

**ВСЕРОССИЙСКАЯ ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ ПО АСТРОНОМИИ
2025-2026 уч. год. Муниципальный этап. КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ**

11 КЛАСС Условия, ответы, решения, критерии оценки

Авторы-составители задач А.Ю. Алексеев научный сотрудник физико-астрономического отдела ГМИК им. К.Э. Циолковского, М.С. Красин профессор кафедры физики и математики КГУ им. К.Э. Циолковского, Е.Н. Типикина заведующий сектором астрономических наблюдений ГМИК им. К.Э. Циолковского, под ред. М.С. Красина

1. «Космические путешествия» (8 баллов). Экипаж звездолёта наблюдал одну и ту же звезду с расстояния 0,6 пк и 6 пк. Как при этом изменялись следующие характеристики звезды:

А. Яркость звезды (освещённость поверхности датчика, на которую падал свет этой звезды),

Б. Видимая звёздная величина звезды, В. Абсолютная звёздная величина звезды. Считать, что за время наблюдений светимость звезды не изменялась. Ответы поясните формулами, словами и (или) рисунками.

1. «Космические путешествия» (8 баллов). Ответы: А. Освещённость уменьшилась в 100 раз. Б. Видимая звёздная величина звезды увеличилась на 5^m . В. Абсолютная звёздная величина звезды не изменилась. **Пояснения:** А. Освещённость равна энергии, которая падает за 1 с на поверхность в 1 м^2 . При увеличении расстояния в 10 раз площадь сферы, в центре которой находится звезда, а на поверхности которой оказывается звездолёт увеличивается в 100 раз ($S = 4\pi r^2$). Поэтому на единичную поверхность попадает в 100 раз меньше энергии. Б. Согласно закону Погсона

$\frac{E_2}{E_1} = 10^{0,4(m_1 - m_2)}$, в нашем случае $10^2 = 10^{0,4(m_1 - m_2)}$, следовательно $m_1 - m_2 = 5$. Можно объяснить иначе, опираясь на известное соотношение, что увеличение освещённости приблизительно в 2,51 раза (точнее в $\sqrt[5]{100}$, а приблизительно 2,5 раза) приводит к уменьшению звёздной величины на 1^m . В. Абсолютная звёздная величина звезды, согласно определению, не зависит от расстояния, с которого эта звезда реально наблюдается.

Критерии оценки. За каждый правильный ответ ставить 1 балл. За обоснование ответов на вопросы А и Б ставить по 2 балла (если обоснование вполне корректное) или по 1 баллу (если в обосновании допущены некоторые неточности). За обоснование ответа В ставить 1 балл.

2. «Подвижная карта звёздного неба 11» (8 баллов). Воспользовавшись подвижной картой звёздного неба, ответьте на вопросы. **Вопрос 1.** Какая звезда будет наблюдаться вблизи верхней кульминации к северу от зенита 5 декабря в 19-00 при наблюдении из местности с координатами (широта $\varphi = 60^\circ$, долгота $\lambda = 85^\circ$) (достаточно указать только одну звезду, но надо обязательно пояснить, как Вы это определили по подвижной карте). **Вопрос 2.** Найдите на карте звёзды α Секстанта и η Девы. Определите, какая из этих звёзд будет раньше заходить за горизонт, при наблюдении за ними с экватора Земли, и на какой высоте (в градусной мере) над горизонтом будет находиться другая звезда (обязательно поясните, как Вы получили необходимые сведения с помощью подвижной карты и какие расчёты Вам потребовалось провести).

