

Условия и решение задач  
Открытой городской олимпиады по астрономии, астрофизике  
и физике космоса им. М. А. Миллера  
28 января 2024 г.

Каждая задача оценивается в 7 баллов

1. Выберите наиболее точный ответ на каждый вопрос.

- |   |   |
|---|---|
| <p>а) Самая высокая гора в Солнечной системе расположена:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) на Меркурии;</li> <li>2) на Земле;</li> <li>3) на Марсе;</li> <li>4) на Юпитере?</li> </ol> | <p>б) Земля ближе всего к Солнцу:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) в январе;</li> <li>2) в апреле;</li> <li>3) в июле;</li> <li>4) в октябре?</li> </ol>         |
| <p>в) Фобос — это:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) звезда 4-й величины;</li> <li>2) малая планета;</li> <li>3) созвездие южного полушария;</li> <li>4) спутник Марса?</li> </ol>      | <p>г) Какое созвездие не существует:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Барсук;</li> <li>2) Волк;</li> <li>3) Жираф;</li> <li>4) все вышеперечисленные?</li> </ol> |
| <p>д) Если в Калининграде полдень, то в Петропавловске-Камчатском:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 18:00;</li> <li>2) 20:00;</li> <li>3) 22:00;</li> <li>4) полночь?</li> </ol>       | <p>е) У какой планеты нет колец:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Марс;</li> <li>2) Юпитер;</li> <li>3) Уран;</li> <li>4) Нептун?</li> </ol>                     |
- ж) Расположите расстояния в порядке возрастания:
- 1) астрономическая единица — парсек — световой год;
  - 2) астрономическая единица — световой год — парсек;
  - 3) парсек — астрономическая единица — световой год;
  - 4) световой год — астрономическая единица — парсек?

2. Меркурий совершает один оборот вокруг Солнца за 90 земных суток. В свою очередь, один полный оборот планеты вокруг своей оси относительно неподвижных звёзд занимает около 60 земных суток — меркурианские звёздные сутки. Какова длительность меркурианского года в меркурианских солнечных сутках? (Солнечные сутки — время между двумя последовательными восходами Солнца над горизонтом планеты. Собственное и орбитальное вращение Меркурия сонаправлены: происходят «в одну сторону», как у Земли. Орбиту планеты считать круговой.).

3. В равноденствие авиалайнер летит со скоростью 900 км/ч вдоль такой параллели, что Солнце постоянно находится на линии горизонта. Определите географическую широту полёта, если длина земного экватора 40 000 км.

4. Ракета поднимается вертикально вверх с поверхности Земли с постоянным ускорением  $a_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ . Через какое время после старта вес тел в ракете составит 150 % их веса до включения двигателей? Радиус Земли 6 400 км.

1. Выберите наиболее точный ответ на каждый вопрос.

- а) Кто из нобелевских лауреатов 2017 года консультировал создателей фильма «Интерстеллар»:
- 1) Берри Бэриш;
  - 2) Райнер Вайсс;
  - 3) Кип Торн?
- б) В результате математических расчётов был открыт:
- 1) Юпитер;
  - 2) Сатурн;
  - 3) Уран;
  - 4) Нептун?
- в) В суперлунии полная Луна расположена:
- 1) в апогее;
  - 2) в апоселении;
  - 3) в перигее;
  - 4) в фокусе?
- г) Большое Магелланово Облако — это:
- 1) планетная система;
  - 2) планетарная туманность;
  - 3) спутник Млечного Пути;
  - 4) сверхскопление галактик?
- д) Наиболее далёкие галактики обнаружены космическим телескопом имени:
- 1) Уильяма Гершеля;
  - 2) Лаймана Спитцера;
  - 3) Джеймса Уэбба;
  - 4) Эдвина Хаббла?
- е) Какая из звёзд самая яркая на небе (по видимой звёздной величине):
- 1) Алголь;
  - 2) Вега;
  - 3) Денеб;
  - 4) Сириус?
- ж) Расположите системы в порядке удаления от Солнца:
- 1) пояс астероидов — планеты-гиганты — пояс Койпера;
  - 2) пояс астероидов — пояс Койпера — планеты-гиганты;
  - 3) пояс Койпера — пояс астероидов — планеты-гиганты;
  - 4) пояс Койпера — планеты-гиганты — пояс астероидов?

