

**Муниципальный этап всероссийской олимпиады школьников  
2023-2024 учебный год**

**АСТРОНОМИЯ**

**Решения и критерии оценивания**

**10 класс**

Каждое задание оценивается по 8-балльной системе.

Максимальный первичный балл – 48

**Итоговая оценка** за выполнение заданий определяется путем приведения баллов, набранных участниками, к 100 балльной системе по формуле:

$$\frac{\text{первичный балл участника}}{\text{максимальный первичный балл}} \times 100$$

**Решения**

**1.** Туманность Андромеды, Луна, квазар 3C48, комета C/2013 US10 (Каталина), туманность Сова. Расположите объекты в порядке возрастания расстояния от Земли.

Сразу отметим, что для решения задачи нет необходимости помнить расстояния до перечисленных объектов, достаточно лишь понимать, где находятся объекты соответствующего класса.

Начнём с простого. Самым близким к Земле объектом из списка является, конечно, её естественный спутник – Луна. Кроме Луны, в списке есть ещё один, принадлежащий Солнечной системе – это комета, которая и займёт второе место. На последнем месте должен находиться квазар, т.к. квазары – одни из самых ярких и далёких известных объектов во Вселенной.

Остались туманность Сова и Туманность Андромеды. Тут нужно помнить, что на самом деле Туманность Андромеды – это не туманность, а галактика, а такое название сохранилось за ней по историческим причинам. Настоящие же туманности, к которым относится Сова, представляют собой участки межзвёздной среды, выделяющиеся своим излучением или поглощением света на общем фоне неба. Ввиду своих относительно небольших размеров и тусклости, они наблюдаются только в нашей Галактике.

Итак, окончательный ответ: 1) Луна, 2) комета Каталина, 3) туманность Сова, 4) галактика Туманность Андромеды, 5) квазар 3C48.

**2.** Вычислите период обращения вокруг Солнца планеты, блеск которой от соединения до противостояния изменился на  $1^m$ . Орбиты Земли и планеты считать круговыми.

1) Обозначим радиусы орбит Земли и планеты  $a_{\oplus}$  и  $a$ . Тогда расстояние до планеты в соединении составит  $a + a_{\oplus}$ , в противостоянии  $a - a_{\oplus}$ .

2) Блеск от соединения до противостояния меняется на  $1^m$ , т.е. в 2,512 раз. Поскольку блеск обратно пропорционален квадрату расстояния, можно записать:

$$\frac{E_{\text{против.}}}{E_{\text{соед.}}} = 2,512 = \left(\frac{a+a_{\oplus}}{a-a_{\oplus}}\right)^2 \quad a_{\oplus} = 1 \text{ а. е.} \quad 2,512 = \left(\frac{a+1}{a-1}\right)^2$$
$$\frac{a+1}{a-1} = \sqrt{2,512} = k = 1,585 \quad ak - k = a + 1 \quad a(k - 1) = k + 1$$

$$\text{Радиус орбиты планеты } a = \frac{k+1}{k-1} = \frac{2,585}{0,595} = 4,4 \text{ а. е.}$$

3) Найдём период обращения планеты по III закону Кеплера

$$T = \sqrt{a^3} = \sqrt{4,4^3} = 9,2 \text{ года}$$

3. Линейный размер (диаметр) звездного скопления равен  $10^{14}$  км. Средняя плотность вещества скопления  $6 \cdot 10^{-22}$  г/см<sup>3</sup>. Оцените количество звёзд в скоплении, если известно, что оно состоит из солнцеподобных звёзд (средняя плотность звезды  $\rho \approx 1.4$  г/см<sup>3</sup>, радиус звезды  $R \approx 7 \cdot 10^5$  км).

Проще всего решить задачу, используя понятие массы. Если число звезд в скоплении  $N$ , то масса скопления  $M_{\text{СК}} = N \cdot m_{\text{ЗВ}}$ , где  $m_{\text{ЗВ}}$  - масса одной звезды. Масса  $M = V \cdot \rho$  где  $V$  - объем, а  $\rho$  - плотность. Тогда

$$N = \frac{M_{\text{СК}}}{m_{\text{ЗВ}}} = \frac{V_{\text{СК}} \cdot \rho_{\text{СК}}}{V_{\text{ЗВ}} \cdot \rho_{\text{ЗВ}}}$$

Скопление с достаточной точностью можно считать шарообразным, тогда

$$\frac{V_{\text{СК}}}{V_{\text{ЗВ}}} = \frac{R_{\text{СК}}^3}{R_{\text{ЗВ}}^3}$$

где  $R_{\text{СК}}$  - радиус скопления (равный половине линейного размера, данного в условии), а  $R_{\text{ЗВ}}$  - радиус звезды. Отсюда

$$N = \frac{\rho_{\text{СК}}}{\rho_{\text{ЗВ}}} \cdot \left(\frac{R_{\text{СК}}}{R_{\text{ЗВ}}}\right)^3 = \frac{6 \cdot 10^{-22}}{1,4} \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 10^{14}}{7 \cdot 10^5}\right)^3 \approx 160$$

т.е. в скоплении около 160 звёзд.