2. «Подвижная карта звёздного неба 11» (8 баллов). Ответы. **Вопрос 1.** γ Цефея, **Вопрос 2.** В момент захода звезды α Секстанта звезда η Девы будет наблюдаться на высоте $33^\circ \pm 5^\circ$. **Пояснение к ответу на вопрос 1.** Совмещаем отметку 19 ч на накладном круге с отметкой 5 декабря на основной части. Учитываем, что в верхней кульминации будут наблюдаться звёзды, оказавшиеся на линии, соединяющей Полярную (полюс мира) и точку Юга. В зените кульминируют звёзды, имеющие склонение, равное широте местности. Поэтому к северу от зенита кульминируют звёзды, оказавшиеся между точкой пересечения линии склонения 60° с небесным меридианом (линия Полярная – точка Юга) и Полярной (полюсом мира). Вблизи этого участка небесного меридиана оказывается звезда γ Цефея. **Пояснение к ответу на вопрос 2.** Склонения этих звёзд близки к нулю, т.е. эти звёзды расположены практически на небесном экваторе. Прямое восхождение звёзды α Секстанта равно 10ч 08мин, а звезды η Девы равно 12ч 20мин. Прямое восхождение меньше у звезды α Секстанта, поэтому эта звезда раньше восходит и раньше заходит. Разность между прямыми восхождениями звёзд равна 2ч 12мин. Поскольку звёзды расположены практически на небесном экваторе, то для наблюдателей, находящихся на экваторе Земли эти звёзды будут двигаться в плоскости перпендикулярной горизонту и заходить строго на западе. Поэтому, когда звезда с меньшим прямым восхождением будет заходить за горизонт, вторая звезда будет над

горизонтом на высоте, равной разности прямых склонений. Если перевести часовую меру в градусную получаем $2\text{ч } 12\text{мин} = 33^\circ$.

Внимание, с учётом погрешности измерений по карте допускается ошибка в определении прямого восхождения не более 10 мин. Поэтому погрешность разности равна 20 мин или 5° .

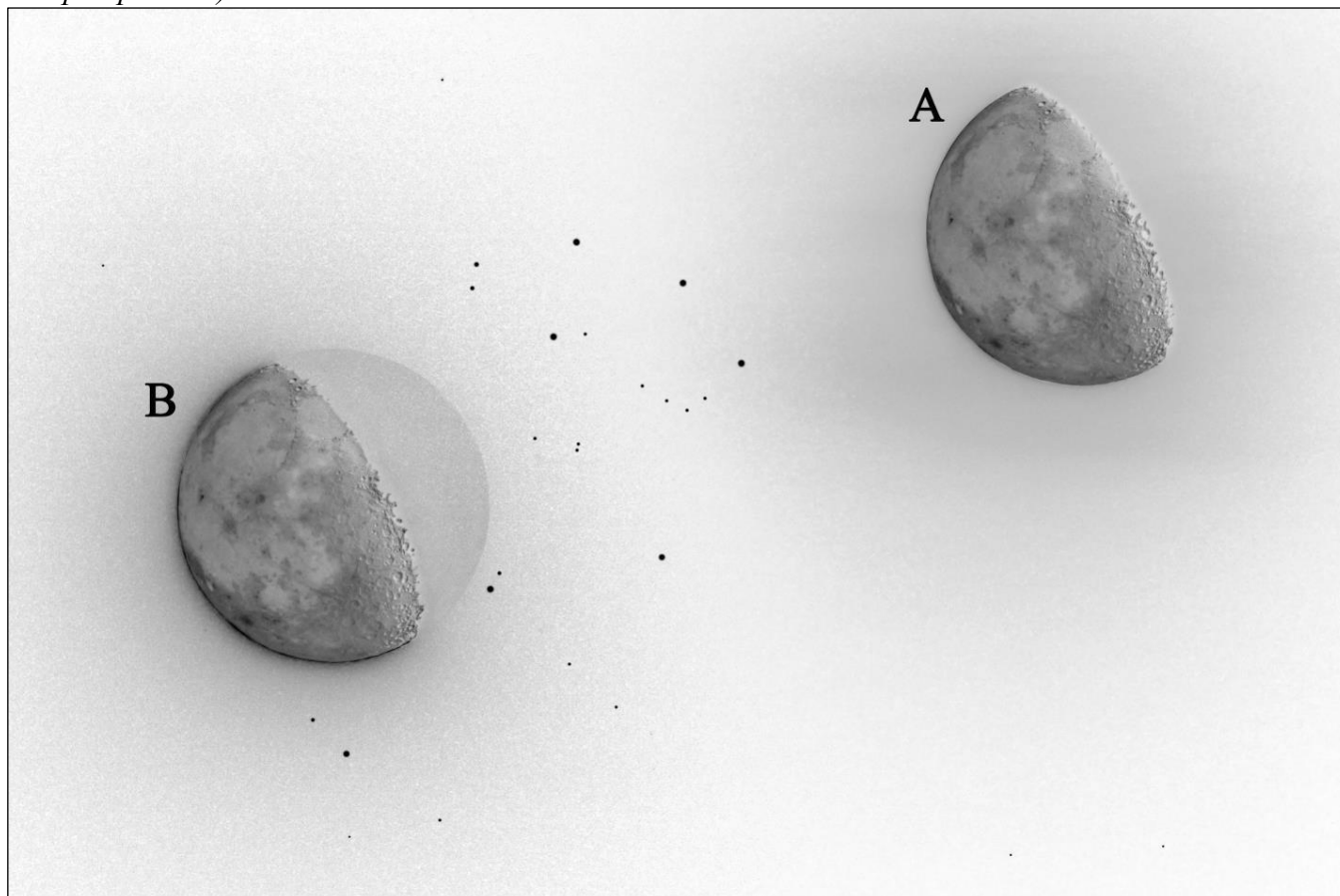
Критерии оценки. За ответ на вопрос 1. Указание на звезду γ Цефея оценить в 1 балл.

