Ключи и критерии оценивания к заданиям муниципального этапа Всероссийской олимпиады по астрономии 2024-2025 учебного года 11 класс

1 задание: Что за градусы? (8 баллов)

Из некоторого пункта на поверхности Земли наблюдается одна из восьми планет Солнечной системы. Измеренные наблюдателем сферические топоцентрические координаты планеты следующие: (+37°24', 358°50').

Могут ли это быть эклиптические координаты планеты? экваториальные? горизонтальные? В каком пункте проходит наблюдение? Обязательно объясните свой ответ и подкрепите его вычислениями.

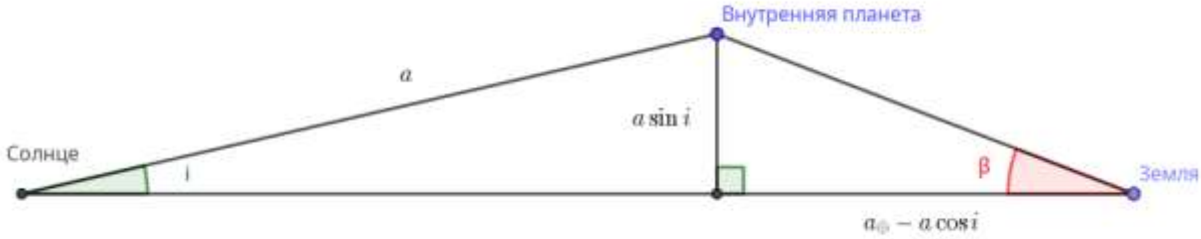
Считайте орбиты планет круговыми. Наклон экватора к эклиптике 23.5°, Меркурий, Венера и Марс имеют радиусы орбиты 0.39, 0.72 и 1.52 а.е. и наклоны орбит к эклиптике 7.0°, 3.4° и 1.9° соответственно. Остальные планеты имеют наклон орбиты к эклиптике, не превышающий 2.5°.

Решение

На первом этапе рассмотрим какие бывают сферические координаты. Горизонтальная система координат состоит из двух координат – высоты и азимута, экваториальная система координат из склонения и прямого восхождения, а эклиптическая из эклиптической широты и эклиптической долготы. Во всех случаях первая координата имеет ОДЗ (области допустимых значений) от -90 до +90 градусов. Вторая координата может меняться от 0 до 360 градусов. Причины изменения второй координаты – вращение наблюдателя. В случае горизонтальной системы – это осевое вращение Земли, в случаях экваториальной или эклиптической системы – это вращение Земли вокруг Солнца.

Для решения задачи нам нужно проанализировать координату, которая может быть высотой, склонением или эклиптической широтой. Эта координата имеет меньшее значение.

Все планеты в Солнечной системе наблюдаются с Земли на небольшом угловом расстоянии от плоскости эклиптики, максимум – на расстоянии в десять градусов. Это можно проверить, используя величину наклона орбиты к эклиптике и радиуса орбиты планеты. Пренебрегая положением линии узлов, рассмотрим внутреннюю планету в нижнем соединении, когда она находится над эклиптикой выше всего:

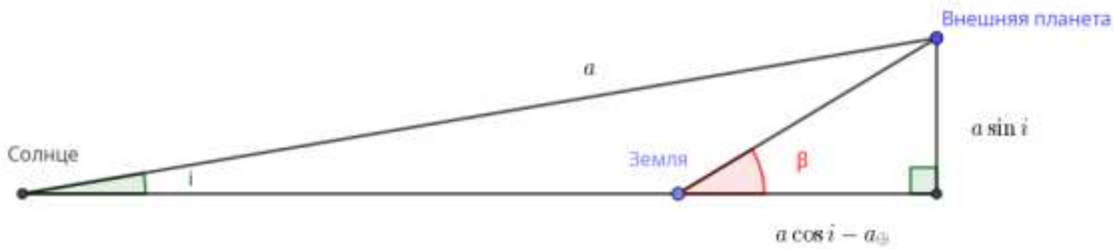


Если i - наклон орбиты, a -- радиус орбиты планеты, $a_\oplus$ -- радиус орбиты Земли, то максимальная **геоцентрическая** эклиптическая широта найдется как

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\sin i}{\frac{a_\oplus}{a} - \cos i}$$

Подставляя значения орбит и наклонов, получаем, что для Венеры $\beta = 8.7°$, для Меркурия $\beta = 4.4°$.

