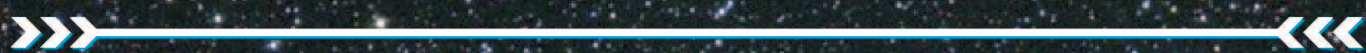


50 лет со дня первого полета человека в космос



Министерство образования и науки Российской Федерации
Академия повышения квалификации и
профессиональной переподготовки работников образования

1961



2011

**XVIII Всероссийская олимпиада
школьников по астрономии**

Условия и решения задач

Анапа, 2011 г.



1961 ════════ **2011**



ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ТУР



9 класс

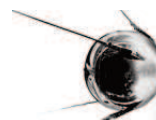


9

1

КАНУН ЭРЫ КОСМОНАВТИКИ

О.С. УГОЛЬНИКОВ



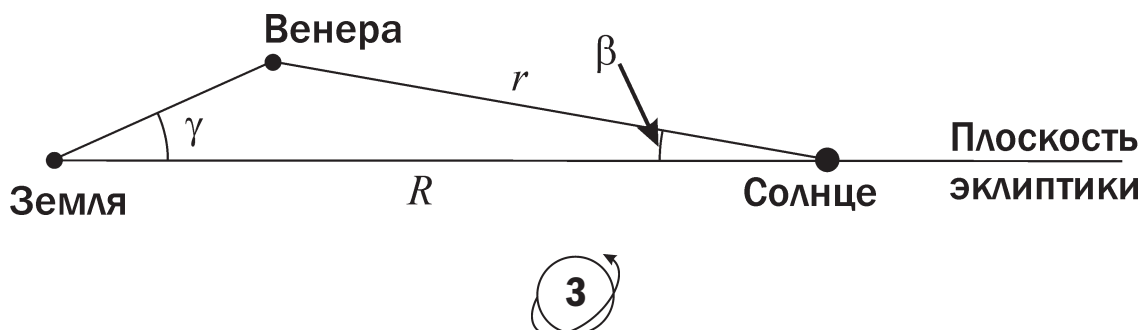
? В канун дня первого полета человека в космос, 11 апреля 1961 года в 03^ч30^м по Московскому времени планета Венера оказалась в нижнем соединении с Солнцем. В некоторой точке поверхности нашей планеты в этот момент Солнце было видно на горизонте, а Венера располагалась точно над Солнцем. На какой высоте над горизонтом ее можно было увидеть в этот момент? Найдите расстояние (по поверхности Земли) между этой точкой Земли и космодромом Байконур. Координаты космодрома: 45°58' с.ш., 63°18' в.д. Гелиоцентрическая эклиптическая широта Венеры была равна +2°48'. Орбиты Венеры и Земли считать круговыми. Рефракцией, угловыми размерами Солнца и уравниванием времени пренебречь. Летнее время на территории СССР в 1961 году не вводилось.

! В момент нижнего соединения Венеры гелиоцентрические долготы Венеры и Земли совпадают. Изобразим положение Солнца, Венеры и Земли в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты Земли (плоскости эклиптики).

Обозначим радиусы орбит Венеры и Земли через r и R соответственно, а гелиоцентрическую эклиптическую широту Венеры – через β . Этот угол невелик, поэтому мы можем достаточно просто вычислить угловое расстояние γ между Солнцем и Венерой при наблюдении с Земли:

$$\sin \gamma = \frac{r}{R-r} \sin \beta.$$

Угол γ получается равным 7.3° . При наблюдении из точки поверхности Земли, описанной в условии задачи, Солнце находилось на горизонте, а Венера – в точности над Солнцем. Следовательно, высота Венеры над горизонтом была равна 7.3° . Этого вполне достаточно, чтобы увидеть Венеру невооруженным глазом



даже в день ее нижнего соединения. Линия Солнце-Венера на небе перпендикулярна линии эклиптики и горизонту, а Солнце находится на эклиптике и одновременно на горизонте. Из этого можно сделать вывод, что эклиптика в этот момент в данной точке Земли совпадает с горизонтом.

В зените должен находиться один из полюсов эклиптики. Очевидно, что это северный полюс эклиптики, так как Венера располагается к северу от Солнца и видна над ним на небе. Склонение северного полюса эклиптики равно $+66.6^\circ$ и совпадает с широтой места наблюдения φ . Итак, описанная в условии картина наблюдалась на Северном полярном круге.

Прямое восхождение Северного полюса эклиптики составляет 18 часов, такое же значение принимает звездное время в пункте наблюдения S . В день весеннего равноденствия (21 марта) звездное время отличается от местного на 12 часов (небольшой поправкой на уравнивание времени мы пренебрегаем). Совпадение эклиптики с горизонтом на Северном полярном круге произошло в этот день 6 часов утра по местному времени и далее повторялось через каждые звездные сутки ($23^h56^m04^s$).

11 апреля отстоит от 21 марта на 21 день. Умножив продолжительность звездных суток на 21, мы получаем 20 дней 22 часа и 37 минут. Следовательно, для даты 11 апреля момент 18 часов по звездному времени S придется на 4 часа 37 минут утра по местному времени T , и в указанной точке Северного полярного круга Солнце будет восходить над горизонтом.

Так как летнее время в 1961 году не вводилось, Московское время отличалось от Всемирного на 3 часа, и Всемирное время UT составляло 0^h30^m . Вычитая Всемирное время из местного, мы получаем долготу места наблюдения:

$$\lambda = T - UT = 4^h07^m$$

или $61^\circ45'$ восточной долготы. Мы видим, что долготы данного пункта и Байконура отличаются всего на 1.5° , а широты – значительно больше. Поэтому мы можем считать, что оба пункта находятся на одном меридиане и определить расстояние между ними по разности широт:

$$L = 2\pi R_0 \cdot \frac{|\varphi - \varphi_0|}{360^\circ} = 2300 \text{ км.}$$

Здесь R_0 – радиус Земли, φ_0 – широта Байконура.

9

2

КОСМИЧЕСКИЙ ЛОКАТОР

О.С. Угольников



? Лазерный локатор на поверхности Земли посылает короткие импульсы в направлении космического аппарата, расположенного вблизи нашей планеты, ровно через 1 секунду друг после друга. Находящийся рядом с лазером приемник регистрирует отраженные сигналы, разделенные промежутком времени 1.00008 секунды. Является ли аппарат искусственным спутником Земли или это межпланетная станция? Атмосферными эффектами пренебречь.

❗ Интервалы между импульсами лазера и между моментами регистрации отраженного сигнала не равны друг другу. Это может иметь место в том случае, если космический аппарат имеет некоторую скорость относительно локатора. При этом поперечная скорость, не изменяющая расстояние между аппаратом и локатором, на время регистрации сигнала влиять не будет. Нас будет интересовать радиальная (лучевая) скорость аппарата. Обозначим ее как v и будем считать положительной, если аппарат удаляется от локатора, и отрицательной, если он приближается к локатору. Тогда в течение некоторого интервала времени будет справедливо выражение для расстояния между аппаратом и локатором:

$$S = S_0 + v \cdot t.$$

Здесь S_0 – некоторая постоянная величина. Пусть в момент времени t_1 лазер отправил импульс в сторону аппарата. Расстояние, на котором этот импульс будет регистрироваться в момент времени t , составит

$$S_1 = c(t - t_1).$$

Здесь c – скорость света. Обозначим через t' момент прихода импульса к аппарату. Приравняв величины S и S_1 , мы получаем уравнение для этой величины:

$$t' = \frac{S_0 + ct_1}{c - v}.$$

Расстояние между локатором и аппаратом в этот момент составит

$$S' = S_0 + v \cdot t' = \frac{S_0 c + v c t_1}{c - v}.$$

В этот же момент произойдет отражение сигнала, которому будет предстоять обратный путь длиной S' к приемнику. Отраженный сигнал будет принят в момент

$$\tau_1 = t' + \frac{S'}{c} = \frac{2S_0 + (c + v)t_1}{c - v}.$$

Пусть следующий сигнал посылается в момент t_2 , а его отражение принимается в момент τ_2 . Выпишем формулу для отношения интервалов регистрации и отправления сигналов:

$$K \equiv \frac{\tau_2 - \tau_1}{t_2 - t_1} = \frac{c + v}{c - v}.$$

По условию задачи, величина K составляет 1.00008. Из нее мы получаем значение лучевой скорости v :

$$v = c \frac{K - 1}{K + 1} \approx \frac{c}{2}(K - 1).$$

Лучевая скорость аппарата получается равной 12 км/с. Это больше величины второй космической скорости у поверхности Земли (11.2 км/с). Полная скорость аппарата будет не меньше лучевой, а при удалении от Земли вторая космическая скорость уменьшается. Учет движения локатора за счет осевого вращения Земли со скоростью не более 0.5 км/с не изменяет ситуации. Аппарат движется со скоростью более второй космической и при этом удаляется от Земли (значение скорости v положительно). Следовательно, он не останется в поле действия Земли и отправится в путешествие по межпланетному пространству.