4. Астроном, находящийся в Петербурге, наблюдает некоторую звезду в зените. Другой астроном, в другом городе, расположенном примерно на том же меридиане, в тот же момент наблюдает эту же звезду около горизонта. Оцените расстояние между городами. На каких материках может находиться второй город?

Поскольку оба астронома наблюдают одну и ту же далекую звезду (отметим, что звезда не может быть Солнцем – в Петербурге оно в зените не бывает), то направление на неё из обоих городов должно совпадать. Однако в Петербурге это направление совпадает с направлением радиуса Земли, проведенного к городу, а в другом городе – перпендикулярно ему. Следовательно, радиусы, проведенные к Петербургу и другому городу, должны быть перпендикулярны друг другу. Поскольку Земля – шар, это означает, что расстояние между городами составляет четверть окружности Земли, т.е. **около 10 тысяч километров**.

Кроме этого, можно заметить, что оба астронома наблюдали звезду одновременно. Отсюда можно сделать вывод, что оба города находятся примерно на одном и том же меридиане, иначе, когда в одном из них темно, в другом будет светло, и наблюдать звёзды будет невозможно. Вспомнив, как выглядит карта Земли, можно понять, что возможный материк только один – **Африка**.

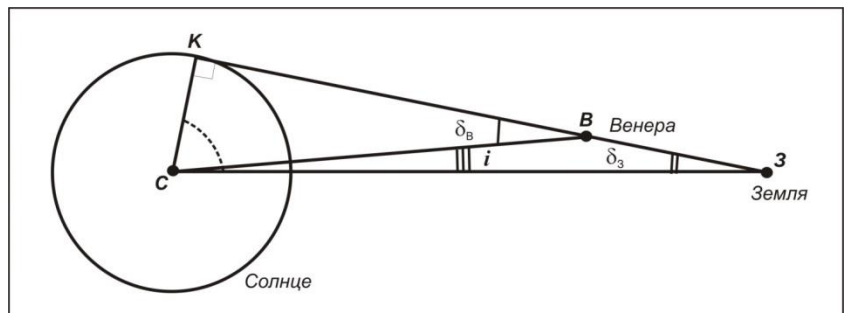
5. Оцените, при каком максимальном угле наклона орбиты Венеры к эклиптике мы могли бы любоваться прохождением Венеры по диску Солнца каждое нижнее соединение? Угловой радиус Солнца, видимого с Земли, принять равным  $15'$ , расстояние Венеры от Солнца  $0,72$  а.е.

Максимальный угол наклона орбиты Венеры к эклиптике  $i$ , при котором каждое нижнее соединение будут наблюдаться её прохождения по диску Солнца, будет тогда, когда в самом крайнем случае Венера просто коснётся края Солнца (см. рисунок):

Из треугольников СКЗ и СКВ получаем:  $\angle КСЗ = 90^\circ - \delta_3$ ,  $\angle КСВ = 90^\circ - \delta_В$

а  $i = \angle КСЗ - \angle КСВ = \delta_В - \delta_3$ . Т.е. искомый

максимальный угол наклона равен разности угловых радиусов Солнца, видимых с Венеры и Земли.



Угловой радиус Солнца, видимого с Земли  $\delta_3 = 15'$ . А т.к. Венера находится к Солнцу ближе в  $\frac{1 \text{ а.е.}}{0,72 \text{ а.е.}} = 1,39$  раза, поэтому радиус Солнца, видимого с Венеры, больше и составляет  $\delta_B = 15' \cdot 1,39 \approx 21'$ . Значит  $i = 21' - 15' = 6'$ .

В реальности угол наклона орбиты Венеры к эклиптике равен  $3,4^\circ$ , т.е. в 34 раза превышает угол  $i$ , поэтому прохождения Венеры по диску Солнца – очень редкие события.

**6. Каково склонение звезды, высота которой в верхней кульминации на широте Йошкар-Олы ( $\varphi=57^\circ$ ) в два раза больше, чем высота в нижней кульминации.**

Рассмотрим 2 варианта, т.к. верхняя кульминация может быть к югу от зенита ( $h_B = 90^\circ - \varphi + \delta$ ) или к северу от зенита ( $h_B = 90^\circ - \delta + \varphi$ ). Высота в нижней кульминации всегда вычисляется по формуле  $h_H = \varphi + \delta - 90^\circ$

Вариант 1. Верхняя кульминация к югу от зенита  $h_B = 2h_H$

$$90^\circ - \varphi + \delta = 2\varphi + 2\delta - 180^\circ$$

$$\delta = 270^\circ - 3\varphi = 270^\circ - 3 \cdot 57^\circ = 99^\circ$$

Звезды с таким склонением не существует.