Аналогично, рассмотрим внешнюю планету в противостоянии:



Если i – наклон орбиты, a – радиус орбиты планеты, $a_\oplus$ – радиус орбиты Земли, то максимальная эклиптическая широта найдется как

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\sin i}{\cos i - \frac{a_\oplus}{a}}$$

Для Марса $\beta =$5.4°. Для иных внешних планет из-за большего значения a и меньших i, максимальная эклиптическая широта будет и того меньше.

Переход от геоцентра к топоцентру меняет координаты максимум на значение суточного параллакса планеты – для всех планет он имеет значение менее 1'.

Это означает, что эклиптическая широта планеты, первая координата в эклиптической системе, никак не может быть равна +37°24', поэтому приведенные координаты не могут быть эклиптическими.

Максимальное (по модулю) склонение точек на эклиптике равно наклону экватора к эклиптике (23.5°). Если планета отстоит от эклиптики максимум на $\beta = 8.7°$, то модуль склонения планет заключен в интервале $[0°;\ 23.5° + 8.7° = 32°12']$. Первая координата не лежит в этом интервале, поэтому экваториальные координаты тоже не подходят.

Наконец, горизонтальная система – может ли планета находиться на высоте +37°24' с азимутом 358°50'? Азимут близок к 360° – а это верхняя кульминация светила (или нижняя, если азимут отсчитывается от точки севера). Если предположить, что планета имеет нулевое склонение, то такая высота будет у него на средней широте, близкой к Екатеринбургу (90° - 37°24' = 52°36' с. ш.). Если склонение ненулевое, то подходящие северные широты будут "разбегаться" от данной широты: $[52°36' - 32°12'; 52°36' + 32°12'] = [20°24'; 84°48']$. В любом случае, такая ситуация возможна, и приведенные координаты, скорее всего, горизонтальные.

Возможное решение:

Участник сразу же говорит про то, что у планет может быть нулевая эклиптическая широта (лежат прямо на эклиптике) и нулевое склонение (лежат ещё и на экваторе), а значит, на Земле можно выбрать такую широту (52°36' с. ш.), чтобы планета наблюдалась с выбранной высотой. Такое решение без анализа эклиптических широт и склонений оценивается в 2 балла.

Ответ

Эклиптические не могут, экваториальные не могут, горизонтальные могут.

№	Критерий	Баллы
1	Сформулировано утверждение про видимое положение планет относительно плоскости эклиптики	2
	Сделан ошибочный вывод, что максимальная эклиптическая широта планеты равна наклону орбиты, что справедливо только для гелиоцентрических широт	0
2	Связано положение планет относительно эклиптики и их эклиптическая широта, из чего сделан вывод, что указанные координаты не могут быть эклиптическими	2
3	Связан диапазон эклиптических координат и возможное склонение для планет, из чего сделан вывод, что указанные координаты не могут быть экваториальными	2
	Вывод "указанные координаты не могут быть экваториальными" основывается на утверждениях вроде "вторая координата указана не в часовых единицах"	0
4	Связано склонение планет с высотой планеты в случае близости к моменту кульминации, приведена хотя бы одна географическая широта, где это возможно, из чего сделан вывод, что указанные координаты могут быть горизонтальными ИЛИ Сразу сказано возможное склонение планеты из предположения, что она лежит на эклиптике, и оценена широта места наблюдения	2

2 задание: И разглядеть всё легче (8 баллов)

Угловой размер M57 (туманность Кольцо) составляет $2'$. Телескоп с диаметром объектива 120 мм формирует изображение M57 в фокальной плоскости, размер которого 0.582 мм. При наблюдении с некоторым окуляром он дает равнозрачковое увеличение. Определите фокусные расстояния объектива и окуляра. Вычислите, на каком расстоянии располагается данный окуляр от объектива. Задний фокус объектива совмещен с передним фокусом окуляра. Диаметр зрачка наблюдателя 6 мм.

Решение:

Диаметр изображения d связан с фокусным расстоянием объектива $F_{об}$ следующим соотношением:

$$d = F_{об}\,\mathrm{tg}\,\alpha \approx F_{об}\,\alpha,$$

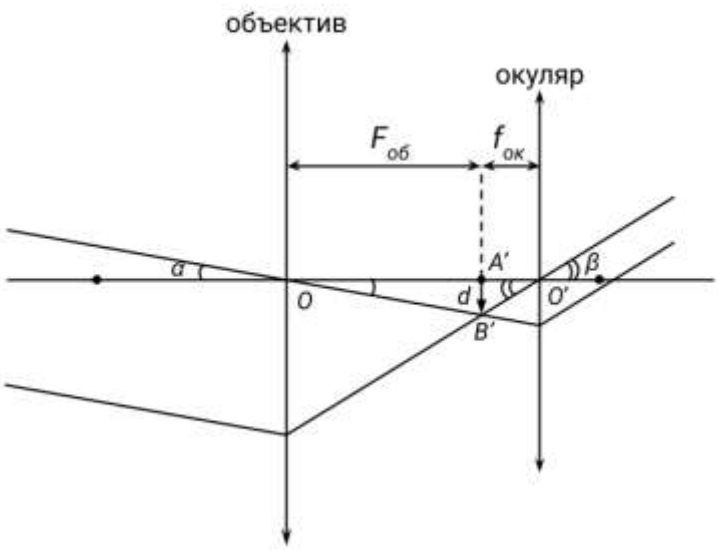
где α – угловой размер объекта в радианах.

