АСТРОНОМИЯ
ВСЕРОССИЙСКАЯ
ОЛИМПИАДА
ШКОЛЬНИКОВ

Задания
муниципального этапа
2026-2027 учебный год
9 класс

Задание 1.

Спутник над Краснодаром

Искусственный спутник движется по круговой орбите на высоте H=6400 км над поверхностью Земли. В некоторый момент из Краснодара (φ=45° с. ш.) он виден в зените.

1. На каком расстоянии от центра Земли движется спутник?
2. Найдите период обращения спутника. Ответ выразите в часах и округлите до десятых.
3. Найдите линейную скорость спутника.
4. На каком максимальном расстоянии от Краснодара по поверхности Земли (по дуге) может находиться человек, чтобы он тоже мог видеть этот спутник одновременно с наблюдателем, находящимся в Краснодаре, для которого спутник виден в зените?
5. Перечислите все условия, которым должен удовлетворять геостационарный спутник. Может ли данный спутник быть геостационарным? Ответ обоснуйте.

Задание 2.

Наблюдения в Краснодаре

В некоторый момент времени в Краснодаре (φ = 45° с.ш., долгота λ=39° в.д.) вблизи верхней кульминации наблюдались звёзды А ($\alpha = 23^h\,57^m$), Б ($\alpha = 23^h\,59^m$), В ($\alpha = 00^h\,01^m$), Луна ($\alpha = 00^h\,05^m$) и Солнце ($\alpha = 00^h\,00^m$). Все три звезды расположены точно на небесном экваторе. Считайте, что Солнце также находится на небесном экваторе, а Луна – вблизи него (для оценок примите $\delta_{Луны}$=0°). Считайте, что за сутки прямое восхождение Солнца увеличивается примерно на 1°, а Луны – примерно на 13°.

1. Определите местное звёздное время в момент наблюдения.
2. Найдите часовые углы звёзд А, Б, В, Луны и Солнца (ответ выразите в градусах)
3. Чему равно склонение звёзд А, Б, В?
4. На какой высоте в градусах наблюдалась верхняя кульминация звезды А?
5. Определите фазу Луны в этот момент. Ответ обоснуйте.
6. Расставьте небесные тела в порядке их восхода на следующий день.

7. Чему равно склонение Солнца через сутки после описанного момента? Ответ выразите в угловых секундах.

Задание 3.

Транзит экзопланеты

Астрономы наблюдают транзит экзопланеты, которая обращается вокруг звезды, похожей на Солнце. Радиус орбиты планеты равен большой полуоси орбиты Меркурия (0,39 а.е.). Радиус звезды равен радиусу Солнца (696 000 км), а радиус планеты в 10 раз больше радиуса Земли (6371 км). Орбита планеты круговая и лежит в плоскости, перпендикулярной лучу зрения.

1. Определите орбитальный период экзопланеты в земных сутках, используя III закон Кеплера. Считайте, что масса звезды равна массе Солнца.
2. Вычислите линейную скорость движения планеты по орбите. Ответ выразите в км/с.
3. Оцените, какое расстояние (в километрах) планета проходит по диску звезды от момента первого касания до момента последнего касания.
4. Найдите характерную длительность транзита. Ответ выразите в часах, минутах и секундах.

Задание 4.

Фазы Луны на снимке

На рисунке представлена композитная фотография, составленная из снимков Луны, сделанных из одного и того же пункта наблюдения в Северном полушарии Земли в одно и то же время суток (например, в 20:00 по местному времени) в течение нескольких последовательных дней. Снимки расположены слева направо в хронологическом порядке.



1. Определите, является ли Луна на снимке растущей или убывающей. Ответ обоснуйте, обратив внимание на форму терминатора (границы света и тени) и направление «рогов» серпа.

2. Оцените приблизительную элонгацию (угловое расстояние от Солнца) Луны для самого левого и самого правого снимков в последовательности. Оцените

приблизительную элонгацию (угловое расстояние от Солнца) Луны для самого левого и самого правого снимков в последовательности. Используйте приближенную формулу связи доли освещенного диска k и элонгации E

$$k = \frac{1 - \cos E}{2}.$$

Ответ выразите в градусах.

3. Оцените, сколько времени (в земных сутках) прошло между первым и последним снимками, если считать, что синодический период обращения Луны составляет примерно 29,5 суток. Ответ округлите до целых.

Задание 5.

Спектр далёкой галактики

Астрономы получили спектр далёкой галактики. В её спектре обнаружена линия водорода H_α с лабораторной длиной волны $\lambda_0 = 656{,}3$ нм. Наблюдаемая длина волны этой линии оказалась равной $\lambda = 721{,}9$ нм. Считайте, что галактика удаляется от нас, а постоянная Хаббла H_0=70 км/(с·Мпк). 1 Мпк = $3{,}09 \cdot 10^{19}$ км, скорость света с = $3 \cdot 10^5$ км/с.

1. Определите красное смещение z для этой галактики.
2. Найдите скорость удаления галактики v (в км/с). Считать, что скорость много меньше скорости света, поэтому можно использовать формулу $v = c \cdot z$.
3. Оцените расстояние r до галактики в мегапарсеках (Мпк), используя закон Хаббла.
4. Во сколько раз энергия фотона H_α, прилетевшего от этой галактики и зарегистрированного астрономами, меньше энергии фотона H_α в момент его излучения в галактике?

Задание 6.

Сверхновая в далекой галактике

В одной из далёких галактик вспыхнула сверхновая звезда типа Ia. В максимуме блеска её видимая звёздная величина составила $m = 18{,}0^m$. Известно, что абсолютная звёздная величина сверхновых этого типа примерно одинакова и равна $M = -19{,}0^m$.