2. Фобос вращается вокруг Марса по достаточно низкой орбите (сопоставимой с радиусом планеты), из-за чего наблюдаемый с Марса угловой размер спутника в зените в 1,5 раза превышает аналогичную величину в момент захода за горизонт (12 и 8 угловых минут, соответственно). Во сколько раз диаметр орбиты Фобоса превышает диаметр Марса?

3. Астронавты на орбитальной станции «Скайлаб» (1973 г.) поддерживали свою физическую форму бегом по внутренней поверхности станции, представлявшей собой цилиндр диаметром около 6 м. С какой скоростью следует бежать в таких условиях, чтобы ощутить свой земной вес?

4. Во сколько раз более массивный груз могла бы перевезти одна и та же баржа по этановому озеру на Титане, чем по обычному озеру на Земле? Ускорение свободного падения на Титане  $1,4 \text{ м/с}^2$ , плотность жидкого этана  $560 \text{ кг/м}^3$ .

1. Выберите наиболее точный ответ на каждый вопрос.

- а) Созвездие Южный Крест отсутствует на флаге:  
 1) Австралии;  
 2) Бразилии;  
 3) Токелау;  
 4) Южно-Африканской Республики?
- б) Нейтринные обсерватории располагают:  
 1) в космосе;  
 2) на вершинах гор;  
 3) на поверхности океана;  
 4) глубоко под землёй?
- в) Экзопланета — это:  
 1) любая планета, удалённая от своей звезды дальше 10 а. е.;  
 2) карликовая планета Солнечной системы за орбитой Нептуна;  
 3) планета вне Солнечной системы;  
 4) планета в зоне обитаемости (помимо Земли)?
- г) Изображение с наиболее высоким угловым разрешением получил:  
 1) космический интерферометр НАСА;  
 2) космический интерферометр «Радиоастрон»;  
 3) интерферометр «Телескоп горизонта событий»;  
 4) 500-метровый телескоп FAST?
- д) Цвет звезды говорит:  
 1) о её светимости;  
 2) о её скорости движения в галактике;  
 3) о температуре её поверхности;  
 4) о её химическом составе?
- е) Типичный цвет звёзд Млечного пути:  
 1) терракотовый;  
 2) жёлтый;  
 3) бежевый;  
 4) голубой?
- ж) Расположите фотоны в порядке увеличения их энергии:  
 1) инфракрасный — оптический — ультрафиолетовый;  
 2) оптический — инфракрасный — ультрафиолетовый;  
 3) оптический — ультрафиолетовый — инфракрасный;  
 4) ультрафиолетовый — оптический — инфракрасный?

2. Человек наблюдает заход Солнца, лежа на пляже в районе экватора. Когда край Солнца только скрылся за горизонтом, человек поднимается в полный рост и вновь видит край солнечного диска. После этого он наблюдает заход Солнца ещё в течение 10,3 с. Полагая рост человека 180 см, оцените радиус Земли. (Наклоном оси вращения планеты пренебречь.)

3. Спутник массы  $m$  вращается вокруг Земли по низкой круговой орбите. Из-за трения о верхние слои атмосферы высота полёта постепенно уменьшилась на величину  $\Delta h$ . Насколько уменьшилась/увеличилась кинетическая энергия спутника в этом процессе?

4. Какое время займёт перелёт по радиальной прямой «Земля — орбита Луны» с отключенными двигателями, так что разогнанный на старте аппарат остановится точно в окрестности Луны? Период обращения Луны вокруг Земли — 27 суток.

1. а) 3) На Марсе.
- б) 1) В январе.
- в) 4) Спутник Марса.
- г) 1) Барсук.
- д) 3) 22:00.
- е) 1) Марс.
- ж) 2) **Астрономическая единица — световой год — парсек.**

## 2. 0,5 меркурианских суток.

Для «наблюдателя» вблизи меркурианского экватора каждое из зодиакальных созвездий (в плоскости эклиптики) восходит над горизонтом на востоке каждые  $T_{зв} = 60$  земных суток и проходит за это время  $360^\circ$  по небесной сфере. Поэтому зодиакальные созвездия перемещаются по небу относительно местного горизонта с угловой скоростью  $\omega_{зв} = 360^\circ/T_{зв}$ . В отсутствие собственного вращения Меркурия, звёзды оставались бы неподвижными относительно местного горизонта, а Солнце проходило бы по неподвижным зодиакальным созвездиям один оборот в  $360^\circ$  за период орбитального перемещения планеты вокруг светила  $T_{орб} = 90$  земных суток, но с запада на восток. Указанное ретроградное перемещение Солнца с угловой скоростью  $\omega_{орб} = 360^\circ/T_{орб}$  относительно звёздного фона никак не нарушается собственным вращением Меркурия. В результате Солнце перемещается по небу относительно местного горизонта с угловой скоростью  $\omega = \omega_{зв} - \omega_{орб}$ , складывающейся из угловой скорости вращения небесной сферы  $\omega_{зв}$  за вычетом ретроградного перемещения светила по зодиакальным созвездиям с угловой скоростью  $\omega_{орб}$  (аналогичная картина на Земле).

