = a_1^3$, где M_1 и M_2 – массы небесных тел, m_1 и m_2 – соотв.

ветственно массы их спутников, a_1 и a_2 – большие полуоси их орбит, T_1 и T_2 – сидерические периоды обращения.

Следствия гравитационно-обусловленных космических явлений:

1. Обращение космических тел с меньшей массой вокруг космических тел с намного большей массой, когда центр масс системы находится вблизи центра массы массивного объекта.

Спутниками космических объектов называются объекты, вращающиеся вокруг них (общего центра тяжести) под действием сил тяготения. Луна – единственный естественный спутник Земли, а искусственных спутников Земли (ИСЗ) в настоящее время насчитывается свыше 7500. Спутники есть у всех планет Солнечной системы, кроме

Меркурия и Венеры: у Марса 2 спутника, у Юпитера – 61; у Сатурна – 31; Урана – 21; Нептуна – 11 и у Плутона – 1 спутник.

В зависимости от масс, размеров, формы и характеристик орбит выделяют:

1) внутренние спутники – объекты неправильной формы размерами около 10 км – обломки более крупных космических тел. Располагаются на расстоянии до 3 радиусов планеты (в пределах зоны Роша). Имеют почти круговые орбиты в плоскости ее экватора.

2) главные спутники – сфероидальной формы, размерами от 400 до 5000 км. Образуются одновременно с планетами из протопланетного облака, имеют регулярные почти круговые орбиты на расстоянии от 3 до 100 радиусов планеты в плоскости ее экватора, движутся вокруг планет в сторону их вращения (обладают прямым движением).

3) внешние спутники – объекты неправильной формы размерами от 1 км до нескольких десятков километров, находятся на эллиптических орбитах с большими эксцентриситетами (0,15-0,6) и наклонами (20° - 40°), как с прямым так и с обратным движением на расстоянии свыше 100 радиусов планеты. Вероятно, захвачены из межпланетного пространства.

У крупных астероидов в роли спутники выступают мелкие астероиды. Все планеты Солнечной системы можно считать спутниками Солнца. Наша Галактика имеет 2 больших спутника – галактики Большое и Малое Магеллановы Облака и 14 других звездных систем поменьше.

2. Обращение двух или более сравнимых по массе космических тел вокруг общего центра масс, когда положение последнего не совпадает с положением объектов системы. Примерами являются системы двойных и кратных планетных тел, звезд, звездные скопления и галактики.

Описание движения двух космических тел под действием сил их взаимного притяжения в отсутствие действия каких-либо других сил называется задачей 2 тел и решается просто и однозначно.

В реальных ситуациях космические системы только из 2 тел встречаются сравнительно редко. Чаще приходится описывать движение 3 небесных тел, определяя движение 2 тел относительно третьего или всех трех тел относительно центра масс (например, для системы Земля – Луна – Солнце). Точное решение задачи 3 тел носит очень сложный характер и, как правило, заменяется приближенным решением.

Обычно астрономам приходится решать задачу n-тел, описывая движения большого числа космических тел под действием сил их

взаимного тяготения. Учесть влияние всех тел друг на друга исключительно сложно. Вначале решается задача 2 избранных тел, выделяемых из всей совокупности взаимодействующих космических объектов, а затем поочередно учитываются все воздействия, которые оказывают на исследуемое тело все остальные объекты системы.

• **Возмущения** – изменения характеристик движения космических тел вследствие притяжения со стороны других космических тел, помимо центрального тела данной космической системы. Наблюдаются в виде отклонений от траекторий, вычисленных на основе задачи 2 тел (законов Кеплера). Невозмущенным называется довольно редкий вид движения космических тел, строго подчиняющегося законам Кеплера.

В зависимости от силы и времени воздействия возмущения разделяются на вековые и периодические, играющие важную роль в эволюции орбит космических тел.

