

Всероссийская олимпиада школьников по астрономии
Муниципальный этап, теоретический тур
2021/2022 учебный год
10 класс

Решения задач и критерии их оценивания

№ 1. «Объекты глубокого космоса и их некоторые свойства»

Условие. На рис. 1 представлены фотографии четырех объектов глубокого космоса. Определите (I) тип каждого объекта, (II) его обозначение по каталогу Мессье, (III) созвездие в котором он находится, (IV) статус возможности его наблюдения невооруженным глазом (в оптимальных условиях) и заполните табл. 1. В строках (I)-(III) необходимо прописать буквенное обозначение данного объекта согласно рисунку. В строке (IV) необходимо написать «да», если объект можно увидеть невооруженным глазом (в оптимальных условиях), «нет» – если нельзя увидеть.

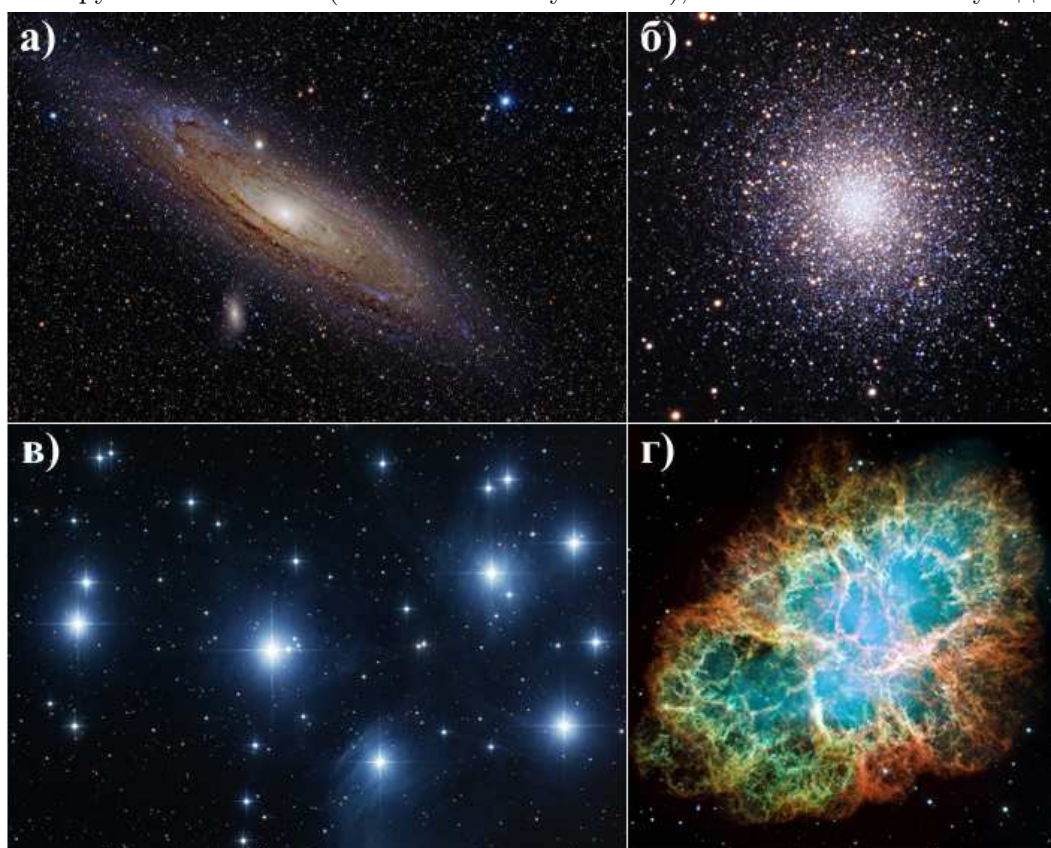


Рис. 1. Объекты глубокого космоса.

	Тип объекта	Галактика	Туманность	Шаровое скопление	Рассеянное скопление
I	Обозначение				
	По каталогу Мессье	M11	M31	M31	M45
II	Обозначение				
	Созвездие	Андромеда	Геркулес	Телец	
III	Обозначение				
	Обозначение	а)	б)	в)	г)
IV	Видимость невооруженным глазом				

Таблица 1. Возможные типы объектов, их обозначения по каталогу Мессье, принадлежность созвездиям и возможность их наблюдения невооруженным глазом.

Решение. Табл. 1 следует правильно заполнить так, как показано в табл. 2.

	Тип объекта	Галактика	Туманность	Шаровое скопление	Рассеянное скопление
I	Обозначение	а)	г)	б)	в)
	По каталогу Мессье	M1	M13	M31	M45
II	Обозначение	г)	б)	а)	в)
	Созвездие	Андромеда	Геркулес	Телец	
III	Обозначение	а)	б)	в), г)	
	Обозначение	а)	б)	в)	г)
IV	Видимость невооруженным глазом	да	да	да	нет

Таблица 2. Определенные типы объектов, их обозначения по каталогу Мессье, принадлежность созвездиям и возможность их наблюдения невооруженным глазом.