Выражая $F_{об} = d/(\mathrm{tg}\,\alpha)$ и подставляя угловой размер M57 и размер её изображения, получаем $F_{об} = 1000\ мм$.

Увеличение телескопа равно отношению угловых размеров изображения и объекта, а также отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$W = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{F_{об}}{f_{ок}}.$$

И с данным окуляром оно равно равнозрачковому увеличению: $W_{равн} = D/(6\ мм) = 20$, здесь $[D] = мм$. Поэтому $F_{об}/f_{ок} = W_{равн}$, а $f_{ок} = F_{об}/W_{равн}$. Откуда $f_{ок} = 50\ мм$.



Так как собирающие линзы размещаются таким образом, что задний главный фокус объектива совмещается с передним главным фокусом окуляра, расстояние l между объективом и окуляром равно:

$$l = F_{об} + f_{ок} = 1050\ мм.$$

Ответ:

$$F_{об} = 1000\ мм, f_{ок} = 50\ мм, l = 1050\ мм.$$

Оценивание:

№	Критерий	Баллы
1	Фокусное расстояние объектива посчитано верно	2
	Присутствует только выражение для его вычисления через размер изображения и угловой размер объекта	1
2	Верно определено увеличение телескопа при использовании окуляра	2
	Присутствует только выражение для равнозрачкового увеличения	1
3	Фокусное расстояние окуляра вычислено верно	2
	Приведено только выражение для связи увеличения с фокусными расстояниями	1
4	Верно вычислено расстояние между объективом и окуляром	2
	Присутствуют только корректные формула или рисунок, демонстрирующие понимание принципа размещения окуляра в телескопе	1

3 задание: Путешествие к Трисолярису (8 баллов)

Межзвездный корабль летит от Солнца до Проксимы Центавра. Корабельный астрофизик в середине пути, когда скорость корабля была направлена точно от Солнца к Проксиме, заметил занимательное явление: длина волны, на которую пришелся максимум излучения и от Солнца, и от Проксимы, стала одинаковой.

Почему это произошло? С какой скоростью в этот момент двигался корабль? Ответ дайте в долях от скорости света в виде обыкновенной дроби.

Исходные максимумы излучения Солнца и Проксимы приходятся на длины волн 550 нм и 950 нм соответственно. Считайте Проксиму и Солнце неподвижными друг относительно друга. Релятивистскими эффектами пренебрегите.

Решение

Смещение видимой длины волны происходит из-за эффекта Доплера: длина волны максимума излучения Солнца из-за того, что корабль от него удаляется с некоторой скоростью v, сместилась в красную часть, а Проксимы, так как корабль приближается к ней со скоростью v – в синюю.

Если для неподвижного наблюдателя излучение имеет длину волны λ_0, то для наблюдателя, движущегося со скоростью v, оно будет иметь длину волны λ такую, что

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \pm\frac{v}{c},$$

где с – скорость света, знак + соответствует отдалению, знак "-" – приближению наблюдателя.

Исходная длина волны для Солнца $\lambda_{0С}$ = 550 нм, для Проксимы $\lambda_{0П}$ = 950 нм, а наблюдаемые и для Проксимы, и для Солнца равны: $\lambda_С = \lambda_П = \lambda$.

Получаем

$$\frac{\lambda - \lambda_{0С}}{\lambda_{0С}} = \frac{\lambda_{0П} - \lambda}{\lambda_{0П}},$$

Решая это уравнение относительно неизвестного λ, получаем

$$\lambda = \frac{2\lambda_{0П}\lambda_{0С}}{\lambda_{0С} + \lambda_{0П}},$$

Подставляем это в выражение для эффекта Доплера, чтобы получить искомое отношение скорости к скорости света:

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_{0С}}{\lambda_{0С}} = \frac{\frac{2\lambda_{0П}\lambda_{0С}}{\lambda_{0С} + \lambda_{0П}} - \lambda_{0С}}{\lambda_{0С}} = \frac{2\lambda_{0П}}{\lambda_{0С} + \lambda_{0П}} - 1 = \frac{\lambda_{0П} - \lambda_{0С}}{\lambda_{0С} + \lambda_{0П}},$$

Окончательный численный ответ замечательно представляется в виде небольшой обыкновенной дроби:

$$\frac{v}{c} = \frac{950 - 550}{950 + 550} = \frac{4}{15}.$$

Ответ

Из-за эффекта Доплера, 4/15.