За объяснение, как это было установлено добавить 2 балла. Если указана δ Кассиопеи, то ставить всего 1 балл при наличии обоснования (т.к. эта звезда всё-таки кульминирует к югу от зенита (почти в зените)). **За ответ на вопрос 2.** Если определены прямые восхождения звёзд α Секстанта и η Девы с погрешностью ± 10 мин и дано пояснение как это было установлено с помощью подвижной карты, то ставить по 1 баллу за каждую звезду. Если обоснования нет, то баллы не ставить. **Если** указано, что раньше заходит α Секстанта и дано обоснование этому, то ставить 1 балл. **Если** указано, что угол зависит от разности прямых восхождений, т.к. звёзды движутся в плоскости перпендикулярной горизонту, то ставить 1 балл. **Если** сделан правильный перевод часовой меры в градусную и получено значение высоты второй звезды в интервале от 28° до 38° (из-за погрешности измерения координат по карте), то ставить 1 балл.

3. «Плеяды и Луна» (8 баллов). В своём движении по небу Луна периодически закрывает собой звёзды и планеты, такие явления называются покрытиями. В сентябре 2025 года наблюдалось покрытие Луной рассеянного звёздного скопления Плеяды. Перед вами негатив комбинированной фотографии, отражающей два положения Луны на фоне скопления в ту ночь. Время съёмки указано в таблице.

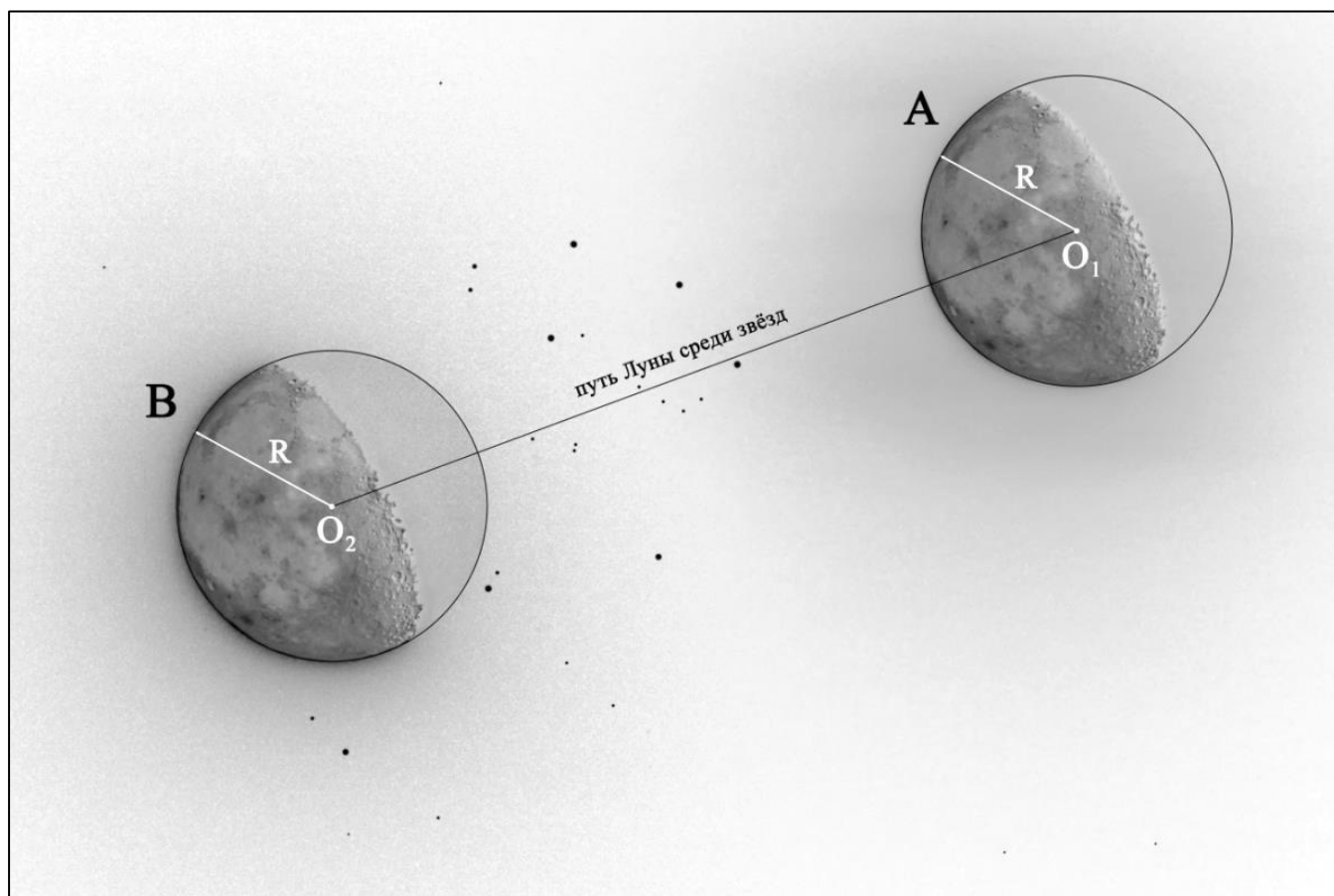
Положение Луны	Дата фотоснимка	Время снимка	Погодные условия
А	12.09.2025	22 ч 33 мин 06 сек	лёгкая облачность
В	13.09.2025	0 ч 56 мин 42 сек	ясно