Таким образом, Солнце проходит один оборот  $360^\circ$  относительно местного горизонта за время

$$T_{\text{мерк. сут.}} = \frac{360^\circ}{\omega} = \frac{360^\circ}{\omega_{зв} - \omega_{орб}} = \frac{360^\circ}{\frac{360^\circ}{T_{зв}} - \frac{360^\circ}{T_{орб}}} = \frac{1}{\frac{1}{T_{зв}} - \frac{1}{T_{орб}}}.$$

Один меркурианский год  $T_{орб}$  составляет

$$\frac{T_{орб}}{T_{\text{мерк. сут.}}} = T_{орб} \left( \frac{1}{T_{зв}} - \frac{1}{T_{орб}} \right) = \frac{T_{орб}}{T_{зв}} - 1 = \frac{90 \text{ земн. сут.}}{60 \text{ земн. сут.}} - 1 = 0,5 \text{ меркурианских суток.}$$

Иными словами, за одни меркурианские сутки проходят два меркурианских года.

## 3. $57,1^\circ \approx 60^\circ$ . Широта $57,1^\circ$ проходит по северу Нижегородской области.

Параллель с географической широтой  $\varphi$  представляет собой окружность на поверхности Земли с центром на отрезке, соединяющем Южный и Северный полюсы, и радиусом  $r = R \cos \varphi$ , где  $R$  — радиус Земли. Длина параллели составляет величину

$$l = 2\pi r = 2\pi R \cos \varphi = L \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $2\pi R = L = 40\,000$  км — длина экватора. Чтобы Солнце оставалось на линии горизонта, самолёт должен облетать параллель с длиной  $l$  за одни сутки (за время  $T = 24$  ч) с заданной скоростью  $v = 900$  км/ч. Получаем альтернативное равенство на длину параллели

$$l = vT. \quad (2)$$

Приравниваем выражения (1) и (2) для длины  $l$ , что определяет косинус широты

$$\cos \varphi = \frac{vT}{L} = \frac{900 \text{ км/ч} \times 24 \text{ ч}}{40\,000 \text{ км}} = 0,54 \approx 1/2,$$

чему соответствует широта  $|\varphi| \approx 60^\circ$  (в северном или южном полушарии). Точная широта  $|\varphi| = \arccos(vT/L) = 57,1^\circ$  проходит по северу Нижегородской области и отличается от приближённых  $60^\circ$  менее чем на 5 %.

#### 4. 740 с $\approx$ 12,3 мин.

Вес  $P$  тела с массой  $m$  в некоторой точке траектории ракеты равен по абсолютной величине силе  $N$ , с которой конструкция ракеты действуют на тело. Сила  $N$  должна компенсировать действие локальной силы тяжести  $m\mathbf{g}$  и дополнительно придать телу ускорение  $\mathbf{a}_0$ , что и определяет значение  $\mathbf{N} = -m\mathbf{g} + m\mathbf{a}_0 = -m\mathbf{g} - m\mathbf{g}_0$ , как и вес тела

$$P = N = m(g_0 + g). \quad (3)$$

Здесь локальное ускорение свободного падения  $g = A/r^2$  спадает обратно пропорционально квадрату расстояния до центра Земли (в соответствии с ньютоновым законом тяготения), а в векторных равенствах ускорение  $\mathbf{a}_0$  обозначено как величина, противоположная ускорению свободного падения на поверхности Земли  $\mathbf{g}_0$  (9,8 м/с<sup>2</sup>).