Возможное ошибочное решение:

Участник может подумать, что смещается длина волны только у одной звезды.

В случае, если это Проксима:

$$\frac{v}{c} = \frac{950 - 550}{950} = \frac{8}{19},$$

Если смещение рассматривается только для Солнца:

$$\frac{v}{c} = \frac{950 - 550}{550} = \frac{8}{11},$$

В этом случае критерий 2 оценивается максимум в 2 балла (см. ниже).

Оценивание:

№	Критерий	Баллы
1	Названа причина явления – эффект Доплера, ИЛИ Записана формула для доплеровского смещения длин волн	2
2	Составлено нужное уравнение для отношения скорости к скорости света через исходные длины волн максимумов Солнца и Проксимы	4
	Составлено уравнение, в котором учитывается смещение только для одной звезды (либо для Проксимы, либо для Солнца)	2
3	Получен правильный численный ответ (с учетом критерия 2) И Он записан обыкновенной дробью	2
	Получен правильный ответ И Он записан иным способом	1
	Получен неправильный ответ	0

4 задание: Утиные истории (8 баллов)

Скопление Дикая Утка, ярчайшее в созвездии Щита, находится от Солнца на расстоянии 2.2 кпк, имеет экваториальные координаты $\alpha = 18^h51^{\mathrm{m}}04^{\mathrm{s}}$, $\delta = +06°16'19''$ и лучевую гелиоцентрическую скорость 36 км/с. Звезды скопления имеют следующие собственные движения по экваториальным координатам (см. рисунок ниже).

За сколько часов скопление как целое переместится на 1 световую секунду относительно Солнца?

1 мсд (миллисекунда дуги) = 0.001", скорость света равна 300 000 км/с, $1\ \text{а.е.} = 1.496 \cdot 10^8$ км.

Решение:

Путь скопления $l = 1$ световая секунда $= 300\,000$ км. Чтобы найти время t , за которое скопление как целое переместится на это расстояние относительно Солнца, нужно определить его полную пространственную гелиоцентрическую скорость v. Формула будет аналогичной таковой для одной-единственной звезды:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\tau^2},$$

v_r= 36 км/с – лучевая скорость скопления, тангенциальная скорость v_τ может быть определена из полного собственного движения скопления μ и расстояния до скопления $r = 2200$ пк.

Из определения парсека, 1 а.е. на расстоянии 1 пк имеет угловой размер 1". Значит, угловая скорость 1"/год для источника, удаленного на 1 пк, соответствует линейной скорости

$$1\ \text{а. е./год} \approx 4.74\ \text{км/с}.$$

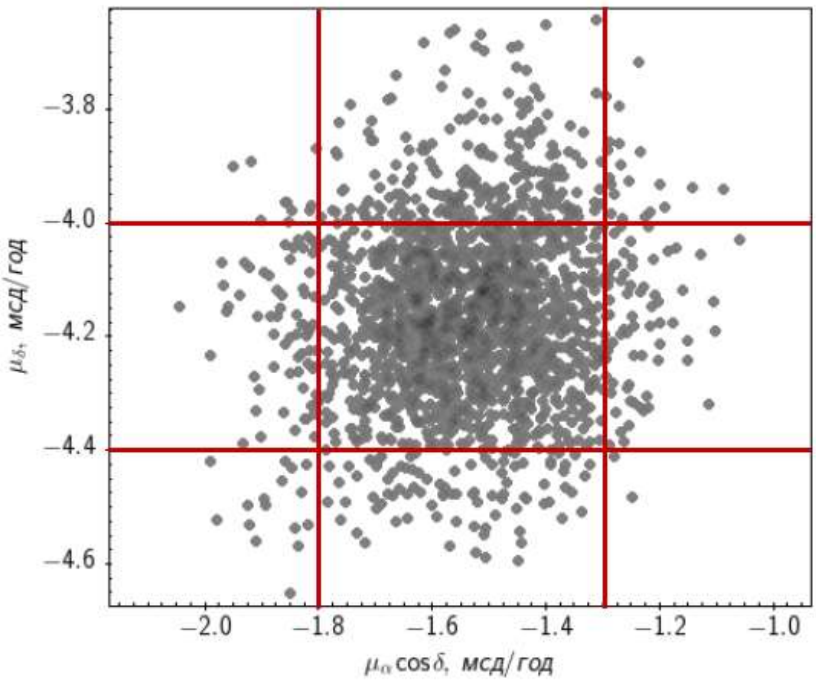
Получаем следующую формулу:

$$v_\tau = 4.74\frac{\text{км/с}}{\text{пк}\cdot(''/\text{год})}\cdot\mu\cdot\text{r}.$$