Вариант 2. Верхняя кульминация к северу от зенита  $h_B = 2h_H$

$$90^\circ - \delta + \varphi = 2\varphi + 2\delta - 180^\circ$$

$$270^\circ - \varphi = 3\delta$$

$$\delta = \frac{270^\circ - \varphi}{3} = \frac{270^\circ - 57^\circ}{3} = 71^\circ$$

Подстановка в формулы даёт  $h_B = 76^\circ$   $h_H = 38^\circ$  .

Ответ:  $\delta = 71^\circ$

### **Критерии оценивания.**

При оценивании решений по 8-балльной системе рекомендуем использовать следующие критерии:

0 баллов — решение отсутствует, абсолютно некорректно, или в нем допущена грубая астрономическая или физическая ошибка;

1 балл — правильно угадан бинарный ответ («да-нет») без обоснования;

1–2 балла — попытка решения не принесла существенных продвижений, однако приведены содержательные астрономические или физические соображения, которые можно использовать при решении данного задания;

2–3 балла — правильно угадан сложный ответ без обоснования или с неверным обоснованием;

3–6 баллов — задание частично решено;

5–7 баллов — задание решено полностью с некоторыми недочетами;

8 баллов — задание решено полностью.

Выставление премиальных баллов сверх максимальной оценки за задание не допускается.

## СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Основные физические и астрономические постоянные	
Гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	Астрономическая единица $1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Скорость света в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$	Парсек $1 \text{ пк} = 206265 \text{ а.е.} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$
Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-4}$	

Данные о Солнце	
Радиус $695\,000 \text{ км}$	Абсолютная визуальная звездная величина $+4,8^m$
Масса $1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$	Абсол. болометрическая звездная величина $+4,7^m$
Светимость $3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$	Показатель цвета (B-V) $+0,67^m$
Поток солн. энергии на расстоянии Земли $1360 \text{ Вт/м}^2$	Температура поверхности около $6000\text{К}$
Видимая звездная величина $-26,8^m$	Средний горизонтальный параллакс $8,794''$

Данные о Земле	
Эксцентриситет орбиты $0,017$	Экваториальный радиус $6378,14 \text{ км}$
Тропический год $365,24219 \text{ суток}$	Полярный радиус $6356,77 \text{ км}$
Период вращения $23 \text{ часа } 56 \text{ минут } 04 \text{ секунды}$	Масса $5,974 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Наклон экватора к эклиптике на эпоху 2000 года: $23^\circ 26' 21,45''$	Средняя плотность $5,52 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$

Данные о Луне	
Среднее расстояние от Земли $384400 \text{ км}$	Радиус $1738 \text{ км}$
Эксцентриситет орбиты $0,055$	Масса $7,348 \cdot 10^{22} \text{ кг}$ или $1/81,3$ массы Земли
Наклон плоскости орбиты к эклиптике $5^\circ 09'$	Средняя плотность $3,34 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$
Сидерический (звездный) период обращения $27,321662 \text{ сут.}$	Визуальное геометрическое альbedo $0,12$
Синодический период обращения $29,530589 \text{ суток}$	Видимая звезд. величина в полнолуние $-12,7^m$

### ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Планета	Масса		Радиус		Плотность $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	Период вращения вокруг оси	Наклон экватора к плоскости орбиты градусы	Гео- метр, аль- bedo	Види- мая звезд- ная вели- чина**
	кг	массы Земли	км	радиусы Земли					
Солнце	$1,989 \cdot 10^{30}$	332946	695000	108,97	1,41	25,380 сут	7,25	-	-26,8
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
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	-2,9
Юпитер	$1,899 \cdot 10^{27}$	317,94	71492	11,209	1,33	9,924 час	3,13	0,52	-2,9
Сатурн	$5,685 \cdot 10^{26}$	95,181	60268	9,4494	0,69	10,656 час	25,33	0,47	-0,5
Уран	$8,683 \cdot 10^{25}$	14,535	25559	4,0073	1,32	17,24 час*	97,86	0,51	5,7
Нептун	$1,024 \cdot 10^{26}$	17,135	24746	3,8799	1,64	16,11 час	28,31	0,41	7,8
Плутон	$1,5 \cdot 10^{22}$	0,003	1160	0,1819	1,1	6,387 сут*	122,52	0,3	13,7

\* - обратное вращение.

\*\* - для наибольшей элонгации Меркурия и Венеры и наиболее близкого противостояния внешних планет.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТ ПЛАНЕТ

Планета	Большая полуось		Эксцент- риситет	Наклон к плоскости эклиптики градусы	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
Плутон	5913,5	39,5294	0,2482	17,148	248,54 лет	366,7