Определите с помощью этих данных звёздный период обращения Луны вокруг Земли. Угловой размер Луны примите равным $32' 45''$. **Внимание**, если Вы не поясните, как получили это значение по фотографии, то баллы выставлены не будут. **Для справки:** Негативным называют изображение, на котором тёмные участки выглядят светлыми, а светлые – тёмными (т. е. цвета инвертированы).



3. «Плеяды и Луна» (8 баллов). Ответ. $\approx 26,4$ сут

Пояснение. А. Измерим диаметр изображения Луны. Б. Найдём построением на фотографии центры лунных дисков, например, методом серединных перпендикуляров, или иначе (можно даже «на глаз»). Измерим «путь» Луны O_1O_2 среди звёзд за наблюдаемый промежуток времени.



В. Заметим, что этот путь (длина отрезка O_1O_2) на снимке примерно в 2,5 раз больше диаметра лунного диска (например, диаметр 42 мм, расстояние между центрами 105 мм).

Г. Т.е., учитывая угловой размер Луны, он составляет $32' 45'' \cdot 2,5 = 32,75' \cdot 2,5 = 81.875' \approx 1,36^\circ$

Д. Определим время между снимками. От момента первой съёмки до окончания суток прошло 24 ч – 22 ч 33 мин 06 с = 1 ч 26 мин 54 с. С полуночи до второй экспозиции – ещё 0 ч 56 мин 42 с. Итого, интервал между съёмками 2 ч 23 мин 36 с $\approx 2,39$ ч. **Е.** Значит, на полный оборот в 360° Луне потребуется время равное $T = \frac{360^\circ \cdot 2,39 \text{ ч}}{1,36^\circ} \approx 632,65 \text{ ч} \approx 26,4 \text{ сут}$