Постоянную  $A$  определяем из условия, что на поверхности Земли (на расстоянии  $r$  в радиус Земли  $R = 6\,400$  км) ускорение свободного падения  $g$  совпадает со стандартным значением  $g_0$ :

$$\frac{A}{R^2} = g_0.$$

Найденное таким образом значение  $A = g_0 R^2$  подставляем в выражение (3) для локального веса:

$$P = mg_0 \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right). \quad (4)$$

Локальный вес (4) достигает значения  $\alpha = 150$  % от стандартного веса  $P_0 = mg_0$  на расстоянии  $r$ , определяемом равенством

$$\alpha = \frac{P}{P_0} = \frac{mg_0 (1 + R^2/r^2)}{mg_0} = 1 + \frac{R^2}{r^2}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) находим искомое расстояние от центра Земли

$$r = \frac{R}{\sqrt{\alpha - 1}}. \quad (6)$$

С другой стороны, высота подъёма ракеты  $r - R$  над поверхностью Земли увеличивается со временем  $t$  по закону равноускоренного движения  $r - R = a_0 t^2 / 2$ . Подставляем полученный временной ход расстояния  $r = R + a_0 t^2 / 2$  в уравнение (6):

$$R + \frac{a_0 t^2}{2} = \frac{R}{\sqrt{\alpha - 1}},$$

и находим искомое время с начала подъёма

$$t = \sqrt{\frac{2R}{a_0} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha - 1}} - 1 \right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6\,400 \cdot 1\,000 \text{ м}}{9,8 \text{ м/с}^2} \left( \frac{1}{\sqrt{1,5 - 1}} - 1 \right)} \approx 740 \text{ с} \approx 12,3 \text{ мин.}$$

1. а) 3) Кип Торн.  
 б) 4) Нептун.  
 в) 3) В перигее.  
 г) 3) Спутник Млечного Пути.  
 д) 3) Имени Джеймса Уэбба.  
 е) 4) Сириус.  
 ж) 1) Пояс астероидов — планеты-гиганты — пояс Койпера.

2. В 2,6 раза.

В зените расстояние от поверхности Марса до Фобоса представляет собой разность  $L_{\text{зенит}} = R_{\text{Ф}} - R_{\text{М}}$  радиуса орбиты Фобоса  $R_{\text{Ф}}$  и радиуса Марса  $R_{\text{М}}$ . В момент захода Фобоса за горизонт, лучи от наблюдателя на Фобос и в центр Марса образуют прямой угол. Таким образом, наблюдатель, Фобос и центр Марса формируют прямоугольный треугольник, в котором отрезок «наблюдатель — Фобос» — один из катетов, большее из расстояний в виде радиуса орбиты Фобоса  $R_{\text{Ф}}$  — гипотенуза, а меньшее расстояние в виде радиуса Марса  $R_{\text{М}}$  — оставшийся катет. Расстояние «наблюдатель — Фобос» находим по теореме Пифагора  $L_{\text{гор}} = \sqrt{R_{\text{Ф}}^2 - R_{\text{М}}^2}$ .

Наблюдаемый угловой размер объекта обратно пропорционален расстоянию до него, поэтому отличие  $\alpha = 12'/8' = 1,5$  угловых размеров Фобоса в зените и на линии горизонта определяет отношение расстояний до спутника  $L_{\text{гор}}/L_{\text{зенит}}$ . Тогда из уравнения

$$\alpha = \frac{L_{\text{гор}}}{L_{\text{зенит}}} = \frac{\sqrt{R_{\text{Ф}}^2 - R_{\text{М}}^2}}{R_{\text{Ф}} - R_{\text{М}}} = \frac{\sqrt{(R_{\text{Ф}} - R_{\text{М}})(R_{\text{Ф}} + R_{\text{М}})}}{R_{\text{Ф}} - R_{\text{М}}} = \sqrt{\frac{R_{\text{Ф}} + R_{\text{М}}}{R_{\text{Ф}} - R_{\text{М}}}} = \sqrt{\frac{R_{\text{Ф}}/R_{\text{М}} + 1}{R_{\text{Ф}}/R_{\text{М}} - 1}}$$

находим искомое отношение диаметров (удвоенных радиусов  $R_{\text{Ф}}$  и  $R_{\text{М}}$ ):

$$\frac{2R_{\text{Ф}}}{2R_{\text{М}}} = \frac{R_{\text{Ф}}}{R_{\text{М}}} = \frac{\alpha^2 + 1}{\alpha^2 - 1} = \frac{1,5^2 + 1}{1,5^2 - 1} = \frac{13}{5} = 2,6.$$

3. Требуемая скорость бега 5,4 м/с.