Ответ: представлен в табл. 2.

Рекомендации для жюри.

Выполненная часть решения задачи	Балл
Корректное определение одной ячейки	0.5(16)

№ 2. «Высота Луны над горизонтом в г. Самаре»

Условие. Определите интервал возможных значений для высоты Луны, в ее верхней кульминации, в г. Самаре ($\varphi_S = 53^\circ 12'$). В какие месяцы года могут достигаться экстремальные значения ее высоты в полнолуние? При каких условиях? Как часто такое происходит?

Решение. Как известно, эклиптика составляет с небесным экватором угол $\varepsilon = 23^\circ 26'$. Наклонение орбиты Луны к плоскости эклиптики составляет угол $i_\zeta = 5^\circ 09'$. Следовательно склонение Луны может изменяться в пределах следующего интервала:

$$-(\varepsilon + i_\zeta) \leq \delta_\zeta \leq (\varepsilon + i_\zeta), \text{ где } -28^\circ 35' \leq \delta_\zeta \leq +28^\circ 35'. \quad (1)$$

Высота Луны в верхней кульминации (к югу от зенита) в г. Самаре составляет

$$h_\zeta = 90^\circ - \varphi_S + \delta_\zeta. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) вытекает следующий интервал возможных значений для высоты Луны в верхней кульминации:

$$8^\circ 13' \leq h_\zeta \leq 65^\circ 23'. \quad (3)$$

Луна достигает своей максимальной высоты в полнолуние, если последняя находится в окрестности точки летнего солнцестояния (E_S), а Солнце при этом – в окрестности точки зимнего солнцестояния, т.е. в декабре. При этом склонение Луны должно быть больше склонения точки E_S на величину i_ζ , что достигается в случае, когда узлы орбиты Луны расположены вблизи точек весеннего и осеннего равноденствий. Как известно, плоскость лунной орбиты прецессирует с периодом $P_\zeta = 18.6$ лет. Поэтому данное событие может повторяться не чаще чем через промежуток P_ζ .

Луна достигает своей минимальной высоты в полнолуние, если последняя находится в окрестности точки зимнего солнцестояния (E_W), а Солнце при этом – в окрестности точки летнего солнцестояния, т.е. в июне. При этом склонение Луны должно быть меньше склонения точки E_W на величину i_ζ , что достигается, как и в предыдущем случае, когда узлы орбиты Луны расположены вблизи точек весеннего и осеннего равноденствий. Данное событие не может повторяться чаще чем через промежуток P_ζ .

Ответ: к задаче представляется интервалом (3); июнь, декабрь; узлы орбиты Луны должны быть расположены вблизи точек весеннего и осеннего равноденствий; повторяются не чаще чем через 18.6 лет.

Рекомендации для жюри.

Выполненная часть решения задачи	Балл
Определен интервал возможных значений для высоты Луны, в ее верхней кульминации, в г. Самаре	2
Определены месяцы года, в которые могут достигаться Луной экстремальные значения высоты в полнолуние	2
Корректно определены условия взаимного расположения узлов орбиты и точек равноденствий	2
Правильно определена периодичность таких событий	2

№ 3. «Далёкие звезды и их параллаксы»

Условие. Как известно, минимальный годичный параллакс, который еще можно достаточно точно измерить с поверхности Земли для далёкой звезды составляет $0.003''$. Чему будет равно максимально возможное расстояние до звезды, для которой еще можно с помощью тех же инструментов, с тем же разрешением измерить годичный параллакс другой далёкой звезды, если все его измерения провести в окрестности Юпитера? Ответ представьте в парсеках, световых годах, астрономических единицах. Во сколько раз, в этом случае, изменится продолжительность эксперимента по измерению параллакса далёкой звезды (по сравнению с земными экспериментами)? Орбиту Юпитера считать круговой.

Решение. 1. Как известно, расстояние (r) от Солнца до небесного тела можно определить через годичный параллакс (π , подразумевается, что последний выражен в радианах) и большую полуось ($a_{\oplus}$) земной орбиты из прямоугольного треугольника $\triangle STP_1$ (см. рис. 2, здесь буквой S обозначено положение Солнца, T – положение далёкой звезды до которой определяется гелиоцентрическое расстояние, P_1 – исходное положение планеты, с которой проводится определение расстояния до звезды):

$$r = \frac{a_{\oplus}}{\sin \pi} \approx \frac{a_{\oplus}}{\pi}, \quad (4)$$

при записи последнего учтено, что годичный параллакс всегда является малой величиной, и поэтому можно воспользоваться приближением вида: $\sin x \approx x$, при $x \ll 1$. Учтем далее, что $1 \text{ пк} = 206265 \cdot a_{\oplus} = 206265 \text{ а.е.}$ Параллакс, выраженный в секундах π'' , связан с параллаксом, выраженным в радианах, выражением вида: $\pi'' = 206265 \cdot \pi$. Тогда расстояние, выраженное в парсеках, связано с параллаксом (π'') выражением вида:

$$r_{\max}^{(\oplus)} = \frac{1}{\pi''_{\min}} = 333.3 \text{ пк.}$$

Последний результат – максимальное возможное расстояние до звезды, которое еще может быть измерено с помощью тригонометрического метода определения расстояния с использованием минимального значения годичного параллакса с орбиты Земли.