? Спутник сферической формы движется по круговой орбите вокруг Марса в плоскости его экватора в том же направлении, в котором планета обращается вокруг своей оси. Космонавт, находящийся на поверхности планеты, обнаружил, что спутник в зените на одну звездную величину ярче, чем на горизонте. Условия освещения спутника Солнцем (угол «Солнце-спутник-наблюдатель») были при этом одинаковыми. С какой стороны горизонта – западной или восточной – восходит этот спутник при наблюдении с поверхности Марса? Поглощением света в атмосфере Марса пренебречь.

! При одинаковых условиях освещения Солнцем (одинаковом фазовом угле) разница в видимом блеске спутника возникает вследствие изменения его расстояния от наблюдателя. Когда аппарат находится над горизонтом, он дальше, чем при наблюдении в зените. По условию задачи, разница блеска равна 1^m , и отношение освещенностей, создаваемых спутником, K , равно 2.512:

$$\frac{E_z}{E_h} = \frac{H^2}{h^2} = K = 2.512,$$

где h – высота орбиты спутника, H – расстояние до спутника, когда он находится на горизонте. Эти величины легко выразить через радиус орбиты спутника r и радиус Марса R :

$$\begin{aligned} h &= r - R; \\ H^2 &= r^2 - R^2. \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{(r - R)(r + R)}{(r - R)^2} = \frac{r + R}{r - R} = K; \quad r = R \cdot \frac{K + 1}{K - 1} \approx 7890 \text{ км.}$$

Спутник обращается вокруг Марса в том же направлении, в котором Марс обращается вокруг своей оси. Чтобы ответить на вопрос задачи, нужно сравнить период обращения спутника с периодом осевого вращения Марса. Орбитальный период спутника определяется из III закона Кеплера:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}.$$

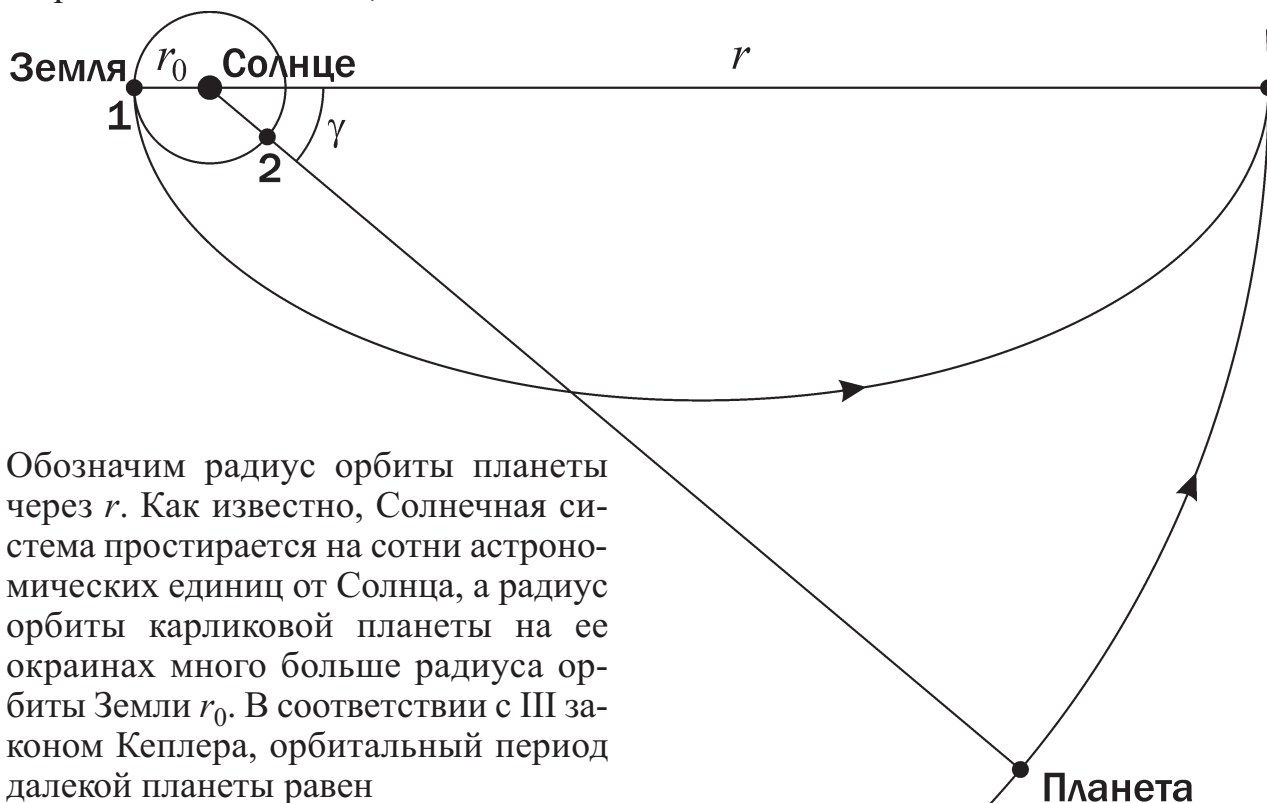
Здесь M – масса Марса. Период получается равным около 6 часов, что значительно меньше марсианских звездных суток (около 25 часов). В итоге, спутник, двигаясь по орбите с запада на восток, будет обгонять осевое вращение планеты и при наблюдении с поверхности восходить в западной части горизонта и заходить с восточной стороны.

К данному выводу можно прийти даже без вычисления орбитального периода. Достаточно вспомнить, что спутник Марса Фобос обращается вокруг планеты по орбите с большим радиусом (9380 км) и восходит над западным горизонтом. Можно также вычислить радиус стационарной орбиты для Марса, который примерно вдвое меньше аналогичной высоты для Земли, но существенно больше радиуса орбиты спутника, рассматриваемого в задаче.



? Дальняя межпланетная станция стартует с Земли 1 января, чтобы потом без последующих коррекций орбиты по энергетически выгодной траектории достигнуть далекой карликовой планеты, обращающейся вокруг Солнца на окраинах Солнечной системы. В какой день начавшегося года эта планета вступит в противостояние с Солнцем? Орбита планеты круговая, она лежит в плоскости эклиптики, планета обращается по ней в том же направлении, что и Земля по своей орбите. Орбиту Земли также считать круговой.

! В случае круговых орбит Земли и планеты энергетически выгодная траектория перелета без коррекций представляет собой половину эллипса, касающегося орбиты Земли в перигелии и орбиты планеты – в афелии. Этот эллипс, как и орбиты обеих планет, также лежит в плоскости эклиптики.