1. Оцените расстояние до этой галактики в парсеках (пк) и в мегапарсеках (Мпк). Используйте формулу связи видимой и абсолютной звёздной величины.
2. Во сколько раз видимая яркость (освещённость) этой сверхновой в максимуме больше яркости звезды с видимой звёздной величиной $m_0 = 22{,}0^m$? Используйте формулу Погсона.
3. Сможет ли эту сверхновую увидеть невооружённым глазом наблюдатель на Земле? Ответ обоснуйте. Предельная звёздная величина для невооружённого глаза при идеальных условиях наблюдения равна $m_{пред} = 6{,}0^m$

4. Если бы эта сверхновая вспыхнула на расстоянии 10 пк от Земли, какой была бы её видимая звёздная величина? Сравните её с видимой звёздной величиной Солнца ($m_\odot = -26{,}7^m$) и сделайте вывод, была бы она ярче или слабее Солнца.

АСТРОНОМИЯ
ВСЕРОССИЙСКАЯ
ОЛИМПИАДА
ШКОЛЬНИКОВ

Справочные материалы
муниципального этапа
2026-2027 учебный год
9 класс

Участники имеют право пользоваться собственным калькулятором, любыми своими канцелярскими принадлежностями.

Справочные данные

§1. Основные физические и астрономические постоянные

Гравитационная постоянная $G = 6.672 \cdot 10^{-11}$ м^3 ·кг$^{-1}$ ·с$^{-2}$
Скорость света в вакууме $c = 2.998 \cdot 10^8$ м/с
Универсальная газовая постоянная $R = 8.31$ м^2 ·кг·с$^{-2}$ ·К$^{-1}$ ·моль$^{-1}$
Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ кг·с$^{-3}$ К$^{-4}$
Масса протона $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса электрона $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31}$ кг
Астрономическая единица 1 а.е. $= 1.496 \cdot 10^{11}$ м
Парсек 1 пк = 206 265 а.е. $= 3.086 \cdot 10^{16}$ м
Постоянная Хаббла H = 68 (км/с)/Мпк

§2. Данные о Солнце

Радиус 695 000 км
Масса $1.989 \cdot 10^{30}$ кг
Светимость $3.88 \cdot 10^{26}$ Вт
Спектральный класс G2
Видимая звездная величина -26.78^m
Абсолютная болометрическая звездная величина $+4.72^m$
Показатель цвета (B–V) $+0.67^m$
Эффективная температура 5800 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 суток
Средняя орбитальная скорость 29.8 км/с
Период вращения 23 часа 56 минут 04 секунды
Наклон экватора к эклиптике на эпоху 2000 года: 23° 26′ 21.45″
Экваториальный радиус 6378.14 км
Полярный радиус 6356.77 км
Масса $5.974 \cdot 10^{24}$ кг
Средняя плотность 5.52 г·см$^{-3}$
Объемный состав атмосферы: N2 (78%), O2 (21%), Ar (~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° 09′
Сидерический (звездный) период обращения 27.321662 суток
Синодический период обращения 29.530589 суток
Радиус 1738 км
Масса $7.348 \cdot 10^{22}$ кг или 1/81.3 массы Земли
Средняя плотность 3.34 г·см$^{-3}$
Визуальное геометрическое альбедо 0.12
Видимая звездная величина в полнолуние -12.7^m
Видимая звездная величина в первой и последней четверти -10^m

§5. Физические характеристики Солнца и планет

Объект	Масса		Радиус		Плотность	Период вращения вокруг оси	Наклон экватора к пл. орб.	Геометр. альбедо	Видимая звездная величина*
	кг	массы Земли	км	радиусы Земли	г·см$^{-3}$		градусы		
Солнце	$1{,}989 \cdot 10^{30}$	332946	695000	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	$-0{,}1^m$
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	904494	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 внутренних планет 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.		градусы		сут
Меркурий	57,9	0,3871	0,2059	7,004	87,97 сут	115,9
Венера	108,2	0,7233	0,0038	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

§8. Характеристики некоторых спутников планет

Спутник	Масса	Радиус	Плотность	Радиус орбиты	Период обращения	Геометрическое альбедо	Видимая зв. величина*
	кг	км	г/см3	км	сут		
Земля							
Луна	$7{,}348\cdot10^{22}$	1738	3,34	384400	27,32166	0,12	$-12{,}7^{m}$
Марс							
Фобос	$1{,}08\cdot10^{16}$	~10	2,0	9380	0,31910	0,06	$11{,}3^{m}$
Деймос	$1{,}8\cdot10^{15}$	~6	1,7	23460	1,26244	0,07	$12{,}4^{m}$
Юпитер							
Ио	$8{,}94\cdot10^{22}$	1815	3,55	421800	1,769138	0,61	$5{,}0^{m}$
Европа	$4{,}8\cdot10^{22}$	1569	3,01	671100	3,551181	0,64	$5{,}3^{m}$
Ганимед	$1{,}48\cdot10^{23}$	2631	1,94	1070400	7,154553	0,42	$4{,}6^{m}$
Каллисто	$1{,}08\cdot10^{23}$	2400	1,86	1882800	16,68902	0,20	$5{,}7^{m}$
Сатурн							
Тефия	$7{,}55\cdot10^{20}$	530	1,21	294660	1,887802	0,9	$10{,}2^{m}$
Диона	$1{,}05\cdot10^{21}$	560	1,43	377400	2,736915	0,7	$10{,}4^{m}$
Рея	$2{,}49\cdot10^{21}$	765	1,33	527040	4,517500	0,7	$9{,}7^{m}$
Титан	$1{,}35\cdot10^{23}$	2575	1,88	1221850	15,94542	0,21	$8{,}2^{m}$
Япет	$1{,}88\cdot10^{21}$	730	1,21	3560800	79,33018	0,2	$\sim11{,}0^{m}$
Мимас	$3{,}7\cdot10^{19}$	198,2	1,149	185539	0,942	0,962	12,9
Уран							
Миранда	$6{,}33\cdot10^{19}$	235,8	1,15	129900	1,413479	0,27	$16{,}3^{m}$
Ариэль	$1{,}7\cdot10^{21}$	578,9	1,56	190900	2,520379	0,34	$14{,}2^{m}$
Умбриэль	$1{,}27\cdot10^{21}$	584,7	1,52	266000	4,144177	0,18	$14{,}8^{m}$
Титания	$3{,}49\cdot10^{21}$	788,9	1,70	436300	8,705872	0,27	$13{,}7^{m}$
Оберон	$3{,}03\cdot10^{21}$	761,4	1,64	583500	13,46324	0,2	$13{,}9^{m}$
Нептун							
Тритон	$2{,}14\cdot10^{22}$	1350	2,07	354800	5,87685**	0,7	$13{,}5^{m}$