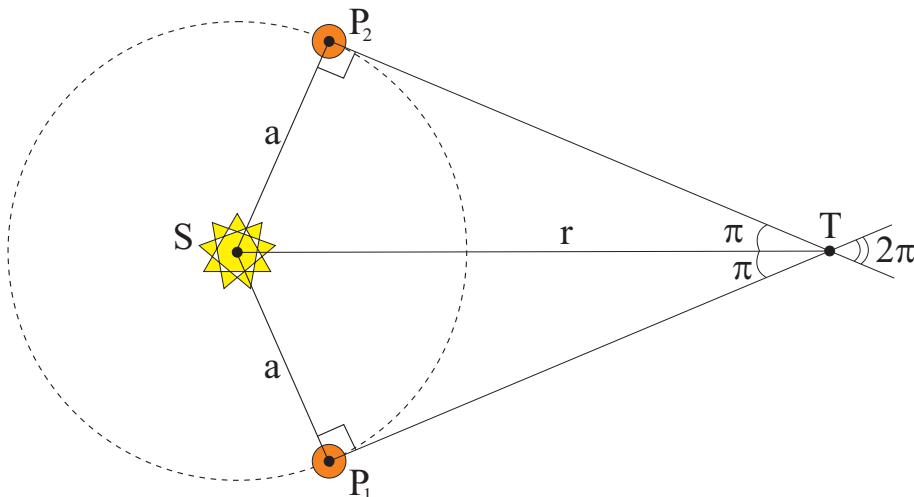


Рис. 2. К определению годичного параллакса далёкой звезды.

При проведении эксперимента в окрестности Юпитера выражение (4) следует переписать так:

$$r_{\max}^{(J)} = \frac{a_J}{\pi_{\min}} = \frac{5.2028 \text{ пк}}{\pi''_{\min}} = 5.2028 \cdot r_{\max}^{(\oplus)} = 1734 \text{ пк} = 5653 \text{ св.л.} = 3.58 \cdot 10^8 \text{ а.е.} \quad (5)$$

2. Измерение минимального значения годичного параллакса можно определить в двух крайних положениях (P_1 и P_2) планеты (см. рис. 2). При этом, фактически, измеряется угол $2\pi_{\min}$ как минимально возможный угол, который еще может быть определен с помощью используемой аппаратуры. В силу исключительной малости угла π , данные точки являются фактически диаметрально противоположными, следовательно продолжительность такого эксперимента должна составлять $T/2$, где T – сидерический период обращения планеты вокруг Солнца. Если в окрестности Земли продолжительность такого эксперимента 0.5 лет, то в окрестности Юпитера его продолжительность составит $T_J/2 = 5.931$ года. Следовательно продолжительность эксперимента увеличится в 11.86 раза (по сути это отношение $T_J/T_{\oplus}$).

Ответ: к задаче представлен формулой (5); увеличится в 11.86 раза.

Рекомендации для жюри.

Выполненная часть решения задачи	Балл
Корректное определение максимально возможного расстояния до звезды, при определении годичного параллакса в окрестности Юпитера	5
Правильное определение изменения продолжительности эксперимента по изменению параллакса далекой звезды	3

№ 4. «Сидерический период искусственного спутника Луны»

Условие. Определите интервал возможных значений для сидерического периода обращения искусственного спутника Луны (ИСЛ). Следует учесть, что орбита ИСЛ должна лежать полностью внутри сферы Хилла, радиус которой не может быть больше расстояния r_{L1} от центра Луны до первой точки Лагранжа системы «Земля-Луна»:

$$r_{L1} = a_{\zeta} \sqrt[3]{\frac{1}{3} \frac{\mathfrak{M}_{\zeta}}{\mathfrak{M}_{\oplus} + \mathfrak{M}_{\zeta}}}, \quad (6)$$

здесь a_{ζ} – большая полуось орбиты Луны, $\mathfrak{M}_{\oplus}$, $\mathfrak{M}_{\zeta}$ – значения масс Земли и Луны соответственно.