Обозначим радиус орбиты планеты через r . Как известно, Солнечная система простирается на сотни астрономических единиц от Солнца, а радиус орбиты карликовой планеты на ее окраинах много больше радиуса орбиты Земли r_0 . В соответствии с III законом Кеплера, орбитальный период далекой планеты равен

$$T = T_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{3/2},$$

где T_0 – орбитальный период Земли. Большая полуось орбиты межпланетной станции составит

$$a = \frac{r + r_0}{2} \approx \frac{r}{2}.$$

Время перелета станции от Земли к планете t есть половина орбитального периода этой станции:

$$t = \frac{1}{2} T_0 \cdot \left(\frac{r}{2r_0} \right)^{3/2} = T \cdot \frac{1}{4\sqrt{2}}.$$

За это время сама планета сместится по своей орбите на угол

$$\gamma = 360^\circ \cdot \frac{t}{T} = 63.6^\circ.$$

Это перемещение будет происходить в ту же сторону, что и движение Земли по орбите (на рисунке – против часовой стрелки). В момент запуска Земля находилась в положении 1 на рисунке, с другой стороны от Солнца относительно точки, где станция прибудет на далекую планету. Ближайшее противостояние планеты наступит, когда Земля окажется в положении 2. Это произойдет менее чем через полгода, и смещением планеты по орбите за это время можно пренебречь, так как оно будет значительно меньше 1° (перемещение Земли за 1 день). Чтобы перейти из положения 1 в положение 2, Земле нужно пройти по орбите дугу в $180^\circ - \gamma$, то есть в 116.4° . Время, которое на это потребуется, составляет

$$\tau = T_0 \frac{180^\circ - \gamma}{360^\circ}.$$

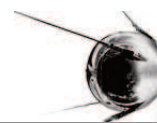
Этот интервал равен 118 дням. Старт межпланетной станции произошел 1 января, а ближайшее противостояние далекой планеты наступит 28 или 29 апреля, в зависимости от того, является ли данный год високосным или нет.



5

ЛУНОХОД – СПАСАТЕЛЬ

Н.Ю. Подорванюк, О.С. Угольников



? Космический аппарат потерпел аварию при посадке на Луну. Известно, что он прилунился на самом краю кратера у центра видимого полушария Луны. Этот кратер с трудом различим с Земли в телескоп при увеличении 30 крат. Какое время могло бы потребоваться советскому луноходу “Луноход-1”, чтобы обследовать границы кратера и найти пострадавший аппарат? “Луноход-1” работал на солнечных батареях, двигался только при освещении Солнцем и преодолевал не более 2 км за один лунный световой день.

! Кратер располагается около центра видимого полушария Луны и обращен «плашмя» по отношению к земным наблюдателям. В этом случае его диаметр составляет

$$D = L \cdot d,$$

где d – угловой диаметр кратера при наблюдении с Земли (в радианах), а L – расстояние от Земли до Луны. Будем считать, что кратер можно было бы разглядеть невооруженным глазом, если его угловой диаметр был бы не меньше $2'$ или 0.0006 радиан (обозначим эту величину как d_0). Если увеличение телескопа M не слишком велико, то в него можно рассмотреть кратеры с угловым диаметром d_0/M . В итоге, мы получаем выражение для диаметра кратера:

$$D = \frac{L d_0}{M}.$$

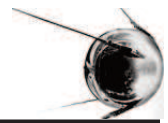
Эта величина составляет 7.5 км. Окружность кратера S равна πD или 24 км. В зависимости от взаимного расположения пострадавшего аппарата и лунохода в начале поиска, луноходу придется пройти расстояние от нуля до всей длины окружности S . Чтобы обойти ее, «Луноход-1» потребовалось бы 12 лунных дней. При этом ему пришлось бы находиться в покое как минимум 11 лунных ночей. Весь поиск занял бы 11.5 лунных синодических месяцев (по 29.53 дня), то есть 340 дней – почти целый год. Это максимальная продолжительность поиска, она могла бы быть и меньше (в пределе – равной нулю). Интересно, что примерно столько (на один лунный день меньше) «Луноход-1» в действительности проработал на поверхности Луны.



6

КОСМИЧЕСКАЯ ЛЕТОПИСЬ

Е.Н. Фадеев



? Найдите все фактические ошибки в приведенном тексте. Объясните, в чем заключается каждая ошибка, и, по возможности, исправьте ее.

Пятьдесят лет назад произошел первый в истории пилотируемый космический полет. На рассвете 12 апреля 1961 г., в 9:07 московского времени, советский космический корабль «Восток-1» стартовал с космодрома «Байконур», унося в космос первого космонавта – Ю.А. Гагарина. Совершив три витка вокруг Земли, корабль благополучно приземлился через 1 час 48 минут после старта.

Полеты в космос принесли человечеству множество новых знаний об окружающем мире. Стали доступными наблюдения во всех диапазонах электромагнитных волн, тогда как с поверхности Земли можно работать только в оптической области спектра. Космические телескопы позволяют сфотографировать звезды в триллион раз более слабые, чем можно увидеть невооруженным глазом. Более того, стало возможным не только пассивное, наблюдательное исследование небесных тел, но и полет к некоторым из них. Большой вклад в исследование Солнечной системы, особенно Луны и Венеры, внесли советские ученые. Именно советские станции впервые совершили мягкие посадки на поверхность трех ближайших к нам больших тел – Луны, Венеры и Марса.

Первой целью для космических аппаратов стала Луна. Множество зондов исследовало её с орбиты. Благодаря аппаратам серии «Лунар орбитер» мы впервые смогли увидеть обратную сторону нашего спутника. На поверхности Луны побывали астронавты и луноходы, а лунный грунт исследовался в земных лабораториях. Удалось подтвердить гипотезу о том, что большая часть лунной поверхности покрыта метровым слоем пыли.

Космические аппараты посетили окрестности всех больших планет. Спускаемые аппараты определили состав атмосферы Венеры и обнаружили экстремальные условия на ее поверхности. Детальные исследования атмосферы производились с помощью аэростатных зондов. С помощью радарных наблюдений была построена подробная карта поверхности планеты. По отклонениям от предсказанной траектории движения спутников была уточнена её масса, из-

вестная до этого со значительно меньшей точностью, чем у большинства других планет.

Не менее успешными были исследования Марса. Спутниками «красной планеты» была составлена точная карта рельефа, открыты марсианские «пирамиды» и «сфинкс», которые при дальнейших исследованиях оказались лишь игрой света и тени. На Марсе обнаружен самый большой в Солнечной системе действующий вулкан высотой более 21 км. С помощью посадочных аппаратов и марсоходов получено множество данных по геологии и климату планеты. Были добыты свидетельства существования в прошлом на Марсе жидкой воды, а водяной лед найден не только в полярных шапках, но и в подповерхностном слое грунта.

В результате первых пролетных миссий к планетам-гигантам у всех этих планет были обнаружены радиационные пояса. В атмосфере Юпитера и Сатурна были зафиксированы вспышки молний. Выяснилось, что все планеты-гиганты обладают кольцами. Число известных спутников планет многократно возросло. Обогатились наши знания о галилеевых спутниках Юпитера: на Ио был открыт активный вулканизм; оказалось, что поверхность Европы представляет собой холодный океан, а плотная атмосфера Титана, по всей видимости, скрывает озера жидких углеводородов.

Отправлен космический аппарат для исследования самой дальней большой планеты – Плутона. Несколько аппаратов продолжают передавать данные из столь отдаленных областей Солнечной системы, где даже контуры созвездий сильно отличны от земных.

Космические аппараты приблизились и к малым телам Солнечной системы. Ряд астероидов удалось сфотографировать, а на некоторые даже осуществлена посадка и забор грунта. Кометы тоже не остались без внимания. Для их исследования пришлось разработать специальные материалы для космических кораблей, способные выдерживать громадную температуру частиц в ярких кометных хвостах.

Не за горами новые эксперименты. Исследование космического пространства продолжается!



Ниже приводится список всех ошибок и неточностей в тексте.

1. “На рассвете 12 апреля 1961 г., в 9:07 московского времени...”

Байконур находится восточнее и южнее Москвы. Значит, местное время там на несколько часов опережает московское, т.е. события происходили около полудня. В это время года Солнце находится севернее небесного экватора и в полдень кульминирует на большой высоте на юге. Момент запуска корабля не мог приходиться на рассвет.

2. “... совершив три витка вокруг Земли.”

За указанное время полета «Восток-1» не мог совершить три витка, в чем можно убедиться, рассчитав минимальный период обращения спутника (по орбите с нулевой высотой).

3. *“...тогда как с поверхности Земли можно работать только в оптической области спектра...”*

С поверхности Земли успешно наблюдают в радиодиапазоне и отдельных полосах инфракрасного диапазона.