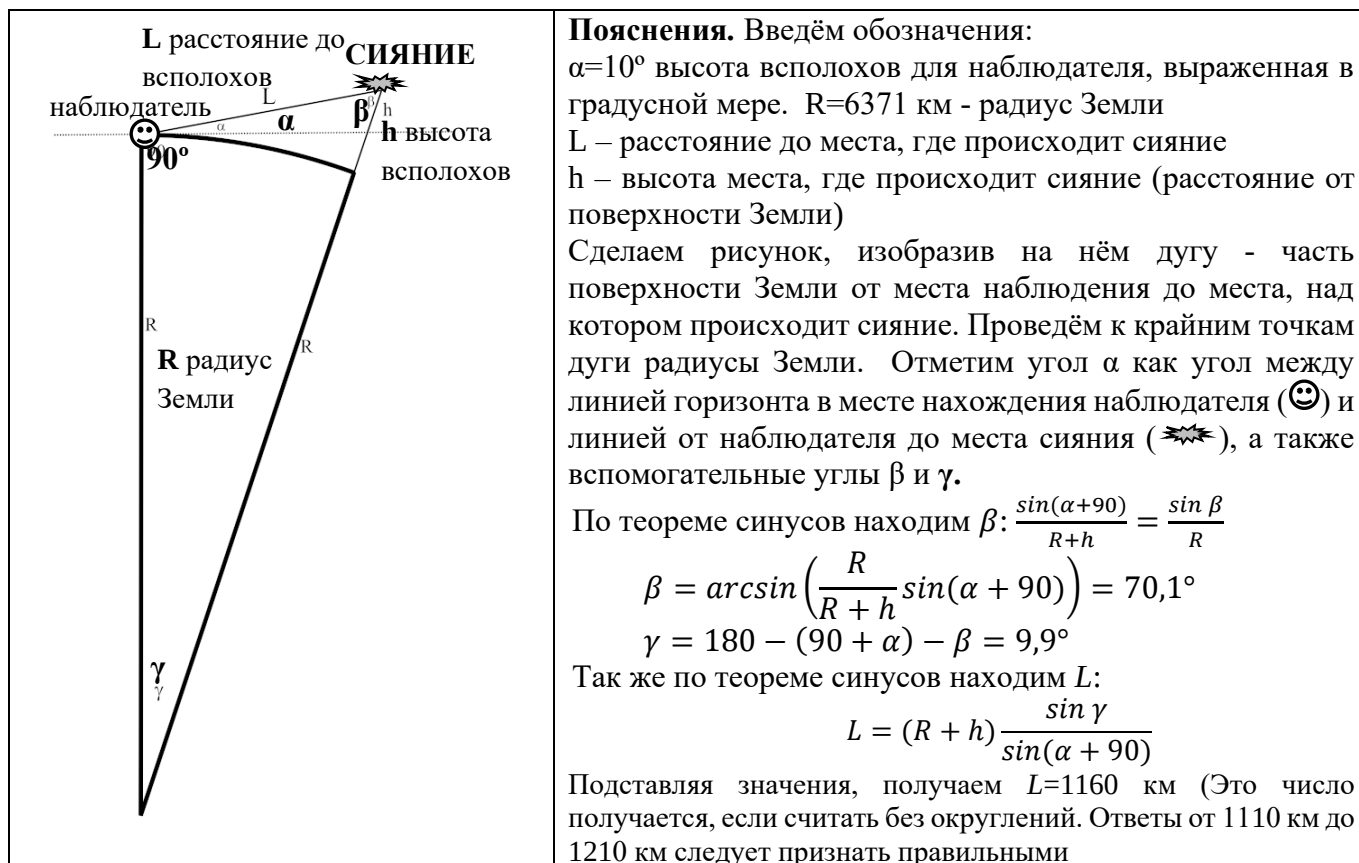
Критерии оценки. За выполнение пунктов А, Б, В, Д ставить по 1 баллу (Если пункты А и Б учтены в скрытом виде, а в явном виде выполнен пункт В, то считать, что они выполнены и ставить 3 балла за А, Б, В). Следует считать правильным, если в пункте В величина отношения попадает в интервал от 2,3 до 2,7, а при определении точности измерения пунктов А и Б, следует проверить, возможно при распечатке заданий изменился масштаб. За выполнение пунктов Г и Е ставить 2 балла, если не допущены вычислительные ошибки или 1 балл, если в расчётах имеется по одной вычислительной ошибке.

Если без каких-либо обоснований приводится ответ 27,3 сут, то баллы не ставить!

Примечание от составителей: Истинное значение звёздного периода обращения Луны составляет 27,3 суток. Погрешность возникает из-за дисторсии линз объектива, неточности совмещения фотоснимков, неточности измерений.