Решение. Прежде всего, определим интервал возможных значений для большой полуоси искусственного спутника Луны (ИСЛ). Очевидно, минимальное значение большой полуоси орбиты не может быть меньше радиуса Луны, т.е. $a_{\zeta}^{(\min)} = \mathfrak{R}_{\zeta} = 1738$ км. Максимальное значение большой полуоси орбиты ИСЛ, очевидно, не может быть больше радиуса $r_{L1} = 0.159 \cdot a_{\zeta} = 61274$ км. Следовательно, большая полуось орбиты ИСЛ должна принадлежать интервалу:

$$1738 \text{ км} \leq a_{\zeta} \leq 61274 \text{ км.} \quad (7)$$

Далее определим минимальное значение сидерического периода обращения ИСЛ вокруг Луны:

$$T_{\zeta}^{(\min)} = \frac{2\pi \mathfrak{R}_{\zeta}}{V_{\zeta}^{(I)}} = \frac{2\pi \mathfrak{R}_{\zeta}}{\sqrt{\frac{G \mathfrak{M}_{\zeta}}{\mathfrak{R}_{\zeta}}}} = \frac{2\pi \mathfrak{R}_{\zeta}^{3/2}}{\sqrt{G \mathfrak{M}_{\zeta}}} = 6500 \text{ с} = 1.806 \text{ часа.} \quad (8)$$

Далее воспользуемся третьим законом Кеплера:

$$\left(\frac{T_{\zeta}^{(\max)}}{T_{\zeta}^{(\min)}} \right)^2 = \left(\frac{a_{\zeta}^{(\max)}}{a_{\zeta}^{(\min)}} \right)^3, \Rightarrow T_{\zeta}^{(\max)} = T_{\zeta}^{(\min)} \left(\frac{a_{\zeta}^{(\max)}}{a_{\zeta}^{(\min)}} \right)^{3/2} = 15.75 \text{ сут.}$$

В результате интервал возможных значений для сидерического периода обращения ИСЛ есть

$$1.806 \text{ часа} \leq T_{\zeta} \leq 15.75 \text{ сут.} \quad (9)$$

Ответ: представляется интервалом (9).

Рекомендации для жюри.

Выполненная часть решения задачи	Балл
Определение ИВЗ для большой полуоси в виде (7)	2
Определение минимального значения для сидерического периода обращения ИСЛ в виде (8)	3
Определение ИВЗ (9) для сидерического периода обращения ИСЛ	3

№ 5. «Самарский школьник на территории Эквадора»

Условие. Один самарский школьник отправился в путешествие, в Эквадор, который как известно находится на земном экваторе. По прибытию он внезапно обнаружил, что продолжительность дня здесь не остается постоянной в течение года. Определите три главные причины изменения продолжительности дня в Эквадоре. Оцените, насколько меняется продолжительность дня и в какое время года она достигает максимума.

Решение. 1. Определим продолжительность дня на экваторе в моменты равноденствий, пренебрегая уравнением времени. Началом дня считается момент восхода над горизонтом верхнего края солнечного диска, а окончанием – момент захода верхнего края. В оба момента истинная высота центра видимого диска Солнца (истинного Солнца) над горизонтом равна

$$h_{\odot} = -(\bar{\rho}_{\odot} + \delta z_H) = -51'.$$

Здесь $\bar{\rho}_{\odot}$ – угловой радиус Солнца, который во время равноденствия близок к своему среднему значению, равному $16'$; δz_H – атмосферная рефракция на горизонте, составляющая $35'$. В дни равноденствий Солнце на экваторе описывает за сутки большой круг небесной сферы (небесный экватор), перпендикулярный горизонту и проходящий через зенит и надир. Продолжительность дня составит

$$\tau_0 = 12^{\text{ч}}00^{\text{м}} + 2\frac{h_{\odot}}{\omega_{\oplus}} \approx 12^{\text{ч}}07^{\text{м}},$$

здесь $\omega_{\oplus}$ – угловая скорость вращения Земли и видимого перемещения Солнца по экватору.

2. 1-ая причина – непостоянство угловой скорости видимого движения Солнца. В другие дни, когда склонение Солнца ($\delta_{\odot}$) отлично от нуля, угловая скорость видимого перемещения Солнца по небосводу составит величину $\omega_{\text{vis}} = \omega_{\oplus} \cdot \cos \delta_{\odot}$. Значит изменение продолжительности Солнца над горизонтом увеличится на величину:

$$\Delta\tau_1 = 2\frac{h_{\odot}}{\omega_{\oplus}} \left(\frac{1}{\cos \delta_{\odot}} - 1 \right). \quad (10)$$

Очевидно, последняя величина достигает максимального значения в случае максимального (минимального) значения склонения Солнца, т.е. в дни солнцестояний, где $\delta_{\odot} = \pm 23^{\circ}26'$. В эти дни $\Delta\tau_1 = 0.61$ мин.

3. 2-ая причина – эллиптичность земной орбиты и ее наклон к плоскости земного экватора.