4. *“Космические телескопы позволяют сфотографировать звезды в триллион раз более слабые, чем можно увидеть невооруженным глазом.”*

Уменьшение яркости объекта в триллион раз соответствует его ослаблению на 30 звездных величин. Если с поверхности Земли глазом можно рассмотреть объекты, чей блеск не меньше 6-7^m, то космический телескоп должен регистрировать объекты примерно до 36-37^m. Такая проникающая способность на данном этапе развития техники не достигнута.

5. *“Благодаря аппаратам серии «Лунар орбитер» мы впервые смогли увидеть обратную сторону нашего спутника.”*

Первые фотографии обратной стороны Луны были получены советской станцией «Луна-3».

6. *“Удалось подтвердить гипотезу о том, что большая часть лунной поверхности покрыта метровым слоем пыли.”*

Дискуссия о лунной пыли развернулась в конце 50-х годов, но уже после первых полетов к Луне ученые пришли к мнению, что слой пыли должен быть весьма небольшим. Успешные прилунения космических аппаратов окончательно опровергли гипотезу пылевого слоя.

7. *“На Марсе обнаружен самый большой в Солнечной системе действующий вулкан...”*

В современную эпоху на Марсе отсутствует вулканизм, можно наблюдать лишь потухшие вулканы.

8. *“...оказалось, что поверхность Европы представляет собой холодный океан.”*

Жидкая вода не может существовать на поверхности Европы, так как Европа находится далеко от Солнца, и её поверхность очень холодная. Даже на Марсе, который почти в три раза ближе к Солнцу, температура редко поднимается выше 0°C, а на полюсах вымерзает даже углекислый газ CO₂.

9. *“Галилеевых спутниках Юпитера: ...Титана.”*

Титан – спутник Сатурна, а не Юпитера.

10. *“...большой планеты – Плутона.”*

Согласно решению МАС от 2006 года, Плутон – карликовая планета.

11. *“...контуры созвездий сильно отличаются от земных.”*

Расстояния в Солнечной системе слишком малы по сравнению с межзвездными. Контуры созвездий при наблюдении из окрестностей Плутона такие же, как и на Земле.

12. *“...выдерживать громадную температуру частиц в ярких кометных хвостах.”*

Плотность и температура частиц в кометных хвостах не столь велики, чтобы заметно изменить температуру корабля.

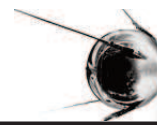


10

1

КАНУН ЭРЫ КОСМОНАВТИКИ

О.С. Угольников



? В канун дня первого полета человека в космос, 11 апреля 1961 года в 03^ч30^м по Московскому времени планета Венера оказалась в нижнем соединении с Солнцем. В некоторой точке поверхности нашей планеты в этот момент Солнце было видно на горизонте, а Венера располагалась точно над Солнцем. На какой высоте над горизонтом ее можно было увидеть в этот момент? Найдите расстояние (по поверхности Земли) между этой точкой Земли и космодромом Байконур. Координаты космодрома: 45°58' с.ш., 63°18' в.д. Гелиоцентрическая эклиптическая широта Венеры была равна +2°48'. Орбиты Венеры и Земли считать круговыми. Рефракцией, угловыми размерами Солнца и уравнением времени пренебречь. Летнее время на территории СССР в 1961 году не вводилось.



Решение – см. задание 1 для 9 класса, стр. 3.

10

2

НЕБЕСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА БОРТУ

О.С. Угольников



? Космонавты совершают полет вокруг Земли по круговой орбите. Какое максимальное число раз подряд (за 1 сутки) они смогут зафиксировать: а) полнолуние, б) весеннее равноденствие, в) противостояние Марса? Все явления фиксируются в системе отсчета, связанной со станцией. Орбиты Земли, Луны и Марса – круговые.



Чтобы дать ответ на поставленные вопросы, нужно вспомнить определения каждого из трех астрономических явлений. Первое из них – полнолуние – фиксируется в тот момент, когда Луна оказывается в противостоянии с Солнцем, причем (если быть совсем точным) в эклиптической системе координат. Иными словами, видимые эклиптические долготы Солнца и Луны должны отличаться на 180°. Нам необходимо выяснить, может ли подобная картина наблюдаться в день полнолуния на орбитальной станции несколько раз.

Мысленно перенесемся на поверхность Луны в центр ее видимого диска. При наблюдении оттуда Солнце будет двигаться относительно звезд практически точно вдоль эклиптики, а Земля – в ту же сторону под малым углом к эклиптике. Периоды этих движений (T_E и T_L соответственно) составляют 365.25 и 27.32 суток. Угловая скорость движения Земли относительно Солнца будет равна

$$\omega_L = \frac{2\pi}{T_L} - \frac{2\pi}{T_E}.$$

Переводя во внесистемные единицы, мы получаем значение этой угловой скорости: 0.508° в час. Полный оборот в 360° относительно Солнца Земля завершит за один синодический лунный месяц: 29.53 суток.

В момент полнолуния при наблюдении из данной точки Луны Солнце и наблюдатель (орбитальная станция) должны оказаться в соединении, то есть иметь одинаковую эклиптическую долготу. Нас интересует максимальное число подобных событий в течение дня. Оно может быть достигнуто, если станция будет периодически опережать и отставать от Земли по эклиптике на наибольшую возможную величину – видимый радиус своей орбиты. Это условие выполняется, если, к примеру, плоскость орбиты станции будет перпендикулярна линии Земля–Луна и совпадет с картинной плоскостью при наблюдении с Луны (см. рисунок далее).

Пусть радиус орбиты станции составляет R , а период ее обращения – T . Тогда угловой диаметр орбиты станции при наблюдении с Луны (в радианах) составит

$$d = \frac{2R}{L},$$

где L – расстояние от Земли до Луны. Определим интервал времени, в течение которого вся орбита будет пересекать линию соединения с Солнцем (вертикальную линию на рисунке):

$$T_0 = \frac{d}{\omega_L} = \frac{2R}{L\omega_L}.$$

Число оборотов, которое станция сможет совершить за это время, составит

$$N = \frac{T_0}{T} = \frac{2R}{L\omega_L T}.$$

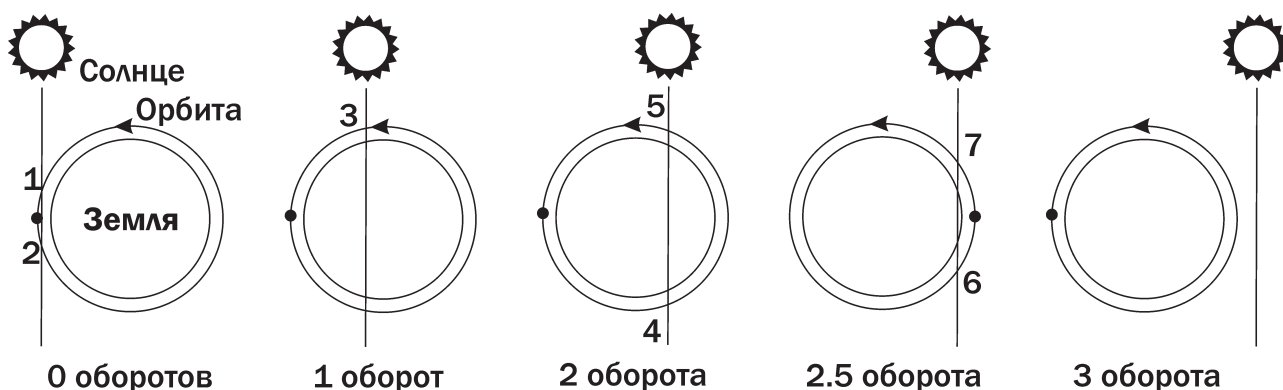
Радиус орбиты и период обращения станции связаны III законом Кеплера:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}.$$

Здесь M – масса Земли. Отсюда:

$$N = \frac{1}{\pi L\omega_L} \sqrt{\frac{GM}{R}} = \frac{v}{\pi L\omega_L}.$$

Здесь v – круговая орбитальная скорость станции. Из получившегося соотношения мы можем сделать вывод, что чем выше круговая скорость станции, тем больше полнолуний удастся зафиксировать космонавтам. Если принять минимальный радиус орбиты равным 6600 км (высота 230 км), то скорость будет равна 7.8 км/с. Число оборотов N оказывается равным около 2.6, т.е. чуть больше двух с половиной. Из этого сразу можно сделать вывод, что полнолуние может наблюдаться несколько раз. Чтобы определить их максимальное количество, обратимся к рисунку.