Вековые возмущения зависят от взаимного положения космических тел и происходят в одном направлении, постепенно накапливаясь с течением времени. Структура Солнечной системы почти не изменяется со временем. В других планетных и звездных системах вековые возмущения (эксцентриситета, большой полуоси и других элементов орбит) могут стать причиной частичного или даже полного разрушения этих космических систем.

Долгопериодические и короткопериодические возмущения зависят от относительного положения космических тел, изменяют все элементы их орбит попеременно в противоположных направлениях и повторяются во времени.

Особую роль в движении космических тел в космических системах играют соизмеримости средних движений – орбитальные резонансы: так, периоды обращений Сатурна и Юпитера относительно Солнца соотносятся как 5:2; Урана и Нептуна как 1:2; Нептуна и Плутона как 2:3. Резонансы планетных орбит возникли в эпоху образования Солнечной системы. Резонансными орбитами обладают Меркурий, Венера, многие спутники планет, астероиды и кометы.

В соответствии с **принципом синхронности** любая планетная система независимо от начального состояния эволюционирует к резонансному состоянию, в котором между основными параметрами системы (средними движениями $n = \frac{360^\circ}{T}$, эксцентриситетами, наклонами T

орбит планет и спутников и т.д.) преобладают резонансные – соотношения (например, $n_1 = a$, $n_2 = b$

где a и b – целые числа). Всякая планетная система за время своего существования может пройти через несколько резонансных и нерезонансных состояний в зависимости от того, какие силы преобладают в ней на данном этапе эволюции.

Наличие возмущений препятствует точному расчету орбит небесных тел на длительные промежутки времени. Причиной невозможности точных расчетов является существование локальной неустойчивости орбит космических тел относительно малых, в том числе и негравитационных, возмущений, сумма которых на протяжении больших промежутков времени оказывает значительное непредсказуемое воздействие на элементы орбит. Даже при наличии мощных ЭВМ невозможно рассчитать элементы орбит планет на сроки, отстоящие более чем на 15 миллионов лет от настоящего момента.

Анализ возмущений и решение задач трех и, чаще, n -тел для вычисления основных характеристик орбитального движения космических тел естественного (планетные тела Солнечной системы, компоненты двойных и кратных звездных систем и т.д.) и искусственного (ИСЗ, АМС и т.д.) происхождения – основная область работы ученых – специалистов по небесной механике. Вследствие возмущений происходят явления:

1. **Захват** движущегося небесного тела с превращением траектории его движения из параболической или гиперболической в эллиптическую. Захваченное небесное тело становится спутником захватившего его силой своего притяжения массивного небесного тела. Многие спутники планет-гигантов прежде были астероидами, захваченными гравитационными полями этих планет. Комета Шумейкера-Леви-9 была захвачена гравитационным полем Юпитера, изменила свою орбиту на эллиптическую и при очередном сближении столкнулась с планетой.

2. **Аккреция** – выпадение вещества из окружающего космического пространства на космическое тело под действием его притяжения.

3. **Приливы** – деформации литосферы (коры) и гидросферы космических тел в результате воздействия притяжения других космических тел.

На Земле приливы наблюдаются как периодические повышения и понижения уровня воды в морях и океанах вследствие разности между притяжением Луной и Солнцем всей Земли в целом и ее водной оболочки (рис. 6). Происходят 2 раза в сутки. Средняя их продолжительность 12 часов 25 минут. Приливы лунного происхождения в 2,2 раза мощнее солнечных приливов. Наиболее высокие (сизигийные) приливы происходят при совпадении направлений действия сил притяжения со стороны Луны и Солнца через 1–2 суток после новолуния и полнолуния. Помимо «космических» причин на высоту приливов влияют характеристики побережья: наиболее мощные приливы происходят в узких глубоких бухтах (фиордах) со скалистыми берегами. 18-метровые приливы наблюдаются на атлантическом побережье Канады; в России в Пенжинской губе Охотского моря они достигают 13-метровой высоты. Самые низкие (квадратурные) приливы происходят при противоположных направлениях действия сил притяжения Солнца и Луны, через 1–2 суток после I и III четверти.