В свою очередь, для определения полного собственного движения μ нужны компоненты собственного движения центра скопления вдоль прямого восхождения и вдоль склонения, с учетом сближения меридианов:

$$\mu = \sqrt{(\mu_\alpha\cos\delta)^2+\mu_\delta{}^2}.$$

Эти величины необходимо определить из приведенного рисунка. Сближение меридианов уже учтено, поэтому склонение скопления отдельным образом учитывать не нужно.



Из рисунка видно, что большая часть собственных движений звезд выборки скопления лежит в следующих интервалах:

$$-1.8\ \text{мсд/год} \le \mu_\alpha\cos\delta \le -1.3\ \text{мсд/год},$$
$$-4.4\ \text{мсд/год} \le \mu_\delta \le -4.0\ \text{мсд/год}.$$

Нас удовлетворят любые значения из этих интервалов. Возьмем их середины для определенности:

$\mu_\alpha\cos\delta = -0.00155\ ''/\text{год}$, $\mu_\delta = -0.0042\ ''/\text{год}$.

Собираем все в итоговое выражение и получаем скорость скопления:

$$v = \sqrt{v_\text{r}{}^2+(4.74\text{r})^2\cdot((\mu_\alpha\cos\delta)^2+\mu_\delta{}^2)}$$
$$= \sqrt{(36)^2+(4.74\cdot 2200)^2\cdot((-0.00155)^2+(-0.0042)^2)}$$
$$= 59\ \text{км/с},$$

Время прохождения скоплением одной световой секунды:

$$t = l/v = 300\,000\ \text{км}/(59\ \text{км/с}) \approx 85\ \text{минут} = 1.4\ \text{часа.}$$

Ответ:
1.4 часа.

Оценивание:

№	Критерий	Баллы
1	Приведено правильное выражение для пространственной скорости через лучевую и тангенциальную скорость	2
2	Приведено правильное выражение для тангенциальной скорости через расстояние до скопления и его полное собственное движение	2
3	Приведено правильное выражение для полного собственного движения через компоненты собственного движения	1
	В выражении для полного собственного движения пропущен фактор сближения меридианов cos δ	0
4	Из рисунка оценены компоненты собственных движений	2
5	Получен итоговый ответ в интервале от 1.3 до 1.5 часов	1

5 задание: Пыль (8 баллов)

По круговой орбите с радиусом 3 а.е. вокруг Солнца обращается небольшая сферическая пылинка, равномерно прогреваясь солнечными лучами до термодинамического равновесия. Пренебрегая любыми другими источниками энергии, кроме Солнца, определите эффективную температуру пылинки, если её сферическое альбедо 75%. Ответ выразите в целых кельвинах. Эффективная температура Солнца 5780 К, радиус Солнца 700 000 км.

Решение:

Пылинка приходит в термодинамическое равновесие тогда, когда поглощаемый пылинкой поток солнечной энергии $W_{погл}$ становится равен потоку энергии, излучаемому самой пылинкой $W_{изл}$:

$$W_{погл} = W_{изл}$$

Пусть пылинка имеет радиус r. Если в конечном итоге пылинка нагревается до эффективной температуры T, то полный поток излучения от пылинки найдется с помощью закона Стефана-Больцмана:

$$W_{изл} = S\sigma T^4 = 4\pi r^2 \sigma T^4,$$

S– площадь пылинки, $\pi \approx 3.1416$ – математическая константа, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}\,\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Поглощающийся пылинкой поток солнечной энергии зависит от её сферического альбедо $A = 0.75$ и падающего на пылинку потока $W_{пад}$, который в свою очередь зависит от плотности потока энергии J на заданном расстоянии $R = 3\ а.е = 4.488 \cdot 10^8\ км$ и площади поперечного сечения пылинки πr^2:

$$W_{погл} = (1 - A)W_{пад} = (1 - A)J\pi r^2$$

Плотность потока энергии от Солнца на расстоянии R можно найти из закона обратных квадратов и солнечной светимости L:

$$J = \frac{L}{4\pi R^2},$$

А солнечная светимость L, то есть полный поток от Солнца радиусом $R_{\odot}$ и температурой $T_{\odot}$, найдется по тому же самому закону Стефана-Больцмана:

$$L = 4\pi r_{\odot}{}^2 \sigma T_{\odot}{}^4.$$

Таким образом:

$$W_{погл} = (1 - A)\frac{L}{4\pi R^2}\pi r^2 = (1 - A)\sigma T_{\odot}{}^4 \frac{r_{\odot}{}^2}{R^2}\pi r^2,$$