4. «Расстояние до сияния» (8 баллов). Высота всполохов сияния над горизонтом в Калуге в 2024 году достигала 10° . Определите расстояние от наблюдателя до верхней границы всполохов в атмосфере, где происходит сияние, если известно, что его верхняя граница находится на высоте 300 км над поверхностью Земли. Радиус Земли равен 6371 км.

4. «Расстояние до сияния» (8 баллов). Ответ: 1160 км (от 1110 км до 1210 км)



Критерии оценки. Наличие рисунка более или менее правильного оценивать в 2 балла. Если рисунок слишком простой и неточный, то ставить 1 балл. За изображение на рисунке величин, указанных в условиях добавить 2 балла, если отмечены все, или 1 балл, если правильно отмечены лишь некоторые. Если рисунка нет, но имеются некоторые верные логические рассуждения, то допускается их оценка в 1 балл.

Оставшиеся 4 балла распределяются в зависимости от правильности найденных соотношений. За полностью правильное решение ставить 8 баллов. Если ответ не найден или выбран неправильный метод определения расстояния (который приводит к неправильному ответу), но имеются разумные рассуждения, то итоговая оценка за задачу не должна превышать 5 баллов. За вычислительную ошибку снижать оценку на 1 балл.

5. «Звезда и экзопланета» (8 баллов). Жители некоторой экзопланеты (планеты, обращающейся не вокруг Солнца, а вокруг другой звезды) обладают всеми знаниями, что и жители Земли. Они измерили, что радиус их планеты равен 5000 км, что горизонтальный параллакс звезды, вокруг которой обращается их планета равен $10,3''$ (т.е. $10,3$ угловых секунд), что угловой диаметр видимого диска звезды никогда не изменяется и равен $20,7'$ (т.е. $20,7$ угловых минут), что освещенность, которую звезда создаёт на поверхности планеты (т.е. энергия звезды, которая за 1 с попадает на участок поверхности планеты площадью в 1 м^2) составляет $1600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, выяснили, что период обращения планеты вокруг звезды составляет 730 земных суток. Оцените (т.е. приблизительно вычислите): **А.** Расстояние от экзопланеты до звезды, **Б.** Радиус звезды, **В.** Массу звезды, **Г.** Плотность звезды. **Д.** Эксцентриситет орбиты экзопланеты. **Е.** Светимость звезды (т.е. энергию, излучаемую звездой за единицу времени по всем направлениям). При расчётах светимости следует пренебречь частичным поглощением атмосферой планеты света от звезды. **Ё.** Температуру видимой поверхности звезды. **Ж.** Спектральный класс звезды.

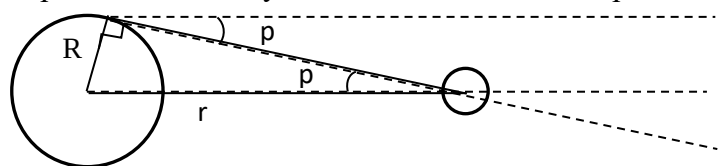
Справочные данные. Можно считать, что гравитационная постоянная равна $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$, масса Солнца $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$, земной год 365 сут, $\pi = 3$, $\pi^2 = 10$, расстояние от Земли до Солнца 1 а.е. = 150 млн км, объём шара $V = \frac{4}{3} \pi r^3$, площадь сферы $S = 4 \pi r^2$, постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$, постоянная Вина $b = 0,0029 \text{ м} \cdot \text{К}$.

5. «Звезда и экзопланета» (8 баллов). Ответы:

А. $r \approx 100$ млн км. Б. $R_{\text{зв}} \approx 300\,000$ км. В. $M \approx 1,5 \cdot 10^{29}$ кг или $M \approx 1,4 \cdot 10^{29}$ кг.

Г. $\rho_{\text{зв}} \approx 1400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $\rho_{\text{зв}} \approx 1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Д. Ноль. Е. $L \approx 6 \cdot 10^{26}$ Вт). Ё. $T \approx 9700$ К. Ж. класс О.