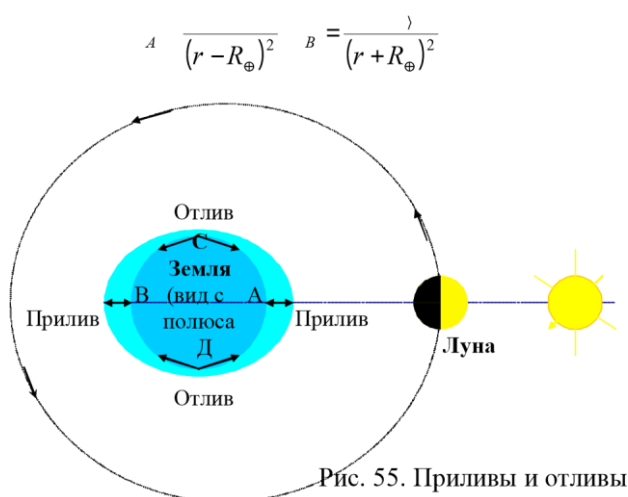
Причиной приливов является приливное ускорение: разность ускорений, вызываемых притяжением небесного тела в данной точке и в центре планеты.

Согласно закону Всемирного тяготения Луна притягивает к себе каждую частицу твердой поверхности Земли и каждую каплю воды в ее океанах. Равнодействующая ускорений проходит через центр Земли: $a_T = \frac{GM_2}{r^2}$, r – расстояние до Луны.

В точках А и В Луна ускоряет движение вод: $a = \frac{GM}{(r - R_\oplus)^2}$ в точке А и $a = \frac{GM}{(r + R_\oplus)^2}$ в точке В.

Противоположно направленными разности ускорений $(a_A - a_T)$ и $(a_B - a_T)$ почти равны. В точках А и В притяжение Луны ослабляет силу тяжести на земной поверхности, а в точках С и Д наоборот, усиливает. В результате действия этих ускорений вода в океанах на одной половине Земли стремится к точке А, над которой Луна в зените; в

другой половине Земли – к точке В, где



Луна в надире: в точках А и В будет прилив, в точках С и Д – отлив.

Первое научное объяснение приливов было сделано И. Ньютоном. Теория приливов совершенствовалась на протяжении столетий Л. Эйлером, Д.Г. Дарвином и другими учеными.

Использование энергии приливов может дать значительный вклад в энергетику приморских стран. Приливные электростанции (ПЭС) действуют в России, США и других государствах.

Приливы уменьшают скорость вращения космических тел, пока она не сравняется с синодическими периодами вращения этих тел вокруг центрального тела. Приливная сила со стороны Солнца значительно уменьшает скорость вращения вокруг своей оси близких к нему планет: меркурианский год ($87,94^d$) составляет $3/2$ меркурианских суток ($58,64^d$); почти совпадают периоды вращения Венеры вокруг Солнца ($224,7^d$) и вокруг оси ($243,0^d$).

Удаление Луны от Земли со скоростью $1,5$ см/год связано с уменьшением действия приливных сил, синхронизировавших периоды вращения Луны вокруг своей оси и вокруг Земли, и значительно уменьшивших скорость вращения Земли вокруг своей оси. Сила трения, возникающая между перемещающимися массами воды и твердыми породами дна океанов и внутри самой литосферы ведет к торможению вращения Земли. В настоящее время длительность суток увеличивается на $0,001^s - 0,002^s$ в столетие.

Земля в свою очередь тормозила вращение Луны, а поскольку масса нашего спутника в $81,2$ раза меньше массы Земли, то скорость вращения Луны вокруг своей оси уменьшалась быстрее и совпадает сейчас со скоростью вращения вокруг Земли. Луна повернута к Земле всегда одной и той же стороной. Однако можно наблюдать до 60% лунной поверхности за счет либраций – «покачиваний» лунной оси в результате действия приливных сил со стороны Земли и Солнца.