Орбитальная станция представляет собой локальную инерциальную систему отсчёта (как частный случай системы свободно падающего лифта), в которой отключена локальная земная гравитация: все невзаимодействующие между собой тела внутри станции движутся равномерно и прямолинейно. Поэтому нормальная реакция  $N$  со стороны стенки станции определяет центростремительное ускорение астронавта  $a = v^2/r = 2v^2/d$  при беге со скоростью  $v$  внутри цилиндра с диаметром  $d = 2r$ . Чтобы ощутить земной вес космонавту с массой  $m$ , нормальная реакция стенки  $N = ma$  должна достичь значения  $mg$ , как для горизонтальной поверхности в обычных условиях ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения).

Указанное равенство  $N = ma = mg$  обуславливает центростремительное ускорение  $a$  равным  $g$ :

$$\frac{2v^2}{d} = g,$$

и задаёт требуемую скорость бега

$$v = \sqrt{\frac{gd}{2}} = \sqrt{\frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6 \text{ м}}{2}} = 5,4 \text{ м/с} = 5,4 \frac{3600 \text{ км}}{1000 \text{ ч}} = 19,5 \text{ км.}$$

#### 4. В 1,8 раза менее массивный груз.

Для лодки на плаву масса вытесненной жидкости равна суммарной массе лодки и груза в ней. Данное условие не зависит от ускорения свободного падения, поэтому по водяному озеру на Титане лодка перевезла бы такой же максимальный груз, как и на Земле. Однако пониженная плотность озёрного этана  $\rho_{\text{этан}} = 560 \text{ кг/м}^3$  по сравнению с водой снижает максимальную допустимую массу загруженной лодки в

$$\frac{\rho_{\text{вода}}}{\rho_{\text{этан}}} = \frac{1000 \text{ кг/м}^3}{560 \text{ кг/м}^3} = 1,8 \text{ раз,}$$

где  $\rho_{\text{вода}} = 1000 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды. Во столько же раз снижается масса груза в предложенной модели лёгкой лодки.



1. а) 4) Южно-Африканской Республики.
- б) 4) Глубоко под землёй.
- в) 3) Планета вне Солнечной системы.
- г) 2) Космический интерферометр «Радиоастрон» (7 микросекунд дуги для молекулярного мазера).
- д) 3) О температуре её поверхности.
- е) 3) Бежевый.
- ж) 1) Инфракрасный — оптический — ультрафиолетовый.

2.  $R = 2h/[2\pi \Delta t/T]^2 \approx 6400$  км, где  $h = 1,8$  м — рост человека,  $\Delta t = 10,3$  с — длительность наблюдения в положении стоя,  $T = 24$  ч.

В положении лёжа луч «глаз наблюдателя — верхний край Солнца» (луч зрения) строго параллелен локальной горизонтальной плоскости (в точке наблюдения). За время  $\Delta t = 10,3$  с наблюдения захода в положении стоя, луч «глаз наблюдателя — верхний край Солнца» отклоняется от строго горизонтального направления с угловой скоростью перемещения Солнца по небу  $\Omega = 2\pi/T$  на угол  $\Delta\varphi = \Omega \Delta t = 2\pi \Delta t/T$ , где  $T = 24$  ч — период суточного хода Солнца. В момент захода в положении стоя точка касания луча зрения с поверхностью Земли находится в вершине прямого угла треугольника, образованного наблюдателем, центром Земли и точкой касания.

Гипотенузу образует наибольшее из трёх расстояний — расстояние от центра Земли до глаз наблюдателя  $R + h$ , где  $R$  — радиус Земли,  $h$  — рост человека. Длинный катет равен радиусу Земли  $R$  — расстояние от центра Земли до точки касания луча зрения. Угол против указанного длинного катета равен углу между лучом зрения и вертикалью —  $\pi/2 - \Delta\varphi$ . Таким образом, отношение длинного катета  $R$  к гипотенузе  $R + h$  равно синусу указанного угла  $\pi/2 - \Delta\varphi$ :

$$\sin(\pi/2 - \Delta\varphi) = \frac{R}{R + h},$$

или эквивалентно

$$\cos \Delta\varphi = \frac{R}{R + h}.$$

В силу малости угла  $\Delta\varphi \sim 10^{-3}$  непосредственный численный расчёт по вышеуказанным тригонометрическим формулам неэффективен (требует точности представления чисел порядка  $(\Delta\varphi)^2 \sim h/R \sim 10^{-6}$ ). Поэтому найдём синус половинного угла  $\Delta\varphi/2$  по формуле

$$\sin(\Delta\varphi/2) = \sqrt{\frac{1 - \cos \Delta\varphi}{2}} = \sqrt{\frac{1 - \frac{R}{R+h}}{2}} = \sqrt{\frac{h}{2(R+h)}} \approx \sqrt{\frac{h}{2R}},$$