Пояснения. К ответу на вопрос А. Опираясь на приведённый ниже рисунок, учитывая, что параллактические углы малы, находим, что расстояние до звезды равно



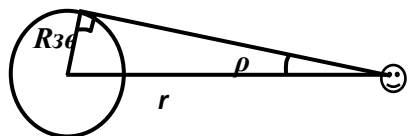
$$r = \frac{R}{\sin \rho} = \frac{R}{\rho} = \frac{R \cdot 206265''}{\rho''} \approx 100 \text{ млн км.}$$

Примечание от составителей: конечно, размеры звезды значительно больше размеров планеты, поэтому для более

точного измерения параллакса звезды используют ещё один небесный объект (ещё одна планета или астероид), обращающийся вокруг звезды, который в определённый момент оказывается в нижнем соединении или в противостоянии. Измеряют параллакс этого объекта, а затем, учитывая третий закон Кеплера и периоды обращения вокруг звезды планеты и этого объекта, вычисляют параллакс звезды. Но идея измерения годичного параллакса звезды именно такая, какая отражена на рисунке и данное соотношение правильное.

К ответу на вопрос Б. Опираясь на приведённый ниже рисунок, находим, что расстояние до

$$\text{звезды равно } R_{\text{зв}} = r \cdot \sin \rho = r \cdot \rho(\text{пк}) = \frac{r \cdot \rho''}{206265''}$$



$$R_{\text{зв}} = \frac{100 \cdot 10^6 \text{ км} \cdot 20,7 \cdot 60}{2 \cdot 206265} \approx 300\,000 \text{ км.}$$

К ответу на вопрос В. Массу звезды можно найти

$$\text{— либо из динамики движения планеты вокруг звезды } \frac{m \cdot v^2}{r} = G \frac{m \cdot M}{r^2}$$

взаимосвязи скорости v с периодом обращения T с получением расчётной формулы $M = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2}$,

— либо с записью уточнённого третьего закона Кеплера в виде $\frac{T^2 M}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G}$ и получаем этой же формулы,

— либо с записью третьего закона Кеплера для двух систем принимая в качестве второй системы систему Земля-Солнце, в том числе, учитывая, что радиус орбиты планеты составляет 2/3 радиуса орбиты Земли, а период равен двум земным годам, с получением расчётной формулы в виде $M = M_{\text{солнца}} \left(\frac{T_{\text{земли}}}{T} \right)^2 \cdot \left(\frac{r}{r_{\text{земли}}} \right)^3$.

Понятно, что жители экзопланеты могли не знать про особенности системы Земля-Солнце, но участники олимпиады, но мы, земляне, могли использовать любую из этих формул. В зависимости от погрешности округления результаты $M \approx 1,5 \cdot 10^{29}$ кг и $M \approx 1,4 \cdot 10^{29}$ кг будем считать правильными.

К ответу на вопрос Г. Плотность звезды находим по формуле $\rho_{\text{зв}} = \frac{3M}{4\pi R_{\text{зв}}^3}$. В зависимости от найденного значения массы ответы $\rho_{\text{зв}} \approx 1400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $\rho_{\text{зв}} \approx 1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ считаем правильными.

К ответу на вопрос Д. Поскольку угловой диаметр звезды не меняется, значит не меняется и расстояние от планеты до звезды, следовательно планета движется по окружности, эксцентриситет такой орбиты равен нулю.

К ответу на вопрос Е. Взаимосвязь светимости и освещенности отражает формула $L = 4\pi r^2 E$. Подставив числовые данные, получим $L \approx 6 \cdot 10^{26}$ Вт

К ответу на вопрос Ё. Связь температуры звезды со светимостью и радиусом отражает формула

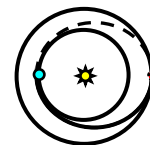
$$L = 4\pi R_{\text{зв}}^2 \cdot \sigma \cdot T^4, \text{ откуда } T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R_{\text{зв}}^2 \cdot \sigma}}. \text{ Подставив числовые данные, получаем } T \approx 9700 \text{ К.}$$

К ответу на вопрос Ж. Спектральному классу О принадлежат звёзды, температура поверхности которых находится в интервале приблизительно от 9000 К до 11000 К.

Критерии оценки. За каждый правильный ответ на вопросы ставить 1 балл при наличии обоснования. При отсутствии обоснования баллы не ставить. Для обоснования рисунки не обязательны, ученики могут помнить формулы, следующие из этих рисунков, но в тех случаях, когда применяется расчётная формула, эта формула должна быть записана. Если сделана

вычислительная ошибка, то оценка снижается на полбалла, но итоговая оценка за задачу должна быть округлена до целого с избытком (в большую сторону).