* – для полнолуния или среднего противостояния внешних планет

** – обратное вращение

АСТРОНОМИЯ
ВСЕРОССИЙСКАЯ
ОЛИМПИАДА
ШКОЛЬНИКОВ

Критерии оценивания
заданий
муниципального этапа
2026-2027 учебный год
9 класс

Задание 1.

Спутник над Краснодаром

Искусственный спутник движется по круговой орбите на высоте H=6400 км над поверхностью Земли. В некоторый момент из Краснодара (φ=45° с. ш.) он виден в зените. **Общий балл за задачу - 16.**

1. На каком расстоянии от центра Земли движется спутник? **(2 балла)**
2. Найдите период обращения спутника. Ответ выразите в часах и округлите до десятых. **(3 балла)**
3. Найдите линейную скорость спутника. **(3 балла)**
4. На каком максимальном расстоянии от Краснодара по поверхности Земли (по дуге) может находиться человек, чтобы он тоже мог видеть этот спутник одновременно с наблюдателем, находящимся в Краснодаре, для которого спутник виден в зените? **(5 баллов)**
5. Перечислите все условия, которым должен удовлетворять геостационарный спутник. Может ли данный спутник быть геостационарным? Ответ обоснуйте. **(3 балла)**

Решение

1. **На каком расстоянии от центра Земли движется спутник?**
   Высота складывается из радиуса Земли R и высоты орбиты H.

$$r = R + H = 6371 + 6400 = 12771 \text{ км}.$$

Критерии:

Максимальный балл – 2 при разбросе от 12756 до 12778 км.

Средний радиус: 6371 км.

Экваториальный радиус: 6378,1 км.

Полярный радиус: 6356,8 км.

Написана только формула и/или результат не попадает в рамки разброса – 1 балл.

2. **Найдите период обращения спутника. Ответ выразите в часах и округлите до десятых.**

Формулу для периода обращения можно записать через гравитационный параметр или гравитационную постоянную

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{\mu}} \quad , \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(1{,}2771 \cdot 10^7)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}97 \cdot 10^{24}}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2{,}083 \cdot 10^{21}}{3{,}982 \cdot 10^{14}}} = 2\pi\sqrt{5{,}23 \cdot 10^6}$$

$$T \approx 2\pi \cdot 2287 \text{ с} \approx 14370 \text{ с}$$

$$T \approx \frac{14370}{3600} \approx 3{,}99 \text{ ч} \approx 4{,}0 \text{ ч}$$

Критерии:

Максимальный балл – 3.

Написана только формула – 1.

Написана формула и выполнены вычисления, но отсутствуют единицы измерения и/или арифметическая ошибка – 2.

Написана формула, выполнены вычисления, указаны единицы измерения – 3.

3. **Найдите линейную скорость спутника.**
   Исходная формула может быть записана и через ускорение свободного падения на соответствующей высоте

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad , \quad v = \sqrt{g_h \cdot (R + h)}$$

$$v = \sqrt{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}97 \cdot 10^{24}}{1{,}2771 \cdot 10^7}}$$

$$v = \sqrt{\frac{3{,}982 \cdot 10^{14}}{1{,}2771 \cdot 10^7}} = \sqrt{3{,}118 \cdot 10^7}$$

$$v \approx 5{,}58 \cdot 10^3 \text{ м/с}$$

Критерии:

Максимальный балл – 3.

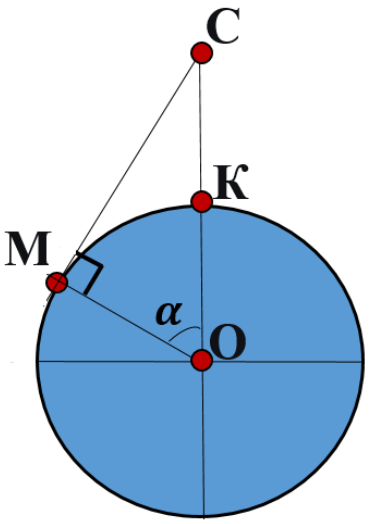
Написана только формула – 1.

Написана формула и выполнены вычисления, но отсутствуют единицы измерения и/или арифметическая ошибка – 2.

Написана формула, выполнены вычисления, указаны единицы измерения – 3.

4. **На каком максимальном расстоянии от Краснодара по поверхности Земли (по дуге) может находиться человек, чтобы он тоже мог видеть этот спутник одновременно с наблюдателем, находящимся в Краснодаре, для которого спутник виден в зените?**

В решении должен присутствовать рисунок. *К* – наблюдатель в Краснодаре. *С* – положение спутника. *М* – положение второго наблюдателя (см. задание). Треугольник ОМС – прямоугольный, т.к. МС – луч зрения направлен по касательной к поверхности Земли. ОМ = ОК = R. Из треугольника ОМС находится угол α (радианы или градусы). Длина дуги находится, зная R и α. Далее приводится решение.



$$\cos\alpha = \frac{R}{R+H} = \frac{6371}{12771} \approx 0{,}4989$$

$$\cos\alpha \approx 0{,}5$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R}{R+H}\right)$$

$$\alpha \approx \arccos(0{,}5) = \frac{\pi}{3}$$

$$\alpha^\circ = \frac{180^\circ}{\pi}\arccos\left(\frac{R}{R+H}\right)$$

$$\alpha^\circ \approx 60^\circ$$

$$MK = \frac{\pi R\,\alpha}{180^\circ}$$

$$MK = R\alpha = 6371 \cdot \frac{\pi}{3} \approx 6670 \text{ км}$$

Критерии:

Максимальный балл – 5.