4. Прецессия – перемещение оси вращения Земли вокруг своего среднего положения по конусу с раствором под углом $23,5^\circ$ (см. рис. 17).

Совокупные причины прецессии: а) действие сил тяготения Луны и Солнца; б) наличие «избыточной массы» на экваторе Земли вследствие ее «сплюснутости» у полюсов; в) наклон земного экватора к плоскости эклиптики под углом $23,5^\circ$; г) гироскопический эффект вращения Земли вокруг своей оси. Следствиями космического явления прецессии являются небесные явления: –

«предварение равноденствий» («прецессия» в пер. с древнегреческого);

- перемещение точек весеннего и осеннего равноденствий вдоль эклиптики из одного зодиакального созвездия в другое со скоростью $0,52''$ в год;
- конусообразное движение полюсов мира по небесной сфере;
- большая продолжительность звездного года по сравнению с тропическим; - изменение экваториальных координат небесных светил и т.д.

Области пространства, в которых силы притяжения космических тел взаимно уравнивают друг друга, называются точками Лагранжа. Их можно обнаружить в любой системе небесных тел: планет и их спутников, двойных и т.д.

Участки пространства вокруг космических тел внутри эквипотенциальной поверхности с гравитационным потенциалом, равным потенциалу в точке Лагранжа, называют **полостями Роша**. Космическое тело с недостаточно высокой плотностью в пределах полости Роша разрывается приливными силами: так образуются кольца планет-гигантов.

Гравитационно-обусловленные космические явления оказывают мощное влияние на все природные оболочки Земли и эволюцию планеты.

Работы ученых Э. Брикнера, А. Дугласа, Ч. Брукса, О. Петерсона, А.А. Чижевского, В.И. Вернадского позволили достоверно установить ряд циклов природных явлений. Самые продолжительные из них имеют гравитационную природу и воздействуют на все природные оболочки Земли. Так, эксцентриситет орбиты Земли испытывает незначительные изменения с периодичностью 90–92 тыс. лет; время прохождения перигелия – с периодичностью в 21000 лет. Прецессия и нутации изменяют угол наклона земной оси к плоскости ее орбиты с периодом в 40000 лет, влияя на климатические и биосферные процессы. При увеличении наклона земной оси вращение планеты ускоряется, возрастают летние температуры. Одновременное увеличение эксцентриситета земной орбиты с увеличением наклона земной оси ведет к глобальному потеплению: тают ледники, повышается уровень Мирового океана. Уменьшение угла e замедляет скорость вращения Земли, ослабляет контрасты зим и лет, которые становятся все холоднее. Совпадение уменьшения эксцентриситета

орбиты и наклона земной оси приводят к глобальному похолоданию, росту ледникового покрова и понижению уровня Мирового океана.

Установлено воздействие на земной климат периодических деформаций не только земной орбиты, но и формы внутренних оболочек Земли, вызываемых притяжением планет, особенно Юпитера и Сатурна, влияние которых усиливается резонансом с процессами в недрах Земли. В число следствий входят дрейф географических полюсов со скоростью 6-10 см в год и периодические «большие» оледенения планеты.

Установлены следующие вариации скорости вращения Земли вокруг оси: 1) годовые; 2) сезонные; 3) месячные и полумесячные, с периодом около 14 суток, обусловленные лунносолнечными зональными приливами (порождаются периодическими изменениями момента инерции Земли, экваториальное растяжение которой под действием сил тяготения Луны и Солнца вдоль прямой, проходящей через центры Земли и Солнца периодически изменяется в течение месяца). За сидерический месяц Земля 4 раза меняет скорость вращения: 2 раза ускоряет и 2 раза замедляет свое вращение со средней продолжительностью каждого режима 6,8 суток. Вблизи экстремумов приливных колебаний угловой скорости вращения Земли происходит перестройка синоптических (гидрометеорологических) процессов в атмосфере в естественных синоптических районах планеты. Предполагается, что ускорение вращения Земли с 1973 г. закончится в 2005-2010 гг.: начнется новая климатическая эпоха длительностью около 35 лет.