Приравнивая с излучаемой энергией, увидим, что все неизвестные величины сократятся:

$$(1 - A)\sigma T_{\odot}{}^4 \frac{r_{\odot}{}^2}{R^2}\pi r^2 = 4\pi r^2 \sigma T^4,$$

$$(1 - A)\left(\frac{T_{\odot}}{T}\right)^4 = 4\left(\frac{R}{r_{\odot}}\right)^2,$$

$$T = (1 - A)^{1/4} T_{\odot} \sqrt{\frac{r_{\odot}}{2R}}.$$

Подставляя приведенные данные, получим, что температура пылинки $T = 114\ К$.

Ответ:

$$T = 114\ К.$$

Возможная ошибка: считать, что свет на пылинку падает со всех сторон. Тогда в итоговой формуле будет отсутствовать коэффициент 2:

$$T = (1 - A)^{1/4} T_{\odot} \sqrt{\frac{r_{\odot}}{R}} = 161\ К.$$

Такой ответ оценивается на 1 балл меньше (см. ниже критерий 5)

Оценивание:

№	Критерий	Баллы
1	Сказано про то, что такое термодинамическое равновесие ИЛИ Сразу приведена формула "падающий поток = исходящему потоку энергии" с пояснениями	2
2	Приведена формула Стефана-Больцмана для потока излучаемой энергии через температуру тела и площадь его поверхности	2

3	Выражен излучаемый пылинкой поток энергии через её температуру и радиус	1
4	Выражен поглощаемый поток солнечной энергии через температуру и радиус Солнца, радиус орбиты пылинки и её альбедо	1
5	Приведена итоговая формула для температуры пылинки, зависящая только от входных величин	1
6	Приведен итоговый ответ с точностью 2 К	1

6 задание: Крутятся далекие планеты (8 баллов):

Определите для указанных планет и их конфигураций, движутся они на восток или на запад на небе Земли вследствие орбитального вращения вокруг Солнца. Полагая орбиты планет круговыми и лежащими в одной плоскости, вычислите для данных моментов времени линейные скорости планет относительно Земли (в км/с) и их геоцентрические угловые скорости на небе (в угловых минутах в день):

1) Меркурий (орбитальный период 87.97 суток) , нижнее соединение
2) Венера (224.70 суток), верхнее соединение
3) Марс (686.98 суток), противостояние
4) Юпитер (11.862 лет), соединение

Орбитальный период Земли – 365.26 суток, солнечный гравитационный параметр $GM_{\odot} = 1.327 \cdot 10^{20}$ $м^3 \cdot с^{-2}$.

Решение:

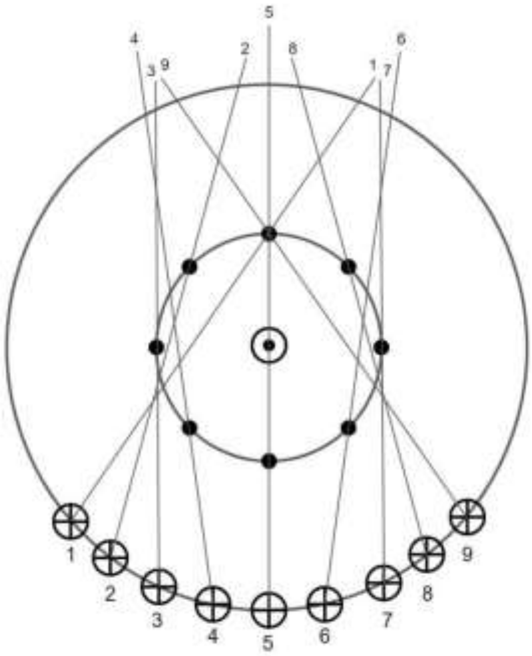
Меркурий и Венера являются внутренними планетами, для них вблизи верхнего соединения характерно прямое движение, т. е. с запада на восток, на земном небе, как и перемещение Солнца по эклиптике. Обратное движение, т. е. с востока на запад, они демонстрируют вблизи нижнего соединения.