Наличие правильного рисунка с обозначениями – 2 (без обозначений – 1).

Расчет центрального угла α (в градусах или радианах) – 2 (формула + вычисления по 1 баллу).

Вычисление длины дуги МК – 1.

5. Перечислите все условия, которым должен удовлетворять геостационарный спутник. Может ли данный спутник быть геостационарным? Ответ обоснуйте. **(3 балла)**

Геостационарный спутник должен удовлетворять условиям:

1. Круговая форма орбиты.
2. Строго определенная высота 35790 км.
3. Период обращения 23 часа 56 минут и 4 секунды.
4. Двигаться в плоскости экватора (φ = 0).
5. Спутник должен двигаться с запада на восток.

Согласно выполненным вычислениям:

1. Круговая форма орбиты (выполняется).
2. Строго определенная высота должна быть 35790 км. По итогам решения H= 6400 км (не выполняется)
3. Период обращения должен быть 23 час. 56 мин. 4 сек. По итогам решения T = 4 часа (не выполняется).
4. Двигаться в плоскости экватора (φ = 0). По итогам решения φ = 45° с.ш. (не выполняется).
5. Спутник должен двигаться с запада на восток. Из условия задачи не определяется.

Ответ: спутник не является геостационарным, т.к. не выполняются 3 условия.

Критерии:

Максимальный балл – 3.

Перечислены все условия геостационарного спутника – 1.

Дан ответ, что спутник не является геостационарным – 1.

Дано полное обоснование относительно трех невыполняющихся условий – 1.

Задание 2.

Наблюдения в Краснодаре

В некоторый момент времени в Краснодаре (φ = 45° с.ш., долгота λ=39° в.д.) вблизи верхней кульминации наблюдались звёзды А ($\alpha = 23^h\,57^m$), Б ($\alpha = 23^h\,59^m$), В ($\alpha = 00^h\,01^m$), Луна ($\alpha = 00^h\,05^m$) и Солнце ($\alpha = 00^h\,00^m$). Все три звезды расположены точно на небесном экваторе. Считайте, что Солнце также находится на небесном экваторе, а Луна – вблизи него (для оценок примите

$\delta_{Луны}$=0°). Считайте, что за сутки прямое восхождение Солнца увеличивается примерно на 1°, а Луны – примерно на 13°. **Общий балл за задачу - 16.**

1. Определите местное звёздное время в момент наблюдения. **(1 балл)**
2. Найдите часовые углы звёзд А, Б, В, Луны и Солнца (ответ выразите в градусах). **(2 балла)**
3. Чему равно склонение звёзд А, Б, В? **(1 балл)**
4. На какой высоте в градусах наблюдалась верхняя кульминация звезды А? **(2 балла)**
5. Определите фазу Луны в этот момент. Ответ обоснуйте. **(4 балла)**
6. Расставьте тела в порядке их восхода на следующий день. **(3 балла)**
7. Чему равно склонение Солнца через сутки после описанного момента? Ответ выразите в угловых секундах. **(3 балла)**

Решение

1. Определите местное звёздное время в момент наблюдения.

Местное звёздное время – это часовой угол точки весеннего равноденствия. Оно также связано с любым светилом формулой (α_0 – прямое восхождение светила, t_0 – его часовой угол:

$$s = t_0 + \alpha_0$$

Солнце наблюдалось вблизи верхней кульминации, т.е. его часовой угол

$$t_\odot = 0$$

.

Прямое восхождение Солнца дано α = 00h 00m, следовательно местное звёздное время в момент наблюдения 0.

Критерии:

Максимальный балл – 1

2. Найдите часовые углы звёзд А, Б, В, Луны и Солнца (ответ выразите в градусах)

Часовой угол связан с прямым восхождением и звездным временем формулой:

$$t_0 = s - \alpha_0$$

Звезда А: ($\alpha = 23^h\,57^m$)

$$t_А = 0^h00^m - 23^h\,57^m = -23^h\,57^m$$

Добавим 24 часа, чтобы получить положительный западный часовой угол:

$$t_А = 24^h00^m - 23^h\,57^m = 0^h\,03^m = +0{,}75°.$$

Звезда Б: ($\alpha = 23^h\,59^m$)

$$t_Б = 0^h00^m - 23^h\,59^m = -23^h\,59^m$$

Добавим 24 часа, чтобы получить положительный западный часовой угол:

$$t_Б = 24^h00^m - 23^h\,59^m = 0^h\,01^m = +0{,}25°.$$

Звезда В: ($\alpha = 00^h\,01^m$)

$$t_В = 0^h00^m - 00^h\,01^m = -00^h\,01^m = -0{,}25°.$$

Луна: ($\alpha = 00^h\,05^m$)

$$t_Л = 0^h00^m - 00^h\,05^m = -00^h\,05^m = -1{,}25°.$$

Солнце 0°.

Все часовые углы малы (меньше 1,5°), что соответствует условию «вблизи верхней кульминации».

Критерии:

Максимальный балл – 2

Оценка не превышает 1 балл, если значения часовых углов представлены в часах или имеется арифметическая ошибка.