На заключительном этапе занятия в ходе фронтального обсуждения обучаемые проверяют и дополняют таблицу «Космические и небесные явления»:

Космические и небесные явления	
Космические явления	Небесные явления, возникающие вследствие данных космических явлений

Вращение Земли вокруг своей оси	<u>1. Отображения истинного вращения Земли вокруг своей оси:</u> - суточное вращение небесной сферы вокруг оси мира с востока на запад; - восход и заход светил; - кульминация светил; - смена дня и ночи; - суточная абберация светил; - суточный параллакс светил; - суточное изменение горизонтальных координат и часового угла светил. <u>2. Физические явления:</u> - отклонение падающих тел к востоку; - существование сил Кориолиса
Обращение Луны вокруг Земли	<u>1. Отображения истинного обращения Луны вокруг Земли:</u> - видимое движение Луны по небесной сфере; - смена фаз Луны; - солнечные и лунные затмения; - покрытия звезд и планет Луной
Обращение Земли вокруг Солнца	<u>1. Отображения истинного вращения Земли вокруг Солнца:</u> - годичное изменение вида звездного неба; - годичное движение Солнца по эклипике с запада на восток; - изменение полуденной высоты Солнца над горизонтом в течение года; - изменение продолжительности светового времени суток в течение года; - полярный день и полярная ночь на высоких широтах планеты; - смена времен года; - годичная абберация светил; - годичный параллакс светил; - годичное изменение горизонтальных координат и часового угла светил

Обращение планет Солнечной системы вокруг Солнца	1. <u>Видимое перемещение внутренних и внешних планет по небесной сфере.</u> 2. <u>Конфигурации планет:</u> - соединения: верхнее и нижнее; - элонгации (наибольшие удаления); - квадратуры: восточная, западная; - противостояния. 2. <u>Явления в системе Солнце – внутренняя планета:</u> - прохождение Меркурия и Венеры по диску Солнца. - смена фаз внутренних планет (Меркурия и Венеры). 3. <u>Явления в системах планет и их спутников:</u> - изменение положения спутника относительно диска планеты; - прохождения спутников по диску планет; - затмения спутников диском планет 4. <u>Покрывтия звезд дисками планет (планетных тел)</u>
Атмосферные явления	1. <u>Атмосферная рефракция:</u> - искажение небесных координат светил; - необходимость поправки экваториальных координат небесных светил на рефракцию; - искажение формы и угловых размеров небесных светил по высоте на восходе и закате; - мерцание звезд; - «зеленый луч». 2. <u>Рассеяние света в атмосфере Земли:</u> - голубой цвет дневного неба; - синий, сиреневый цвет вечернего (утреннего) неба; - сумерки; - продолжительность светового времени суток (дня) всегда превышает промежуток времени от восхода до захода Солнца; - белые ночи; полярный день и полярная ночь на высоких широтах; - свечение ночного неба; - заря; красный цвет зари; - покраснение дисков Солнца и Луны на восходе и закате;

	- гало вокруг Луны и Солнца; - «ложные» солнца и луны. 3. <u>Метеоры, болиды</u>, метеорные потоки, звездные дожди. 4. <u>Серебристые</u> и <u>жемчужные облака</u>. 5. <u>Зодиакальный свет</u> и <u>противосияние</u>. 6. <u>Полярные (северные) сияния</u>.
Вращение компонент двойных звезд вокруг центра систем	Изменение блеска системы вследствие затмения (или покрытия) одной из звезд вторым компонентом системы