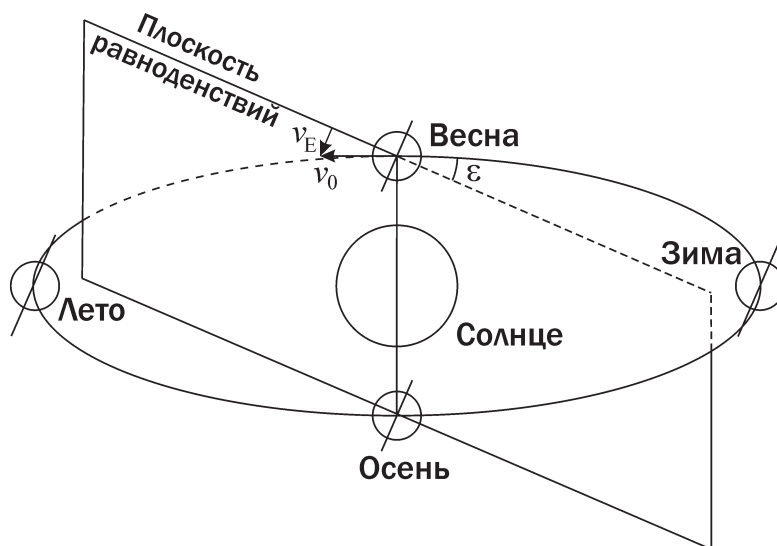


Пусть в некоторый момент передняя точка орбиты станции при наблюдении с Луны вступила в соединение с Солнцем, а через короткое время после этого в этой точке оказалась сама станция. Тогда, как видно на первом рисунке, на станции будут зарегистрированы сразу два полнолуния, разделенные небольшим интервалом времени. В течение одного оборота станции после этого она вновь пересечет круг эклиптической широты Солнца (полнолуние 3) и окажется левее Солнца на небе Луны. Следующий (второй) оборот будет содержать еще два полнолуния – 4 и 5. Сделав далее половину оборота, станция зафиксирует 6-е полнолуние и окажется справа от Солнца на небе Луны. В этот же момент круг эклиптической широты (вертикальная линия на рисунке) уже близко подойдет к правому краю орбиты. После 7-го пересечения с этой линией станция окажется левее Солнца и больше уже не пересечет линию. Итак, за одни сутки (а точнее, за интервал времени около 4 часов) на орбитальной станции могут быть зафиксированы сразу 7 полнолуний.

Весеннее равноденствие в системе отсчета, связанной со станцией, будет зафиксировано, когда положение центра Солнца окажется в точности на небесном экваторе, причем Солнце должно будет перейти из южного небесного полушария в северное. Другими словами, станция должна находиться в «плоскости равноденствий» – плоскости, параллельной плоскости земного экватора и проходящей через Солнце. Двигаясь по орбите со скоростью v_0 , равной 29.8 км/с, Земля пересекает эту плоскость в дни равноденствий под углом ε , равным 23.4° . Составляющая скорости Земли, перпендикулярная плоскости равноденствий, будет равна

$$v_E = v_0 \sin \varepsilon = 11.8 \text{ км/с.}$$

Эта величина больше первой (и даже второй) космической скорости вблизи поверхности Земли. Следовательно, орбитальное движение станции, вне зависимости от величины и направления скорости, не может компенсировать движение Зем-



ли относительно плоскости равноденствий. И на борту станции, как и во всех точках Земли, весеннее равноденствие будет зафиксировано ровно один раз.

Наконец, противостояние Марса фиксируется, когда наблюдатель оказывается на отрезке, соединяющем Солнце и Марс (точнее, проекцию Марса на плоскость эклиптики). Чтобы определить число возможных противостояний, вычислим скорость Земли относительно данной линии в день противостояния.

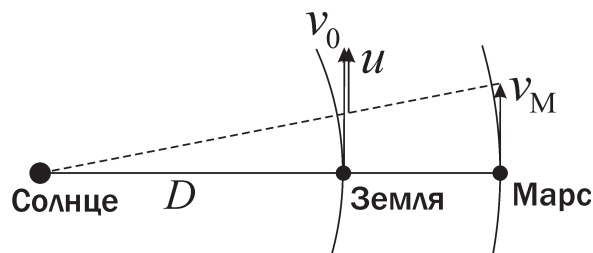
Линия «Солнце-Марс» вращается вокруг Солнца вместе с самим Марсом с угловой скоростью

$$\omega_M = \frac{2\pi}{T_M}.$$

Здесь T_M – орбитальный период Марса. Скорость Земли относительно этой линии составит

$$u = v_0 - \omega_M D = D \cdot (\omega_E - \omega_M) = 2\pi D \cdot \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_M} \right) = \frac{2\pi D}{S_M}.$$

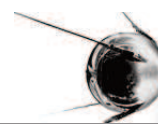
Здесь D – расстояние от Земли до Солнца, ω_E – угловая скорость орбитального движения Земли, S_M – синодический период Марса (780 суток). Скорость получается равной около 14 км/с. Как и в случае равноденствия, движение орбитальной станции вокруг Земли не может компенсировать такую скорость. Противостояние Марса на борту станции будет зафиксировано только одно.



3

ЗЕМЛЯ ИЗДАЛЕКА

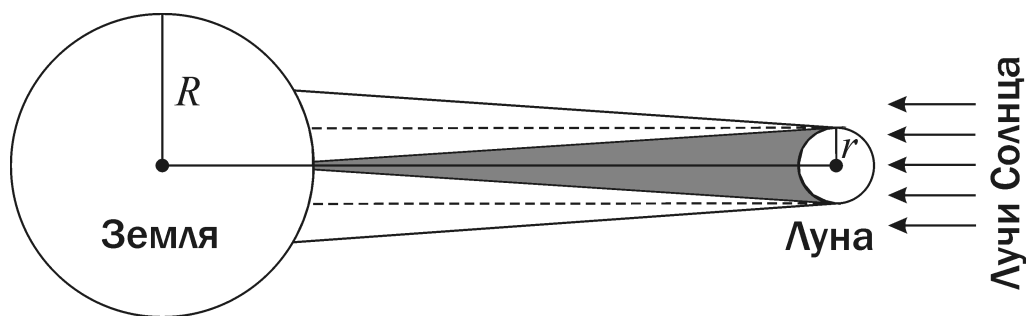
О.С. Угольников



? На новой обсерватории, построенной астронавтами на поверхности Марса, проводятся наблюдения Земли. В это время на нашей планете происходит полное солнечное затмение. Какого максимального значения может достичь величина падения блеска Земли, вызванного вступлением на нее лунной тени и полутени? Может ли астронавт заметить ослабление Земли невооруженным глазом, если да, то при каких условиях?

! Во время полного солнечного затмения на Землю падает лунная тень, окруженная лунной полутенью. В область тени солнечные лучи вообще не попадают, но ее размеры очень малы. Основной вклад в ослабление блеска Земли при наблюдении извне будет вносить лунная полутень, внутри которой наблюдается частное солнечное затмение. Освещенность внутри полутени уменьшается не столь сильно, но размеры самой полутени достаточно велики.