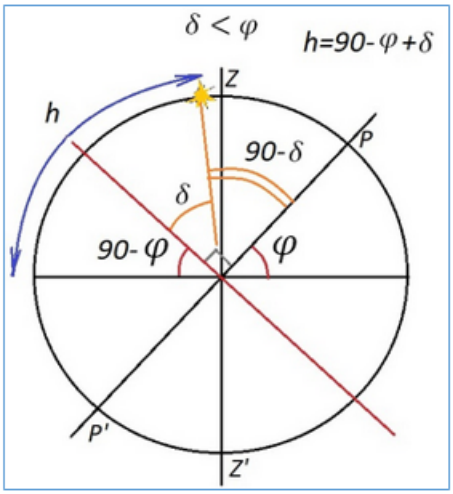
3. Чему равно склонение звёзд А, Б, В?

Все три звезды на небесном экваторе, значит δ=0°.

Критерии:

Максимальный балл – 1

4. На какой высоте в градусах наблюдалась верхняя кульминация звезды А?



$$h = 90° - \varphi + \delta = 90° - 45° + 0° = 45°.$$

Критерии:

Максимальный балл – 2

5. Определите фазу Луны в этот момент. Ответ обоснуйте.

Фаза Луны определяется взаимным расположением Солнца, Земли и Луны. Необходимо найти элонгацию Луны (угловое расстояние между Луной и Солнцем на небесной сфере).

Если элонгация 0° – новолуние.

Если элонгация 90° – первая четверть (Луна восточнее Солнца) или последняя четверть (западнее).

Если элонгация 180° – полнолуние.

Т.к. и Солнце, и Луна находятся вблизи небесного экватора (δ≈0°), угловое расстояние между ними примерно равно разности прямых восхождений:

Разность прямых восхождений Луны и Солнца:

$$E = \Delta\alpha = \alpha_{\text{Луны}} - \alpha_{\odot} = 00^{h}05^{m} - 00^{h}00^{m} = 5^{m} = 1{,}25°.$$

Это и есть элонгация Луны.

Анализ элонгации. Элонгация очень мала. Это означает, что Луна находится почти в том же направлении, что и Солнце. При этом αЛуны > α⊙, т.е. Луна восточнее Солнца. Значит, после новолуния прошло некоторое время, и Луна должна быть растущей.

Оценка фазы.

Доля освещенности поверхности:

$$k = \frac{1 + \cos(i)}{2}$$

Фазовый угол *i* – это угол при Луне между направлениями на Солнце и на Землю. Элонгация E – это угол при Земле между направлениями на Солнце и на Луну. Для далёкого Солнца эти углы связаны как дополнительные:

$$i + E = 180°.$$

$$i \approx 180° - E = 180° - 1{,}25° = 178{,}75°.$$

$$k = \frac{1 + \cos(178{,}75°)}{2} \approx 0{,}000118$$

Округлим до 0,00012.

Т.е. примерно 0,012% диска Луны. Это ничтожно малая часть. Луна находится практически в новолунии. Формально, поскольку она восточнее Солнца, это очень тонкий растущий серп сразу после новолуния. Однако при элонгации всего 1,25° Луна не видна на фоне яркого дневного неба, и её фаза может быть названа новолунием.

Критерии:

Максимальный балл – 4

Вычисление элонгации как разности прямых восхождений Луны и Солнца – 1 балл.

Формула доли освещенности поверхности – 1 балл.

Верное вычисление доли освещенности с учетом *i* ≈ 180° − *E* – 2 балла (если в формулу выставлено *E* вместо *i* – снимается 1 балл).

Анализ и вывод фаза Луны – новолуние или очень тонкий растущий серп – 1 балл.

6. Расставьте небесные тела в порядке их восхода на следующий день.

Для наблюдателя на данной широте φ момент восхода светила зависит от его прямого восхождения α и склонения δ. На экваторе склонение 0. Для таких светил момент восхода определяется только прямым восхождением: чем меньше α, тем раньше светило взойдёт. Учтем изменение прямых восхождений за сутки:

Звёзды практически не меняют своё прямое восхождение, их собственное движение ничтожно.

Солнце за сутки увеличивает α примерно на 1° = 4^{m}.

Луна за сутки увеличивает α примерно на 13° = 52^{m}.

Прямые восхождения на следующий день:

Звезда А: 23^h57^m
Звезда Б: 23^h59^m
Звезда В: 00^h01^m
Солнце: 00^h04^m
Луна: 00^h57^m

Расстановка по порядку восхода:

Звезда А, **Звезда Б, Звезда В, Солнце, Луна.**

Объекты находятся около точки весеннего равноденствия, то есть около 0^h, поэтому удобно сравнивать не сами α, а их отклонение от 0.

23^h57^m – это на 3 минуты раньше 0^h, т.е. -3^m;
23^h59^m – это на 1 минуту раньше 0^h, т.е. -1^m;
00^h01^m – это на 1 минуту позже 0^h, т.е. $+1^m$;
00^h04^m – это на 4 минуты позже 0^h, т.е. $+4^m$;
00^h57^m– это на 57 минут позже 0^h, т.е. $+57^m$.

Критерии:

Максимальный балл – 3

Утверждение, что для данных светил момент восхода определяется только прямым восхождением – 1 балл.

Учет изменения прямых восхождений Луны и Солнца за сутки – 1 балл.

Верная расстановка по порядку восхода – 1 балл.

7. Чему равно склонение Солнца через сутки после описанного момента?

По условию, за сутки прямое восхождение Солнца увеличивается примерно на 1°. Вблизи точки весеннего равноденствия Солнце движется по эклиптике, наклонённой к небесному экватору на угол $\varepsilon \approx 23{,}44°$.

Изменение склонения при малом смещении по эклиптике на $\Delta\lambda=1°$ можно оценить по формуле

$$\sin\delta=\sin\varepsilon\cdot\sin\lambda.$$

При $\lambda=0$ $\delta=0$.