Как известно, эллиптичность орбиты Земли и ее наклон к плоскости земного экватора приводят к непостоянству скорости изменения прямого восхождения Солнца, а значит и к изменению продолжительности истинных солнечных суток, которое можно записать так

$$T_{\odot} = 24^{\text{ч}} + \Delta\eta,$$

здесь η – изменение уравнения времени за одни сутки (см. рис. А.1 §9 раздела "Дополнительные справочные данные"). Соответствующее приращение продолжительности светового дня, равного примерно половине суток, составит

$$\Delta\tau_2 \approx \frac{\eta}{2}.$$

Эта величина составляет примерно -0.10 мин/сут и -0.15 мин/сут в день весеннего и осеннего равноденствий, $+0.11$ мин/сут во время летнего солнцестояния и $+0.28$ мин/сут во время зимнего солнцестояния.

4. 3-ая причина – изменение углового радиуса Солнца, обусловленное эллиптичностью орбиты Земли.

Определим изменение углового радиуса Солнца в моменты его пребывания в перигелии (2-5.01) и афелии (3-7.07) орбиты относительно дня равноденствия:

$$\Delta \rho''_{\odot} = \frac{\Re_{\odot}}{a_{\oplus}(1 - \varepsilon_{\oplus})} - \frac{\Re_{\odot}}{a_{\oplus}} \approx \frac{\Re_{\odot}}{a_{\oplus}}(1 + \varepsilon_{\oplus} - 1) = \rho''_{\odot} \varepsilon_{\oplus} = 0.27'. \quad (11)$$

Соответствующее изменение суток составит $\Delta \tau_3 = 2\Delta \rho''_{\odot}/(\omega_{\oplus} \cos \delta_{\odot}) = 0.04$ мин. Именно на такую величину увеличивается продолжительность суток в окрестности зимнего солнцестояния и уменьшается в окрестности летнего солнцестояния.

5. Подводя итог, можно утверждать, что среди приращений $\Delta \tau_1 \div \Delta \tau_3$ самыми большими являются $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_2$. Увеличение продолжительности суток в окрестности летнего солнцестояния (июнь) составит $\Delta \tau_s = \Delta \tau_1 + \Delta \tau_2 - \Delta \tau_3 = 0.68$ мин ≈ 0.7 мин, а в день зимнего солнцестояния (декабрь) – $\Delta \tau_w = \Delta \tau_1 + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_3 = 0.90$ мин, нежели в марте и сентябре.

Рекомендации для жюри.

Выполненная часть решения задачи	Балл
Оценка продолжительности дня (τ_0) на экваторе, с учетом конечности размеров видимого диска Солнца и рефракции света	2
Корректное определение трех причин изменения суток и их пояснение на качественном уровне	3
Расчет приращений $\Delta \tau_1 \div \Delta \tau_3$ и определение дней с максимальной продолжительностью	3

№ 6. «Блеск метеора и скорость метеороида, породившего его»

Условие. Некоторый метеороид входит в атмосферу Земли вдоль отвесной линии с минимально возможной скоростью и наблюдается в зените как метеор 6-ой звездной величины. Какова будет звездная величина метеора, наблюдающегося в зените, при сгорании в атмосфере такого же метеороида, входящего в атмосферу Земли по отвесной линии с максимально возможной скоростью?

Решение. Прежде всего, определим минимальное и максимальные значения скорости вхождения метеороида в атмосферу Земли.

1. Очевидно, минимальное значение скорости будет достигаться в случае, когда метеороид движется вслед за Землей с той же орбитальной скоростью относительно Солнца, что и Земля. Падение метеороида будет обусловлено лишь притяжением Земли, следовательно можно записать закон сохранения полной механической энергии метеороида относительно Земли:

$$0 = \frac{m V_{\min}^2}{2} - \frac{G m \mathfrak{M}_{\oplus}}{\Re_{\oplus}}, \Rightarrow V_{\min} = \sqrt{\frac{2 G \mathfrak{M}_{\oplus}}{\Re_{\oplus}}} = 11.19 \text{ км/с}. \quad (12)$$

2. Если метеороид приходит с окраин Солнечной системы, где находится его афелий, то его скорость относительно Солнца в данной точке близка к нулю. При этом, в силу большой удаленности данного тела от Солнца и Земли, их потенциальная энергия гравитационного взаимодействия пренебрежимо мала. Следовательно, полная механическая энергия метеороида в афелии была равна нулю. Согласно закону сохранения энергии, полная энергия данного тела у поверхности Земли будет равна

$$\frac{m V_m^2}{2} - \frac{G m \mathfrak{M}_{\odot}}{a_{\oplus}} - \frac{G m \mathfrak{M}_{\oplus}}{\Re_{\oplus}} = 0, \Rightarrow V_m = \sqrt{2 G \left(\frac{\mathfrak{M}_{\odot}}{a_{\oplus}} + \frac{\mathfrak{M}_{\oplus}}{\Re_{\oplus}} \right)} = 43.59 \text{ км/с},$$