Рассмотрим наиболее простой случай – Земля наблюдается со стороны Солнца и видна как полный диск. На него падает лунная тень (в центре) и полу-



тень. Ослабление видимой яркости поверхности Земли внутри полутени неоднородно, оно тем сильнее, чем ближе данная точка поверхности к лунной тени. Расчет величины ослабления в разных областях полутени – достаточно сложная задача. Однако нам нужно лишь оценить максимальную величину общего падения яркости всего диска Земли. Для этого заметим, что количество солнечной энергии, падающей на Землю вне затмения в единицу времени, составляет

$$E_0 = J \cdot \pi R^2,$$

где J – поток энергии от Солнца на расстоянии Земли, а R – радиус Земли. Из этой энергии Луна задерживает величину

$$\Delta E = J \cdot \pi r^2,$$

где r – радиус Луны. В итоге, количество энергии, попадающее на Землю, составляет

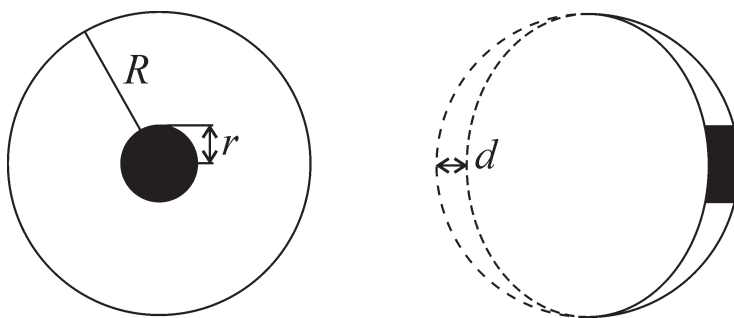
$$E = E_0 - \Delta E = J \cdot \pi (R^2 - r^2).$$

В конусе полутени эта энергия перераспределяется между различными областями поверхности Земли, но ее суммарное значение не меняется. Поэтому для оценки падения блеска мы можем заменить реальную картину более простой моделью без полутени, но с большой тенью, имеющей радиус, равный радиусу Луны r (фактически это бесконечно удаленного Солнца или малого расстояния между Луной и Землей).

Если мы наблюдаем Землю со стороны Солнца, а тень Луны попадает на Землю в область центра, то падение блеска Земли в звездных величинах составит

$$\Delta m_1 = -2.5 \lg \frac{E}{E_0} = -2.5 \lg \frac{R^2 - r^2}{R^2} = 0.08.$$

Такое изменение яркости заметить невооруженным глазом не удастся. Однако данная величина не является максимально возможной. Вспомним, что наблюдения проводятся на Марсе, и для прибывших туда астронавтов Земля является внутренней планетой. При определенном положении относительно Солнца и Марса Земля может выглядеть в виде серпа. Обозначим его толщину (в масштабах Земли) через d (правый рисунок).



Терминатор Земли представляет собой половину эллипса, имеющего большую полуось R и малую полуось $(R - d)$. Площадь этого эллипса равна

$$S_E = \pi \cdot R \cdot (R - d).$$

Если обозначить площадь всего диска через S , то площадь освещенного серпа составит

$$S_F = \frac{S - S_E}{2} = \frac{\pi R d}{2} = \pi R^2 \frac{d}{2R} = \pi R^2 F.$$

Здесь F – фаза серпа. Попутно мы доказали, что для серпа, освещенного Солнцем под определенным углом, понятия линейной и площадной фазы идентичны (но это не так для понятия фазы затмения).

Пусть серп Земли достаточно тонок, и его толщина d меньше радиуса Луны r . Воспользовавшись той же моделью тени Луны радиусом r без полутени (с некоторой точностью ее можно использовать для оценки и в этом случае), мы можем представить тень Луны в виде прямоугольника со сторонами d и $2r$. Его площадь равна

$$S_D = 2 \cdot r \cdot d.$$

Падение блеска Земли в звездных величинах составит

$$\Delta m_2 = -2.5 \lg \frac{S_F - S_D}{S_F} = -2.5 \lg \frac{\frac{\pi R d}{2} - 2rd}{\frac{\pi R d}{2}} = -2.5 \lg \frac{\pi R - 4r}{\pi R} \approx 0.5.$$

Это уже достаточно большая величина, и подобное изменение блеска можно заметить невооруженным глазом. При этом нужно принять во внимание, что видимая звездная величина Земли уменьшится не мгновенно, а в течение часа (время вступления полутени на Землю). Чтобы заметить постепенное ослабление Земли при визуальных наблюдениях, рядом с ней должен находиться другой источник с постоянным блеском, близким к блеску Земли. Это может быть искусственный источник, а может быть и небесный объект. Вспомним, что на небе Марса есть еще одна планета, очень близкая по видимой яркости к Земле (около -3^m) – Венера. Она будет находиться на небе не очень далеко от Солнца и вполне может вступить в соединение с Землей, когда последняя будет иметь фазу тонкого серпа.

10

4

К САТУРНУ МИМО ПАТРОКЛА

О.С. Угольников



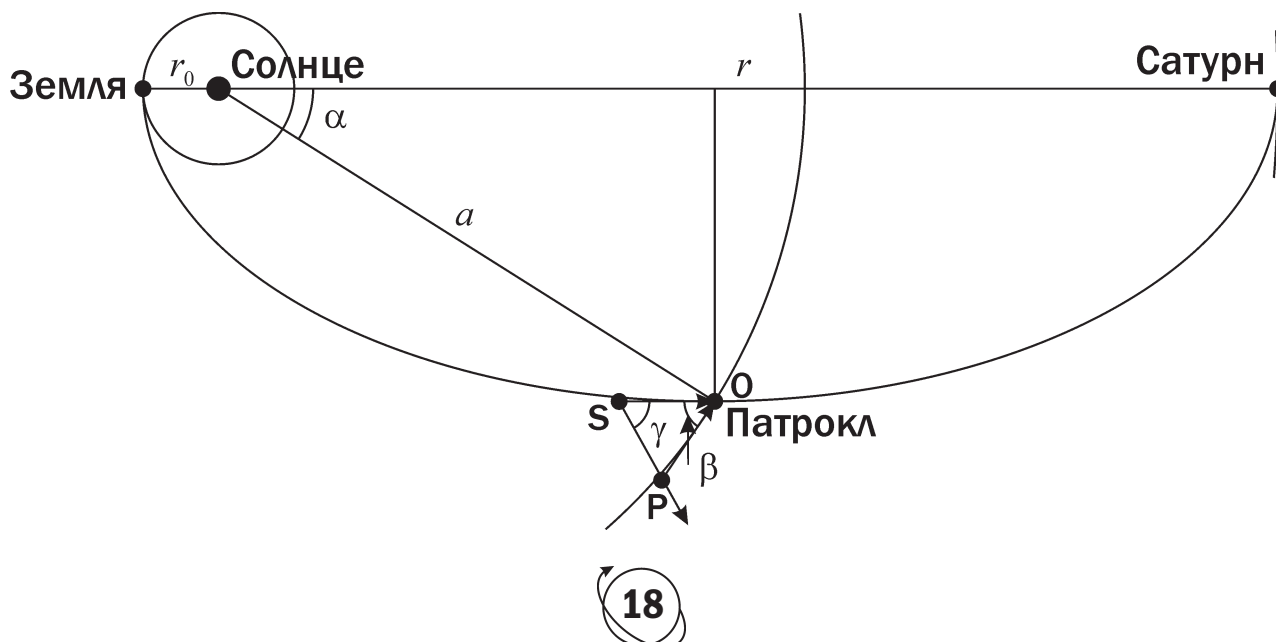
? Межпланетный аппарат отправляется 1 декабря с Земли к Сатурну по энергетически выгодной траектории. Расписание миссии включает в себя близкий пролет мимо астероида Патрокл из группы «Троянцев», движущихся по орбите Юпитера в ту же сторону, что и планета. Изучение астероида началось за несколько месяцев до пролета. В каком созвездии (при наблюдении с аппарата) в это время находился Патрокл? Орбиты Патрокла и всех больших планет считать круговыми, массу Патрокла – малой.