При $\lambda=1°$:

$$\sin\delta \approx \sin 23{,}44°\cdot\sin 1° \approx 0{,}3977\cdot 0{,}01745 \approx 0{,}00694.$$

$$\delta \approx \arcsin(0{,}00694) \approx 0{,}3976° \approx 0{,}4°.$$

Переведём в угловые секунды:

$$0{,}4° = 0{,}4\cdot 3600'' = 1440''.$$

Знак положительный, так как Солнце переходит в северное полушарие небесной сферы.

Критерии:

Максимальный балл – 3

Запись исходной формулы – 1 балл.

Верный расчет склонения в угловых секундах – 2 балла.

Расчет склонения приведен в градусах или имеется арифметическая ошибка – снимается 1 балл.

Задание 3.

Транзит экзопланеты

Астрономы наблюдают транзит экзопланеты, которая обращается вокруг звезды, похожей на Солнце. Радиус орбиты планеты равен большой полуоси орбиты Меркурия (0,39 а.е.). Радиус звезды равен радиусу Солнца (696 000 км), а радиус планеты в 10 раз больше радиуса Земли (6371 км). Орбита планеты круговая и лежит в плоскости, перпендикулярной лучу зрения.

1. Определите орбитальный период экзопланеты в земных сутках, используя III закон Кеплера. Считайте, что масса звезды равна массе Солнца. **(4 балла)**
2. Вычислите линейную скорость движения планеты по орбите. Ответ выразите в км/с. **(4 балла)**
3. Оцените, какое расстояние (в километрах) планета проходит по диску звезды от момента первого касания до момента последнего касания. **(4 балла)**
4. Найдите характерную длительность транзита. Ответ выразите в часах, минутах и секундах. **(4 балла)**

Решение

1. Определите орбитальный период экзопланеты в земных сутках, используя III закон Кеплера. Считайте, что масса звезды равна массе Солнца.

Используем III закон Кеплера в форме для Солнечной системы:

$$T^2 = a^3,$$

где T – период в годах, a – большая полуось в а.е.

Подставляем $a = 0{,}39$:

$$T = \sqrt{0{,}39^3} = \sqrt{0{,}059319} \approx 0{,}2436 \text{ года.}$$

Перевод в земные сутки.

$$T = 0{,}2436 \cdot 365{,}25 \approx 88{,}96 \text{ суток.}$$

Округляем:

$$T \approx 89 \text{ суток.}$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет в земных сутках – 2 балла.

2. Вычислите линейную скорость движения планеты по орбите. Ответ выразите в км/с.

Планета движется по круговой орбите, поэтому её линейная скорость:

$$v = \frac{2\pi a}{T}.$$

Перевод радиуса орбиты в километры (1 а.е. =$1{,}496 \cdot 10^8$ км):

$$a = 0{,}39 \cdot 1{,}496 \cdot 10^8 \approx 5{,}834 \cdot 10^7 \text{ км.}$$

Перевод периода в секунды:

$$T = 88{,}96 \cdot 86400 \approx 7{,}686 \cdot 10^6 \text{ с}.$$

Вычисление скорости:

$$v = \frac{2\pi \cdot 5{,}834 \cdot 10^7}{7{,}686 \cdot 10^6} \approx 47{,}7 \text{ км/с}.$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет в км/с – 2 балла.

3. Оцените, какое расстояние (в километрах) планета проходит по диску звезды от момента первого касания до момента последнего касания.

Т.к. орбита лежит в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, транзит центральный: планета проходит точно через центр диска звезды.

От первого касания до последнего касания центр планеты перемещается на расстояние:

$$L = 2R_{Солн.} + 2r_{экзопл}.$$

Вычисления:

$r_{экзопл.} = 10 \cdot 6371 = 63710$ км.

$$L = 2 \cdot 696\,000 + 2 \cdot 63\,710 = 1\,392\,000 + 127\,420 = 1\,519\,420 = 1.52 \cdot 10^6 \text{ км}.$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет в км – 2 балла.

4. Найдите характерную длительность транзита. Ответ выразите в часах, минутах и секундах.

Длительность транзита равна времени, за которое планета проходит расстояние L со скоростью v:

$$t = \frac{L}{v}.$$

$$t = \frac{1\,519\,420}{47{,}7} \approx 31\,854 \text{ с}.$$

$$t = \frac{31\,854}{3600} \approx 8{,}85 \text{ ч}.$$

$$t \approx 8 \text{ ч } 51 \text{ мин}$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет в часах, минутах и секундах – 2 балла.

Если ответ не представлен хотя бы в одной из единиц измерения или допущена арифметическая ошибка – снимается 1 балл.

Задание 4.

Фазы Луны на снимке

На рисунке представлена композитная фотография, составленная из снимков Луны, сделанных из одного и того же пункта наблюдения в Северном полушарии Земли в одно и то же время суток (например, в 20:00 по местному времени) в течение нескольких последовательных дней. Снимки расположены слева направо в хронологическом порядке.



1. Определите, является ли Луна на снимке растущей или убывающей. Ответ обоснуйте, обратив внимание на форму терминатора (границы света и тени) и направление «рогов» серпа. **(4 балла)**
2. Оцените приблизительную элонгацию (угловое расстояние от Солнца) Луны для самого левого и самого правого снимков в последовательности. Оцените приблизительную элонгацию (угловое расстояние от Солнца) Луны для самого левого и самого правого снимков в последовательности. Используйте приближенную формулу связи доли освещенного диска k и элонгации E

$$k = \frac{1 - \cos E}{2}.$$

Ответ выразите в градусах. **(6 баллов)**

3. Оцените, сколько времени (в земных сутках) прошло между первым и последним снимками, если считать, что синодический период обращения Луны составляет примерно 29,5 суток. Ответ округлите до целых. **(6 баллов)**

Решение

1. Определите, является ли Луна на снимке растущей или убывающей. Ответ обоснуйте, обратив внимание на форму терминатора (границы света и тени) и направление «рогов» серпа.