здесь $\mathfrak{M}_{\odot}, \mathfrak{M}_{\oplus}, m$ – массы Солнца, Земли и метеороида соответственно ($\mathfrak{M}_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30}$ кг, $\mathfrak{M}_{\oplus} = 5.974 \cdot 10^{24}$ кг); $G = 6.674 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг² – универсальная гравитационная постоянная; $a_{\oplus} = 1.496 \cdot 10^{11}$ м – радиус (большая полуось) земной орбиты; $\Re_{\oplus} = 6371$ км – средний радиус Земли; V_m – скорость (гелиоцентрическая) метеороида относительно центра Солнца, по сути, это его вторая космическая скорость относительно двух силовых центров – Солнца и Земли.

Скорость метеороида относительно Земли будет определяться выражением:

$$\vec{V}_{\text{отн}} = \vec{V}_m - \vec{V}_{\oplus}, \Rightarrow V_{\text{отн}} = \sqrt{V_m^2 + V_{\oplus}^2 - 2V_m V_{\oplus} \cos \alpha},$$

здесь $\vec{V}_{\oplus}$ – вектор гелиоцентрической скорости Земли, модуль которой определяется выражением вида:

$$V_{\oplus} = \frac{2\pi a_{\oplus}}{T_{\oplus}} = 29.79 \text{ км/с},$$

α – угол между векторами $\vec{V}_m$ и $\vec{V}_{\oplus}$. Из (13) следует, что $\vec{V}_{\text{отн}}$ будет принимать максимальное значение в случае, когда вектора $\vec{V}_m$ и $\vec{V}_{\oplus}$ противоположно направлены ($\alpha = \pi$), т.е. движутся навстречу друг другу. Тогда

$$V_{\text{max}} = V_m + V_{\oplus} = 73.38 \text{ км/с}. \quad (13)$$

Т.о., скорость вхождения метеороида в атмосферу Земли должна принадлежать интервалу:

$$11.19 \text{ км/с} \leq V \leq 73.78 \text{ км/с}$$

3. При входе в земную атмосферу, на метеороид, с стороны последней, действует сила сопротивления, которая пропорциональна квадрату скорости данного тела. Она совершает работу ΔA за любой малый промежуток времени Δt . Поскольку данная сила является диссипативной, то она необратимо переводит механическую энергию метеороида во внутреннюю, часть χ которой идет на видимое излучение. Мощность данной силы есть

$$P_d = \frac{\Delta A}{\Delta t} = F_d V = k V^2 \cdot V = k V^3,$$

где k – размерный коэффициент пропорциональности. Тогда освещенность, создаваемая метеороидом у поверхности Земли, есть

$$E = \frac{\chi \cdot P_d}{4\pi h^2} = \frac{\chi k V^3}{4\pi h^2}, \quad (14)$$

здесь h – высота возгорания метеороида в атмосфере Земли. Пренебрегая слабыми зависимостями параметров χ и h от V , можно смело утверждать, что отношение максимальной и минимальной освещенностей, создаваемых метеороидом у поверхности Земли, сводится к кубу отношения максимального и минимального значений скорости:

$$\frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}} = \left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right)^3 = 286.8.$$

С использованием формулы Погсона вычислим искомую звездную величину:

$$\begin{aligned} m_{\text{max}} - m_{\text{min}} &= -2.5 \lg \left(\frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}} \right) = -7.5 \lg \left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right), \Rightarrow \\ m_{\text{max}} &= m_{\text{min}} - 7.5 \lg \left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right) = -0.14^{\text{m}} \approx -0.1^{\text{m}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Ответ: к задаче представлен результатом (15).

Рекомендации для жюри.

Выполненная часть решения задачи	Балл
Определены минимальное (12) + максимальное (13) значения скорости вхождения метеороида в атмосферу	2+2
Определена освещенность (14), создаваемая метеороидом у поверхности Земли	2
Корректно определена (с использованием формулы Погсона) искомая звездная величина	2

На решение задач муниципального этапа олимпиады по астрономии школьникам отводится 4 часа.