! Аппарат летит от Земли к Сатурну по энергетически выгодной траектории – половине эллипса, перигелий которого совпадает с точкой старта (Земля), а афелий располагается на орбите Сатурна. Направление движения аппарата совпадает с направлением движения планет (против часовой стрелки, если смотреть с северной стороны). Обозначим радиусы орбит Земли и Сатурна через r_0 и r . Большая полуось данного эллипса составит

$$a = \frac{r + r_0}{2}$$

или 5.27 а.е. Это очень близко к значению радиуса орбиты Юпитера и Патрокла. Данное совпадение существенно облегчает решение задания. Изобразим траекторию движения аппарата на рисунке. Как известно, для любой точки эллипса сумма расстояний до двух фокусов одинакова и равна $2a$. Когда аппарат находится на малой оси эллипса (точка **О**), расстояние до каждого из фокусов равно большой полуоси эллипса a . В одном из фокусов находится Солнце. Следовательно, расстояние от точки **О** до Солнца равно a , и как раз вблизи этой точки состоится сближение аппарата с астероидом. Из рисунка по теореме Пифагора мы можем определить величину угла α :

$$\alpha = \arccos \frac{a - r_0}{a} = 36^\circ.$$



Как известно, скорость аппарата на произвольном расстоянии d от Солнца можно определить из закона сохранения энергии:

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{d} - \frac{1}{a} \right)}.$$

Для точки **O** мы получаем:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{a}}.$$

Итак, гелиоцентрическая скорость аппарата по модулю совпадает с круговой скоростью на том же расстоянии, то есть, со скоростью Патрокла. Пусть за некоторое небольшое время до сближения аппарат находился в точке **S**, а Патрокл – в точке **P**. Из равенства скоростей мы имеем равенство отрезков **SO** и **PO**, треугольник **SOP** является равнобедренным. При этом отрезок **SO** параллелен большой оси эллипса, а отрезок **PO** – перпендикулярен направлению от Солнца к точке **O**. Отсюда мы можем получить значение угла в вершине равнобедренного треугольника

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 54^\circ.$$

Углы при основании этого треугольника равны

$$\gamma = 90^\circ - (\beta/2) = 45^\circ + (\alpha/2) = 63^\circ.$$

Направление, в котором виден Патрокл с аппарата (точка **P** из точки **S**) образует угол γ с направлением, в котором было видно Солнце с Земли в день старта, причем данный угол отсчитывается к западу. Дугу в 63° Земля проходит по своей орбите за 62 дня. Патрокл будет виден с аппарата в созвездии, в котором Солнце было видно с Земли за 62 дня до запуска, то есть 30 сентября. Это созвездие Девы.



5

ПОСАДКА НА ВЕНЕРУ И ТИТАН

Е.Н. Фадеев



? Определите, во сколько раз изменится вес космического аппарата на экваторе Венеры и на экваторе Титана по сравнению с его весом на экваторе Земли. Космический аппарат имеет форму шара диаметром 1 метр и массой 100 кг.

! Вес – это сила, с которой тело давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес. На любое тело, находящееся на поверхности планеты (или спутника планеты), действует сила притяжения, направленная к центру этой планеты. Если планета вращается, то тело будет двигаться вместе с поверхностью планеты с центростремительным ускорением. Эффект будет аналогичен действию центробежной силы, направленной от оси вращения планеты (на экваторе – от центра планеты). Наконец, если у планеты или спутника есть атмос-

фера (Венера, Земля и Титан ей обладают), на тело будет действовать архимедова сила, также направленная против силы тяжести и стремящаяся поднять его вверх. На экваторе все эти силы будут направлены вдоль линии «центр планеты – тело», но направление их будет различаться: архимедова и центробежная силы будут действовать противоположно силе гравитации.

В соответствии с законом всемирного тяготения величина силы притяжения на поверхности планеты (спутника) выражается формулой:

$$F_g = \frac{GMm}{r^2} = mg.$$

Здесь M и r – масса и радиус планеты, m – масса тела, g – ускорение свободного падения. Центробежная сила равна

$$F_c = m\omega^2 r = \frac{4\pi^2 m r}{T^2},$$

где ω – угловая скорость вращения планеты вокруг оси, T – ее осевой период. Наконец, для силы Архимеда справедливо соотношение:

$$F_a = \rho gV.$$

Здесь ρ – плотность атмосферы планеты, V – объем тела. Плотность атмосферы может быть вычислена из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT,$$

где μ – молярная масса атмосферного газа, p – давление, T – температура, R – универсальная газовая постоянная. В итоге,

$$F_a = \frac{p\mu gV}{RT}.$$

Молярную массу атмосферного газа можно вычислить по его химическому составу. Для Земли она составляет 0.029 кг/моль. Атмосферы Венеры и Титана состоят из одного основного газа с незначительными примесями. В качестве величин молярной массы для атмосферы Венеры мы можем взять молярную массу углекислого газа (0.044 кг/моль), а для атмосферы Титана – молярную массу молекулярного азота (0.028 кг/моль).

Вес тела на поверхности планеты или спутника будет равен

$$F = F_g - F_a - F_c.$$

Вычислим все эти силы для трех небесных тел и занесем результаты в таблицу:

	$g, \text{ м/с}^2$	$F_g, \text{ Н}$	$F_c, \text{ Н}$	$F_a, \text{ Н}$	$F, \text{ Н}$
Земля	9.8	980	3.4	6.1	970
Венера	8.8	880	$5.4 \cdot 10^{-5}$	310	570
Титан	1.3	130	$5.4 \cdot 10^{-3}$	3.6	130

Мы видим, что на Земле и Титане вес данного космического аппарата определяется гравитационной силой. На Венере с ее плотной атмосферой вес существенно ослаблен архимедовой силой. Центробежная сила на всех трех телах мала и не сказывается на весе. Рассчитаем, во сколько раз вес аппарата на Земле (индекс «Е») будет больше, чем на Венере (индекс «V») и Титане (индекс «Т»):

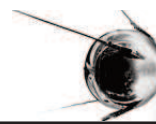
$$P_V = \frac{F_E}{F_V} = 1.7; \quad P_T = \frac{F_E}{F_T} = 7.5.$$



6

ТРАНСЗВЕЗДНЫЙ ПЕРЕЛЕТ

О.С. Угольников



? Космический аппарат «Розетта», оснащенный солнечными батареями размером более 30 метров, в настоящее время находится на пути к комете Чурюмова-Герасименко, с которой встретится в 2014 году. Незадолго до этой встречи «Розетта» окажется на расстоянии 5.4 а.е. от Солнца, что станет рекордной величиной для аппарата, работающего на солнечных батареях. Мог бы этот аппарат в рабочем режиме совершить перелет между окрестностями компонент двойной звезды Сириус А и Сириус В? Видимый блеск этих звезд составляет -1.6^m и 8.5^m соответственно, а угловое расстояние между ними – $10''$. Считать, что обе звезды находятся в точности на одинаковом расстоянии от Солнца.

! Поток световой энергии, идущей от Солнца на расстоянии 5.4 а.е. и поглощаемый солнечными батареями «Розетты», достаточен для ее нормального функционирования. Определим звездную величину Солнца на данном расстоянии:

$$m_1 = m_0 + 5 \lg 5.4 = -23.1.$$

Здесь m_0 – звездная величина Солнца при наблюдении с Земли.

Если принять, что звезды Сириус А и Сириус В располагаются на одинаковом расстоянии от Земли, то линия, соединяющая эти звезды, будет перпендикулярна линии визирования. Тогда расстояние между звездами в пространстве l и расстояние между Землей и Сириусом D будут связаны соотношением

$$l = D \alpha,$$

где α – угловое расстояние между компонентами двойной системы в радианах (около $5 \cdot 10^{-5}$). Блеск Сириуса А при наблюдении из окрестностей Сириуса В составит

$$m_2 = m_S + 5 \lg (l/D) = m_S + 5 \lg \alpha = -23.1 = m_1.$$

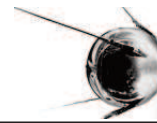
Здесь m_S – блеск Сириуса А на Земле. Мы видим, что даже в конце полета поток энергии от Сириуса А будет не меньше, чем поток от Солнца на расстоянии 5.4 а.е. Следовательно, аппарат «Розетта» мог бы совершить перелет между двумя компонентами Сириуса в рабочем режиме.



1

ЭХО КОСМИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

О.С. Угольников



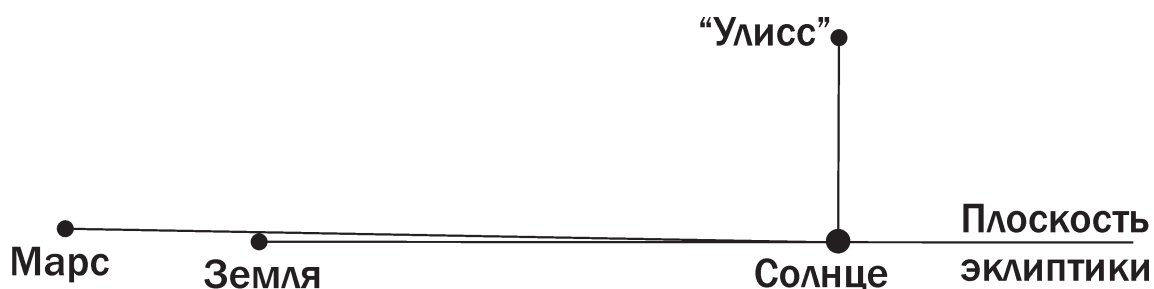
? Мощный короткий гамма-импульс от далекой сверхновой звезды был одновременно зафиксирован 12 апреля на искусственных спутниках Земли и Марса, а также на космической станции «Улисс», расположенной в этот момент над северным полюсом Солнца. В каком созвездии находилась сверхновая звезда, если Марс в этот день был в противостоянии с Солнцем? Наклоном плоскости экватора Солнца к плоскости эклиптики пренебречь.