Луна растущая. На фотографии видна последовательность: слева – тонкий серп, справа – полнолуние. Освещённая часть диска увеличивается слева направо. Значит, Луна растёт.

На снимке хорошо видно, что у тонкого серпа (левый край) освещённая часть имеет выпуклость, обращённую вправо, а «рога» серпа смотрят влево и вверх. Это значит, что терминатор выпуклый вправо, т.е. в сторону увеличения фазы. Такая форма терминатора характерна для растущей Луны в Северном полушарии.

Направление «рогов» серпа. У растущей Луны в Северном полушарии серп обращён «рогами» влево и вверх (если смотреть на западную часть неба вечером). На снимке именно так: тонкий серп имеет выпуклость вправо, а «рога» смотрят влево-вверх. Это подтверждает, что Луна растущая.

Критерии:

Максимальный балл – 4

Вывод, что Луна растущая – 2 балла.

Анализ линии терминатора и рогов серпа – 2 балла.

2. Оцените приблизительную элонгацию (угловое расстояние от Солнца) Луны для самого левого и самого правого снимков в последовательности. Используйте приближенную формулу связи доли освещенного диска k и элонгации E

$$k = \frac{1 - \cos E}{2}.$$

Ответ выразите в градусах.

Левый снимок.

На нём виден очень тонкий серп. Освещённая часть составляет примерно $k \approx 0{,}05$-$0{,}1$ (5–10% диска). Тогда:

$$0{,}05 = \frac{1 - \cos E}{2} \Rightarrow \cos E = 0{,}9 \Rightarrow E \approx 25^\circ.$$

$$k \approx 0{,}1, \text{ то } \cos E = 0{,}8,\ E \approx 37^\circ.$$

Оценка может варьироваться от 25 до 37°.

Правый снимок.

Это полнолуние. Диск освещён полностью, k=1.

$$1 = \frac{1 - \cos E}{2} \Rightarrow \cos E = -1 \Rightarrow E = 180^\circ.$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Оценка элонгации для левого снимка

- в пределах от 25° до 37° – 4 балла,

- в пределах от 20° до 40° – 2 балла.

Оценка элонгации для правого снимка 180° – 2 балла.

3. Оцените, сколько времени (в земных сутках) прошло между первым и последним снимками, если считать, что синодический период обращения Луны составляет примерно 29,5 суток. Оцените также через элонгацию. Ответ округлите до целых.

1-й вариант. Возраст Луны на снимках.

Левый снимок: тонкий серп. Это примерно 2–3 суток после новолуния (возраст Луны 2–3 дня).

Правый снимок: полнолуние. Это примерно 14–15 суток после новолуния (середина синодического месяца).

Разница в возрасте 11-13 суток.

2-й вариант. Полный цикл смены фаз (от новолуния до новолуния) занимает 29,5 суток. Половина цикла (от новолуния до полнолуния) – 14,75 суток. Но на первом снимке не новолуние, а уже серп, поэтому интервал меньше 14,75 суток и составляет около 10–12 суток.

3-й вариант. Расчет через элонгацию.

Слева снимок $E \approx 25°$, справа $E = 180°$. Разница 155°. За сутки Луна смещается на 13,2°, значит время:

$$\frac{155}{13{,}2} \approx 11{,}7 \text{ суток.}$$

Для элонгации в пределах от 20° до 40° – интервал 10,6 – 11,7 суток.

Критерии:

Максимальный балл – 6

Оценка возраста Луны (1 или 2 вариант) 10 – 13 суток – 3 балла (если оценка 9, 14 суток – 2 балла)

Оценка возраста Луны (3 вариант) 10 – 12 суток – 6 баллов (если оценка 9, 14 суток – 5 баллов)

Задание 5.

Спектр далёкой галактики

Астрономы получили спектр далёкой галактики. В её спектре обнаружена линия водорода H_α с лабораторной длиной волны $\lambda_0 = 656{,}3$ нм. Наблюдаемая длина волны этой линии оказалась равной $\lambda = 721{,}9$ нм. Считайте, что галактика удаляется от нас, а постоянная Хаббла H_0=70 км/(с·Мпк). 1 Мпк = $3{,}09 \cdot 10^{19}$ км, скорость света с=$3 \cdot 10^5$ км/с.

1. Определите красное смещение z для этой галактики. **(4 балла)**
2. Найдите скорость удаления галактики *v* (в км/с). Считать, что скорость много меньше скорости света. **(4 балла)**
3. Оцените расстояние *r* до галактики в мегапарсеках (Мпк), используя закон Хаббла. **(4 балла)**
4. 4. Во сколько раз энергия фотона H_α, прилетевшего от этой галактики и зарегистрированного астрономами, меньше энергии фотона H_α в момент его излучения в галактике? **(4 балла)**

Решение

1. Определите красное смещение z для этой галактики.

Красное смещение определяется как относительное изменение длины волны:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

$$z = \frac{721{,}9 - 656{,}3}{656{,}3} = \frac{65{,}6}{656{,}3} \approx 0{,}1$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет z – 2 балла.

2. Найдите скорость удаления галактики v (в км/с). Считать, что скорость много меньше скорости света.

При $z \ll 1$ скорость удаления связана с красным смещением формулой:

$$v = c \cdot z$$

$$v = 3 \cdot 10^5 \text{ км/с} \cdot 0{,}1 = 3 \cdot 10^4 \text{ км/с} = 30\,000 \text{ км/с}$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет v – 2 балла.

3. Оцените расстояние r до галактики в мегапарсеках (Мпк), используя закон Хаббла.