Основные справочные данные

§1. Основные физические и астрономические постоянные

- Гравитационная постоянная – $G = 6.674 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
- Скорость света в вакууме – $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
- Универсальная газовая постоянная – $R = 8.31 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
- Постоянная Стефана-Больцмана – $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-4}$
- Масса протона – $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
- Масса электрона – $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
- Астрономическая единица – $1 \text{ а.е.} = 1.496 \cdot 10^{11} \text{ м}$
- Парсек – $1 \text{ пк} = 206265 \text{ а.е.} = 3.086 \cdot 10^{16} \text{ м}$
- Постоянная Хаббла – $H = 72 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$

§2. Данные о Солнце

- Радиус – $6.955 \cdot 10^5 \text{ км}$
- Масса – $1.989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
- Светимость – $3.827 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$
- Спектральный класс – G2
- Видимая звездная величина – -26.74^m
- Абсолютная болометрическая звездная величина – $+4.83^m$
- Показатель цвета (B-V) – $+0.67^m$
- Эффективная температура – 5778 К
- Средний горизонтальный параллакс – $8.794''$
- Интегральный поток энергии на расстоянии Земли – 1360 Вт/м^2
- Поток энергии в видимых лучах на расстоянии Земли – 600 Вт/м^2

§3. Данные о Земле

- Эксцентриситет орбиты – 0.017
- Тропический год – 365.24219 сут
- Средняя орбитальная скорость – 29.8 км/с
- Период вращения – $23 \text{ часа } 56 \text{ минут } 04 \text{ секунды}$
- Наклон экватора к эклиптике на эпоху 2000.0 – $23^\circ 26' 21.45''$
- Экваториальный радиус – 6378.14 км
- Полярный радиус – 6356.77 км
- Масса – $5.974 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
- Средняя плотность – $5.52 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$
- Объемный состав атмосферы – N_2 (78%), O_2 (21%), Ar ($\sim 1\%$)

§4. Данные о Луне

- Среднее расстояние от Земли – 384400 км
- Минимальное расстояние от Земли – 356410 км
- Максимальное расстояние от Земли – 406700 км
- Эксцентриситет орбиты – 0.055
- Наклон плоскости орбиты к эклиптике – $5^\circ 09'$
- Сидерический (звездный) период обращения – 27.321662 сут
- Синодический период обращения – 29.530589 сут

- Радиус – 1738 км
- Масса – $7.348 \cdot 10^{22}$ кг или 1/81.3 массы Земли
- Средняя плотность – $3.34 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$
- Визуальное геометрическое альbedo – 0.12
- Видимая звездная величина в полнолуние – -12.7^m

§5. Физические характеристики Солнца и планет

Планета	Масса		Радиус		Плотность	Период вращения вокруг оси	Наклон экватора к плоскости орбиты	Геометрич. альbedo	Вид. звездная величина*
	кг	массы Земли	км	радиусы Земли					
Солнце	$1.989 \cdot 10^{30}$	332946	695500	108.97	1.41	25.380 сут	7.25	–	-26.8^m
Меркурий	$3.302 \cdot 10^{23}$	0.05271	2439.7	0.3825	5.42	58.646 сут	0.00	0.10	-0.1
Венера	$4.869 \cdot 10^{24}$	0.81476	6051.8	0.9488	5.20	243.019 сут [†]	177.36	0.65	-4.4^m
Земля	$5.974 \cdot 10^{24}$	1.00000	6378.1	1.0000	5.52	23.934 час	23.45	0.37	–
Марс	$6.419 \cdot 10^{23}$	0.10745	3397.2	0.5326	3.93	24.623 час	25.19	0.15	-2.0^m
Юпитер	$1.899 \cdot 10^{27}$	317.94	71492	11.209	1.33	9.924 час	3.13	0.52	-2.7^m
Сатурн	$5.685 \cdot 10^{26}$	95.181	60268	9.4494	0.69	10.656 час	25.33	0.47	0.4^m
Уран	$8.683 \cdot 10^{25}$	14.535	25559	4.0073	1.32	17.24 час [†]	97.86	0.51	5.7^m
Нептун	$1.024 \cdot 10^{26}$	17.135	24746	3.8799	1.64	16.11 час	28.31	0.41	7.8^m

* для наибольшей элонгации Меркурия и Венеры и среднего противостояния внешних планет;

[†] – обратное вращение.

§6. Характеристики орбит планет

Планета	Большая полуось		Эксцентриситет	Наклон к плоскости эклиптики	Период обращения	Синодический период
	млн. км	а.е.				
Меркурий	57.9	0.3871	0.2056	7.004	87.97 сут	115.9
Венера	108.2	0.7233	0.0068	3.394	224.70 сут	583.9
Земля	149.6	1.0000	0.0167	0.000	365.26 сут	–
Марс	227.9	1.5237	0.0934	1.850	686.98 сут	780.0
Юпитер	778.3	5.2028	0.0483	1.308	11.862 лет	398.9
Сатурн	1429.4	9.5388	0.0560	2.488	29.458 лет	378.1
Уран	2871.0	19.1914	0.0461	0.774	84.01 лет	369.7
Нептун	4504.3	30.0611	0.0097	1.774	164.79 лет	367.5