6. «Перелёт между экзопланетами» (8 баллов). Жители некоторой экзопланеты собрались отправить космический зонд на соседнюю планету, обращающуюся вокруг этой же звезды. К моменту принятия решения они знали все законы, которые знаем и мы, земляне. При этом они установили, что период обращения их планеты вокруг звезды равен 400 земных суток, измерили годичный параллакс своей звезды, который всегда остаётся постоянным, выяснили, что годичный параллакс второй планеты, когда она оказывается в противостоянии, периодически изменяется в интервале от $\frac{1}{6}$ годичного параллакса звезды, до 2 годичных параллаксов звезды. Определите минимальное время, за которое космический зонд сможет долететь до второй планеты, если он будет лететь по траектории Цандера (Цандера-Гомона). **Для справки:** траектория Цандера представляет собой половину эллипса, касающегося орбит планет, между которыми осуществляется перелёт (см. рисунок). Эта орбита является наиболее экономичной по расходу топлива.



6. «Перелёт между экзопланетами» (8 баллов). **Ответ.** 280 сут или 275 сут в зависимости от погрешности округления. **Пояснение.** Поскольку параллакс звезды не меняется, значит первая планета (с которой стартует зонд) движется по круговой орбите. Поскольку вторая планета может находиться в противостоянии, то она располагается дальше от звезды, чем первая. Поскольку параллакс второй планеты в противостоянии изменяется, то орбита этой планеты эллиптическая. Значит для старта зонда следует выбрать такой момент, что когда он достигнет орбиты второй планеты, эта планета будет находиться на самом маленьком удалении от звезды, т.е. в перигеуме своей орбиты. Тогда большая полуось эллиптической орбиты Цандера будет равна полусумме радиуса орбиты первой планеты и перицентрического расстояния второй планеты. Из третьего закона Кеплера можно записать $\left(\frac{T_{\text{Ц}}}{T_1}\right)^2 = \left(\frac{0,5(r_1 + r_{\text{п}})}{r_1}\right)^3$, (1)

откуда, учитывая, что время перелёта равно половине периода обращения по орбите Цандера, получаем $\tau = 0,5T_{\text{Ц}} = 0,5T_1 \sqrt{\left(\frac{1}{2}\left(1 + \frac{r_{\text{п}}}{r_1}\right)\right)^3}$. Связь годичного параллактического угла с радиусом планеты наблюдателя и расстоянием до исследуемого объекта отражает формула $r = \frac{R}{\sin p} = \frac{R}{p}$, (2)

учитывающая малость углов. Т.е. чем больше параллакс объекта, тем он ближе. Поэтому для определения перицентрического расстояния второй планеты выбираем параллакс, который больше параллакса звезды в 2 раза $p_{\text{п}} = 2p_{\text{зв}}$. Учитывая, что в противостоянии расстояние до второй планеты равно разности её перицентрического расстояния и радиуса орбиты первой планеты, получаем соотношение $\frac{p_{\text{зв}}}{p_{\text{п}}} = \frac{r_{\text{п}} - r_1}{r_1}$ (3)

Из него получаем $1 + \frac{r_{\text{п}}}{r_1} = 2 + \frac{p_{\text{зв}}}{p_{\text{п}}}$. Следовательно, время перелёта можно рассчитать по формуле

$$\tau = 0,5T_1 \left(1 + \frac{p_{\text{зв}}}{2p_{\text{п}}}\right) \sqrt{\left(1 + \frac{p_{\text{зв}}}{2p_{\text{п}}}\right)} \quad (4)$$

Подставив числовые данные, получаем $\tau \approx 280$ сут, если почти без округления или 275 сут, если вычисления проводить с промежуточными округлениями.

Критерии оценки. За утверждение, что орбита первой планеты круговая ставить 1 балл

За получение формулы (1) даже в скрытом виде ставить 1 балл.

За учёт, что перелёт занимает половину периода движения по орбите Цандера ставить 1 балл.

За учёт формулы (2) ставить 1 балл. За правильный выбор параллактического угла ставить 1 балл

За учёт соотношения (3) ставить 1 балл

Получение итоговой расчётной формулы (4) или её использование по частям с выходом на ответ ставить 1 балл. Получение правильного ответа ставить 1 балл.

Если вместо перицентрического расстояния взяли апоцентрическое или неправильно выбран параллактический угол, то итоговая оценка не должна превышать 4 баллов.