что даёт искомую оценку радиуса Земли

$$\begin{aligned} R &= \frac{h}{2\sin^2(\Delta\varphi/2)} \approx \frac{h}{2(\Delta\varphi/2)^2} = \frac{2h}{(\Delta\varphi)^2} = \frac{2h}{(2\pi \Delta t/T)^2} = \\ &= \frac{2 \cdot 1,8 \text{ м}}{[2\pi \cdot 10,3 \text{ с}/(24 \cdot 3600 \text{ с})]^2} \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} = 6400 \text{ км}. \end{aligned}$$

**3. Увеличится на  $mg_0 \Delta h/2$ , где  $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.**

При движении спутника со скоростью  $v$  по низкой круговой орбите радиуса  $r$  его центростремительное ускорение  $v^2/r$  совпадает с локальным ускорением свободного падения  $g(r)$ :

$$\frac{v^2}{r} = g(r). \quad (1)$$

Ускорение свободного падения  $g(r)$  уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния  $r$  до центра Земли (согласно ньютонову закону гравитации), а именно, в  $(r/R)^2$  раз по сравнению со стандартным значением  $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$  на расстоянии радиуса Земли  $R$ :

$$\frac{g_0}{g(r)} = \left(\frac{r}{R}\right)^2.$$

Последнее равенство определяет зависимость

$$g(r) = g_0 \frac{R^2}{r^2}$$

в формуле (1), а вместе с ней и зависимость кинетической энергии спутника массы  $m$  от радиуса орбиты:

$$K(r) = \frac{mv^2}{2} = \frac{mg(r)r}{2} = \frac{mg_0 R^2}{2r}. \quad (2)$$

Кинетическая энергия (2) обратно пропорциональна расстоянию  $r$  от центра Земли и, следовательно, возрастает при переходе спутника на более низкую орбиту (за счёт работы силы тяжести, уменьшенной на работу силы трения).

Тогда при переходе спутника с орбиты радиуса  $r_1$  на орбиту радиуса  $r_2 = r_1 - \Delta h$  кинетическая энергия (2) изменяется на величину

$$\Delta K = K(r_2) - K(r_1) = \frac{mg_0 R^2}{2r_2} - \frac{mg_0 R^2}{2r_1} = \frac{mg_0 R^2}{2} \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} \approx \frac{mg_0 R^2}{2} \frac{\Delta h}{R^2} = \frac{mg_0 \Delta h}{2} > 0$$

— в 2 раза меньше, чем если бы спутник упал вертикально вниз с высоты  $\Delta h$ . Последнее означает, что лишь половина всей работы силы тяжести  $mg_0 \Delta h$  расходуется на увеличение кинетической энергии спутника. Вторая половина работы силы тяжести компенсирует работу силы трения.

#### 4. 4,8 суток.

Перелёт по радиальной прямой в поле тяготения Земли представляет собой движение по предельно сплюснутому эллипсу, у которого малая ось сжата до нулевой длины. В свою очередь, большая ось эллипса соединяет начальную и конечную точки траектории — Землю и орбиту Луны — и равна радиусу орбиты Луны  $r$ . Искомое время перелёта  $t$  составляет половину периода  $\tau = 2t$  обращения по указанному эллипсу. (Полный оборот по эллипсу объединяет в себе полёт до орбиты Луны и возвращение назад к Земле.)

Вместе с тем Луна обращается в том же гравитационном поле Земли по эллиптической траектории в виде окружности с длиной большой оси, равной диаметру данной окружности —  $2r$ . Период обращения Луны  $T = 27$  сут. связан с периодом обращения  $2t$  по

вышеуказанному сплюснутому эллипсу третьим законом Кеплера:

$$\frac{T^2}{(2t)^2} = \frac{(2r)^3}{r^3} = 8,$$

что определяет искомое время перелёта

$$t = \frac{T}{2} / \sqrt{8} = \frac{T}{4\sqrt{2}} = \frac{27 \text{ сут}}{4 \cdot 1,41} = 4,8 \text{ сут.}$$