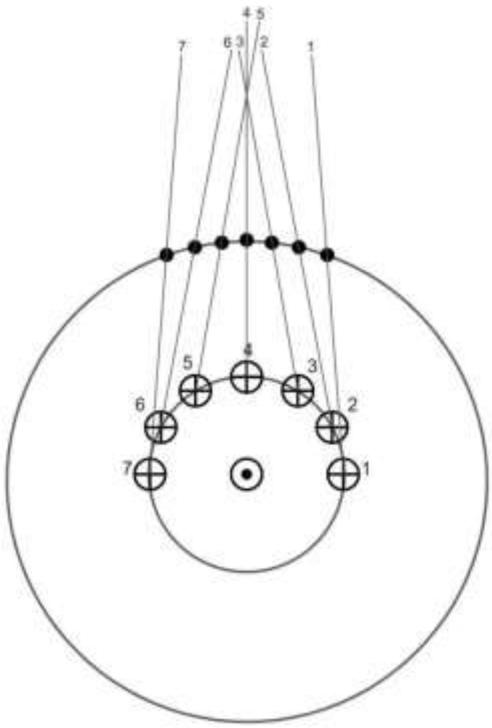
Марс и Юпитер являются внешними планетами, их движение прямое вблизи соединения и обратное вблизи противостояния.

Так, вследствие орбитального вращения указанные объекты перемещаются на небе Земли в следующих направлениях:

1) Меркурий, на запад
2) Венера, на восток
3) Юпитер, на восток
4) Марс, на запад

Планеты при движении по небу меняют свое направление движения среди звёзд по той причине, что более близкие к Солнцу планеты имеют более высокую скорость, чем более далекие. На рисунках ниже показано, как меняется направление на планету с Земли с течением времени при учете различия проходимого планетами пути. Соответствующие ходу времени положения планет и направления показаны точками и цифрами.

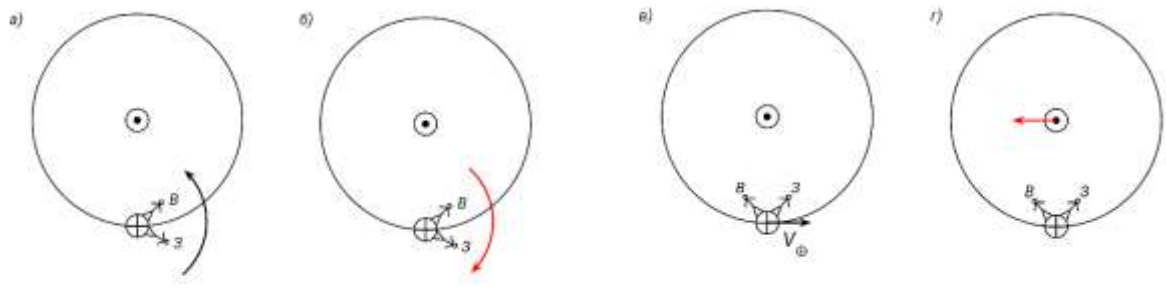




Слева – с Земли наблюдается внутренняя планета, она демонстрирует обратное движение вблизи нижнего соединения (4,5,6). Справа – с Земли наблюдается внешняя планета, она двигается в обратном направлении вблизи противостояния (3,4,5). Прямое и обратное движения чередуются: сначала перемещение происходит по дуге в одном направлении, затем обратно и т.д.

В реальности из-за несовпадения наклона плоскостей орбит планеты в моменты обратного движения описывают не дуги, но петельки.

Солнце движется по земному небу от восточной стороны горизонта к западной вследствие вращения Земли вокруг оси. Если изображать (рисунок а)) Солнце и вращающуюся вокруг него Землю при взгляде с северного полюса эклиптики, оборот происходит против часовой стрелки. Мы называем восточной ту сторону, которая в первую очередь освещается Солнцем. Соответственно, на рисунке а) и далее показаны восток и запад. В системе отсчета, связанной с Землей (Земля неподвижна, рисунок б)) наблюдатель будет замечать движение небесной сферы в противоположном направлении, т. е. по часовой стрелке.