§7. Характеристики некоторых спутников планет

Спутник	Масса	Радиус	Плотность	Радиус орбиты	Период обращения	Геометрич. альбедо	Вид. звездная величина*
	кг	км	г·см ⁻³	км	сут		
Земля							
Луна	$7.348 \cdot 10^{22}$	1738	3.34	384400	27.32166	0.12	-12.7
Марс							
Фобос	$1.08 \cdot 10^{16}$	~ 10	2.0	9380	0.31910	0.06	11.3
Деймос	$1.8 \cdot 10^{15}$	~ 6	1.7	23460	1.26244	0.07	12.4
Юпитер							
Ио	$8.94 \cdot 10^{22}$	1815	3.55	421800	1.769138	0.61	5.0
Европа	$4.8 \cdot 10^{22}$	1569	3.01	671100	3.551181	0.64	5.3
Ганимед	$1.48 \cdot 10^{23}$	2631	1.94	1070400	7.154553	0.42	4.6
Каллисто	$1.08 \cdot 10^{23}$	2400	1.86	1882800	16.68902	0.20	5.7
Сатурн							
Тефия	$7.55 \cdot 10^{20}$	530	1.21	294660	1.887802	0.9	10.2
Диона	$1.05 \cdot 10^{21}$	560	1.43	377400	2.736915	0.7	10.4
Рея	$2.49 \cdot 10^{21}$	765	1.33	527040	4.517500	0.7	9.7
Титан	$1.35 \cdot 10^{23}$	2575	1.88	1221850	15.94542	0.21	8.2
Япет	$1.88 \cdot 10^{21}$	730	1.21	3560800	79.33018	0.20	~ 11.0
Уран							
Миранда	$6.33 \cdot 10^{19}$	235.8	1.15	129900	1.413479	0.27	16.3
Ариэль	$1.7 \cdot 10^{21}$	578.9	1.56	190900	2.520379	0.34	14.2
Умбриэль	$1.27 \cdot 10^{21}$	584.7	1.52	266000	4.144177	0.18	14.8
Титания	$3.49 \cdot 10^{21}$	788.9	1.70	436300	8.705872	0.27	13.7
Оберон	$3.03 \cdot 10^{21}$	761.4	1.64	583500	13.46324	0.24	13.9
Нептун							
Тритон	$2.14 \cdot 10^{22}$	1350	2.07	354800	5.87685 [†]	0.7	13.5

* – для полнолуния или среднего противостояния внешних планет;

† – обратное вращение.

§8. Формулы приближенного вычисления

$$\sin x \approx \operatorname{tg} x \approx x;$$

$$\sin(x \pm \alpha) \approx \sin \alpha \pm x \cos \alpha;$$

$$\cos(x \pm \alpha) \approx \cos \alpha \mp x \sin \alpha;$$

$$\operatorname{tg}(x \pm \alpha) \approx \operatorname{tg} \alpha \pm \frac{x}{\cos^2 \alpha};$$

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx;$$

здесь $x \ll 1$, все углы выражаются в радианах.

Дополнительные справочные данные

§9. Уравнение времени

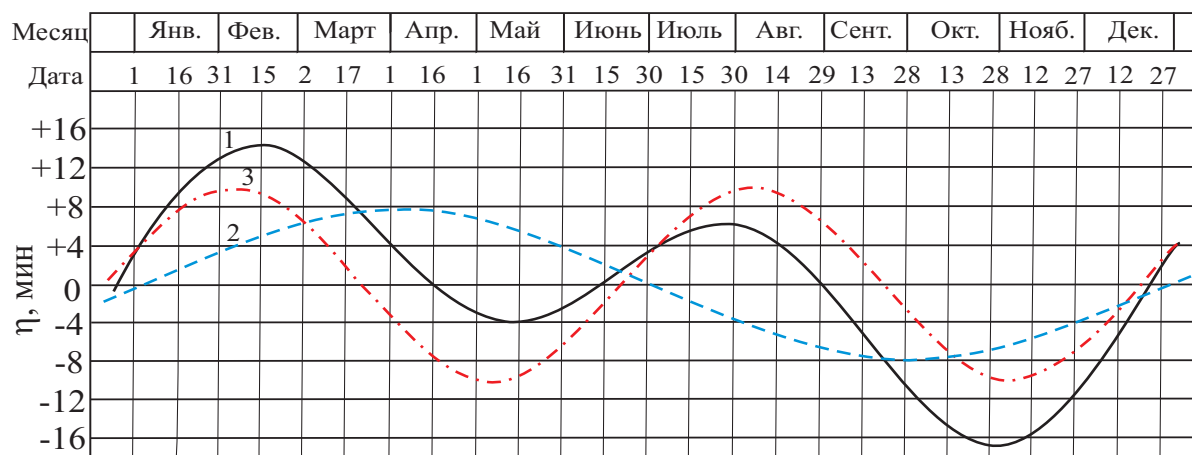


Рис. А.1. График уравнения времени: 1 – уравнение времени, 2 – уравнение центра, 3 – уравнение от наклона эклиптики.