По закону Хаббла:

$$v = H_0 \cdot r \quad \Rightarrow \quad r = \frac{v}{H_0}$$

$$r = \frac{30\,000}{70} \approx 428{,}6 \text{ Мпк}$$

$$r \approx 429 \text{ Мпк}$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный расчет r – 2 балла.

4. Во сколько раз энергия фотона H_α, прилетевшего от этой галактики и зарегистрированного астрономами, меньше энергии фотона H_α в момент его излучения в галактике?

Энергия фотона обратно пропорциональна длине волны:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Отношение энергий:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{721{,}9}{656{,}3} = 1{,}1$$

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Ответ 1,1 или 10% – 2 балла.

Задание 6.

Сверхновая в далекой галактике

В одной из далёких галактик вспыхнула сверхновая звезда типа Ia. В максимуме блеска её видимая звёздная величина составила m =18,0^m. Известно, что абсолютная звёздная величина сверхновых этого типа примерно одинакова и равна M = −19,0^m.

1. Оцените расстояние до этой галактики в парсеках (пк) и в мегапарсеках (Мпк). Используйте формулу связи видимой и абсолютной звёздной величины. **(6 баллов)**
2. Во сколько раз видимая яркость (освещённость) этой сверхновой в максимуме больше яркости звезды с видимой звёздной величиной m_0=22,0^m? Используйте формулу Погсона. **(4 балла)**
3. Сможет ли эту сверхновую увидеть невооружённым глазом наблюдатель на Земле? Ответ обоснуйте. Предельная звёздная величина для невооружённого глаза при идеальных условиях наблюдения равна $m_{пред}$ = 6,0^m. **(5 баллов)**
4. Если бы эта сверхновая вспыхнула на расстоянии 10 пк от Земли, какой была бы её видимая звёздная величина? Сравните её с видимой звёздной величиной Солнца ($m_\odot$ = −26,7^m) и сделайте вывод, была бы она ярче или слабее Солнца. **(5 баллов)**

Решение

1. Оцените расстояние до этой галактики в парсеках (пк) и в мегапарсеках (Мпк). Используйте формулу связи видимой и абсолютной звёздной величины.

Используем формулу связи видимой и абсолютной звёздной величины:

$$m - M = 5 \lg d - 5$$

$m = 18{,}0^m$, $M = -19{,}0^m$:

$$18 - (-19) = 5 \lg d - 5$$

$$37 = 5 \lg d - 5$$

$$5 \lg d = 42$$

$$\lg d = 8{,}4$$

$$d = 10^{8{,}4} \approx 2{,}51 \cdot 10^8 \text{ пк} \approx 251 \text{ Мпк}$$

Критерии:

Максимальный балл – 6

Запись исходной формулы – 3 балла.

Вычисление расстояния в пк и Мпк – 3 балла. Если только в пк -2 балла.

Арифметическая ошибка – снимается 1 балл.

2. Во сколько раз видимая яркость (освещённость) этой сверхновой в максимуме больше яркости звезды с видимой звёздной величиной m_0=22,0^m? Используйте формулу Погсона.

Используем формулу Погсона для двух звёздных величин: m_1 = 18,0^m, m_2 =22,0^m.

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{0{,}4(m_2 - m_1)} = 10^{0{,}4(22-18)} = 10^{0{,}4 \cdot 4} = 10^{1{,}6}$$

$$10^{1{,}6} \approx 39{,}8$$

Яркость сверхновой примерно в 40 раз больше яркости звезды m_2.

Критерии:

Максимальный балл – 4

Запись исходной формулы – 2 балла.

Верный результат вычисления – 2 балла.

Арифметическая ошибка – снимается 1 балл.

3. Сможет ли эту сверхновую увидеть невооружённым глазом наблюдатель на Земле? Ответ обоснуйте. Предельная звёздная величина для невооружённого глаза при идеальных условиях наблюдения равна $m_{пред}$ = 6,0^m

Т.к. 18,0^m>6,0^m, сверхновая значительно слабее предельной величины. Разность звёздных величин:

$$\Delta m = 18 - 6 = 12^m$$

.

Это соответствует ослаблению яркости в 63000 раз:

$$10^{0,4 \cdot 12} = 10^{4,8} \approx 63000.$$

Нет, увидеть эту сверхновую невооружённым глазом невозможно. Она примерно в 63 000 раз слабее предельной величины для глаза.

Критерии:

Максимальный балл – 5

Вычисление разности звёздных величин – 2 балла.

Вычисление ослабления яркости – 2 балла.

Вывод об условии видимости сверхновой невооружённым глазом – 1 балл.

4. Если бы эта сверхновая вспыхнула на расстоянии 10 пк от Земли, какой была бы её видимая звёздная величина? Сравните её с видимой звёздной величиной Солнца ($m_\odot = -26{,}7^m$) и сделайте вывод, была бы она ярче или слабее Солнца.

Если сверхновая находится на расстоянии d=10 пк, то по определению абсолютной звёздной величины её видимая величина равна абсолютной:

$$m_{10} = M = -19{,}0^m$$

$$m_\odot = -26{,}7^m.$$

$$m_{10} - m_\odot = -19{,}0 - (-26{,}7) = 7{,}7^m$$

$$\frac{E_\odot}{E_{\text{SN}}} = 10^{0{,}4 \cdot 7{,}7} \approx 10^{3{,}08} \approx 1200$$

Сверхновая слабее Солнца на 7.7^m.

Так, на расстоянии 10 пк видимая величина сверхновой была бы $-19{,}0^m$. Она оказалась бы примерно в 1200 раз слабее Солнца.

Критерии:

Максимальный балл – 5

Вычисление разности звёздных величин – 2 балла.

Вычисление отношения яркостей – 2 балла.

Основной вывод – 1 балл.