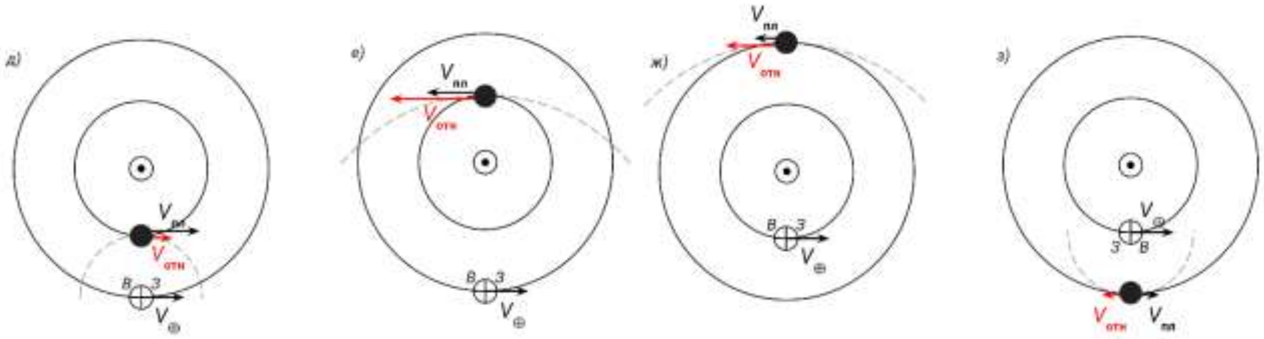


Годичное движение Земли происходит также против часовой стрелки, оно показано на рисунке в) вектором её скорости по орбите. В системе отсчета, связанной с Землей (рисунок г)), Солнце приобретает противоположный вектор скорости, что приводит к годичному движению Солнца по эклиптике с запада на восток. Аналогичное этому наблюдаемое на небе движение планет называется прямым.

Смещение планеты по небу зависит от вектора линейной скорости планеты относительно Земли ($\vec{v}_{отн}$):

$$\vec{v}_{отн} = \vec{v}_{пл} - \vec{v}_{\oplus}.$$

На рисунках д) – з) ниже изображены ситуации для планет и их конфигураций из условия задачи. Так, на рисунке д) показан направленный вправо вектор скорости Земли ($\vec{v}_{\oplus}$), туда же направлен вектор большей скорости Меркурия в нижнем соединении ($\vec{v}_{пл}$). Меркурий обгоняет Землю, поэтому относительно Земли его скорость ($\vec{v}_{отн}$) на рисунке также направлена вправо, это соответствует его движению на запад (обратное). Аналогично остальные рисунки поясняют, в какую сторону горизонта движется та или иная планета в рассматриваемые моменты времени, и куда направлен вектор их относительной скорости.



д) – Меркурий в нижнем соединении. е) – Венера в верхнем соединении. ж) – Юпитер в соединении. з) – Марс в противостоянии.

Линейные скорости обращения Земли и планет по орбите могут быть получены, например, из формулы первой космической скорости либо выражения для круговой скорости через связь с длиной орбиты и орбитальным периодом T:

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}} = \frac{2\pi r}{T},$$

где r – радиус орбиты. Его значение (в а.е.) можно определить из данных орбитальных периодов (выраженных в земных) с помощью "гармонии мира" Кеплера (частного случая третьего закона):

$$r[а.е.] = (T[год])^{2/3}$$

Для Земли линейная скорость равна $v_{\oplus} = 30\ км/с.$

Относительные линейные скорости планет находятся как длины соответствующих векторов и приведены в таблице ниже.

Определим теперь геоцентрическую угловую скорость планеты на небе (в радианах в единицу времени):

$$\omega_{отн} = \frac{v_{отн}}{r_{отн}},$$

где $r_{отн}$ – расстояние от Земли до планеты в указанный момент времени. Как оно соотносится с радиусами орбит, видно на рисунках и для каждого случая описано в таблице с промежуточными и итоговыми данными:

Планета	$v, км/с$	$v_{отн}, км/с$	$r_{отн}, млн. км$	$\omega_{отн}, '/день$
Меркурий	48	18 = 48-30	91.7	58.3
Венера	35	65 = 35+30	257.8	74.9
Юпитер	13	43 = 13+30	927.9	13.8
Марс	24	6 = 30-24	78.3	22.8

Оценивание:

№	Критерий	Баллы
1	Верно указано направление движения планет на небе, к западному горизонту или восточному (1 балл за обе внутренние планеты + 1 балл за обе внешние ИЛИ 1 балл за одну внутреннюю и одну внешнюю)	2
	Верно сказано, в каких конфигурациях внутренних и внешних планет происходит их прямое движение по небу или обратное, без определения либо с ошибкой, на восток или на запад оно осуществляется.	1
2	Наличие связи линейной скорости планеты относительно Земли с орбитальными скоростями Земли и планеты	1
3	Вычисление относительных линейных скоростей планет (в км/с) в указанных случаях (1 балл за обе внутренние планеты + 1 балл за обе внешние ИЛИ 1 балл за одну внутреннюю и одну внешнюю)	2
4	Приведено выражение для расчета геоцентрической угловой скорости планеты на небе	1
5	Получены соответствующие значения геоцентрической угловой скорости планеты на небе в '/день (1 балл за обе внутренние планеты + 1 балл за обе внешние ИЛИ 1 балл за одну внутреннюю и одну внешнюю)	2