! В момент, описанный в условии задачи, планета Марс оказывается в противостоянии с Солнцем. Гелиоцентрические эклиптические долготы Земли и Марса в этот момент совпадают. Если мы построим рисунок в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики и пересекающей ее по линии «Солнце-Земля», то Марс также попадет в плоскость рисунка (хотя он может и не лежать точно на продолжении линии «Солнце-Земля»).

По условию задачи, мы пренебрегаем наклоном плоскости солнечного экватора к плоскости эклиптики (в реальности эти две плоскости образуют угол в 7° , который не влияет на ответ данной задачи). Межпланетная станция «Улисс» располагается над северным полюсом Солнца, линия «Солнце-Улисс» перпендикулярна плоскости эклиптики. Таким образом, «Улисс» также располагается в плоскости рисунка.

Итак, Земля, Марс и «Улисс» находятся в картинной плоскости, но при этом не лежат на одной прямой. Во всех трех точках данной плоскости короткий гамма-импульс от сверхновой звезды фиксируется одновременно. Это может быть только в том случае, если направление на сверхновую звезду перпендикулярно плоскости рисунка (иначе наблюдалась бы временная задержка, связанная с конечностью скорости света).

Линия, перпендикулярная плоскости рисунка, лежит в плоскости эклиптики и перпендикулярна линии «Солнце-Земля». Она пересекает небесную сферу в точках, в которых мы можем видеть Солнце за 3 месяца до и после даты наблюдения, то есть около 12 января и 12 июля. Эти точки располагаются в созвездиях Стрельца и Близнецов. В одном из этих созвездий и вспыхнула сверхновая звезда.





2

ОРБИТАЛЬНЫЙ РАДИОТЕЛЕСКОП

О.С. Угольников



? Российский космический радиотелескоп «Радиоастрон» будет выведен на эллиптическую орбиту с расстоянием в апогее 330 000 км. Вместе с наземными радиотелескопами он образует интерферометр со сверхдлинной базой. С каким наилучшим пространственным разрешением можно будет изучать область активного ядра галактики, имеющей красное смещение 0.5? «Радиоастрон» будет работать на длинах волн от 1.35 до 90 см.

! При совместной работе орбитального радиотелескопа и сети наземных радиотелескопов метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) позволяет достигнуть углового разрешения

$$\rho = \frac{\lambda}{L},$$

где λ – длина волны излучения, L – расстояние между космическим радиотелескопом и Землей. Из этой формулы видно, что наилучшее разрешение будет достигнуто при минимальной возможной длине волны и максимальном расстоянии. Для «Радиоастрона» минимальная длина волны составляет 1.35 см, а максимальное расстояние – 330 000 км. Таким образом, предельное угловое разрешение ρ будет равно $4 \cdot 10^{-11}$ радиан или 8 микросекунд дуги.

Для определения пространственного разрешения при изучении активного ядра галактики нам необходимо знать расстояние до него. Задача имеет оценочный характер, а красное смещение z меньше единицы, мы можем пользоваться простыми формулами. Скорость удаления галактики составляет

$$v = c \cdot z,$$

а расстояние до активного ядра

$$D = \frac{v}{H} = \frac{c z}{H}$$

или 2 Гпк. Здесь H – постоянная Хаббла. Наилучшее пространственное разрешение составит

$$R = D \cdot \rho = \frac{c z \lambda}{H L} = 0.08 \text{ пк.}$$



3

ЗАТМЕНИЕ В КОСМОСЕ

О.С. Угольников

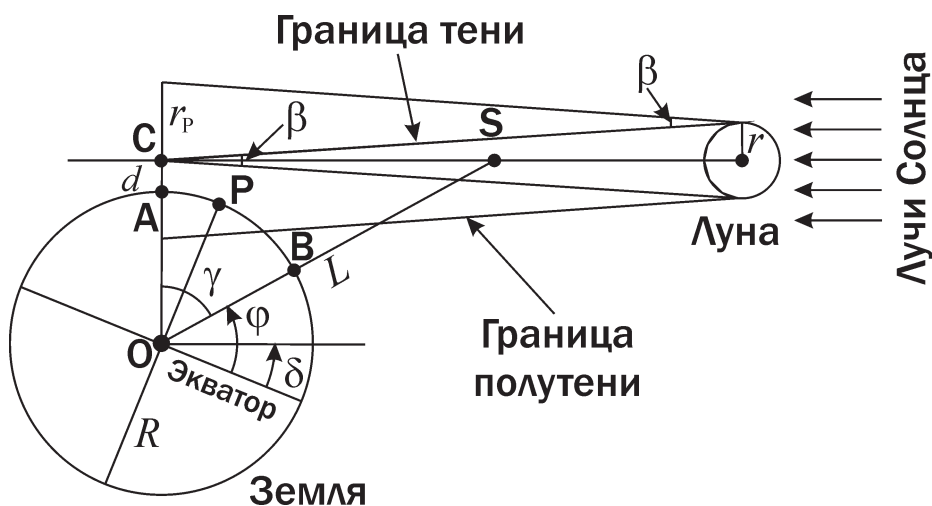


? В ночь с 1 на 2 июня 2011 года произойдет частное солнечное затмение. Его максимальная фаза, видимая на Земле, составит 0.60 и будет видна в 21^h16^m по Всемирному времени в светлую солнечную полночь на севере территории России. Угловые диаметры Солнца и Луны при этом будут одинаковыми и составят 31.5'. Представьте, что в этот же момент космонавты на борту некой орбитальной станции наблюдают центральное полное солнечное затмение. Над какой точкой поверхности Земли они в это время находятся? Определите координаты этой точки. Орбита станции – геосинхронная, круговая с периодом в одни звездные сутки, плоскость орбиты наклонена к плоскости земного экватора.

! Рассмотрим момент наибольшей фазы затмения, видимой на Земле. Изобразим Землю и Луну в плоскости, содержащей также Солнце, расположенное за границей рисунка.

Затмение видно на Земле как частное, и линия, соединяющая центры Солнца и Луны, на Землю не попадает. Наибольшая фаза частного солнечного затмения наблюдается в местную полночь в точке **A**, ближайшей к этой линии. При наблюдении из этой точки Солнце и Луна имеют одинаковый видимый диаметр β . Продолжим линию **OA** на рисунке за пределы Земли. Она пересечет линию «Солнце-Луна» в точке **C**. В этой точке будет наблюдаться центральное солнечное затмение. Отрезок **AC** перпендикулярен направлению на Солнце и Луну, и в точке **C** видимые диаметры Солнца и Луны будут также равны β . Фаза затмения, наблюдаемого в точке **C**, будет в точности равна единице, а сама точка **C** есть вершина конуса лунной тени.

Солнце значительно дальше от Земли, чем Луна. При наблюдении с Луны видимый диаметр Солнца будет практически таким же. Следовательно, полутень Луны, окружающая ее тень, в проекции на плоскость рисунка будет выглядеть как два конуса с тем же углом раствора β . Радиус полутени r_p вблизи Земли будет равен удвоенному радиусу Луны r .



На отрезке **СА** линейная фаза затмения убывает линейно при удалении от точки **С**, уменьшаясь до нуля на расстоянии r_p . В точке **А** фаза частного затмения будет равна

$$F = 1 - \frac{d}{r_p} = 1 - \frac{d}{2r},$$

где d – длина отрезка **СА** или расстояние от точки **А** до вершины конуса тени. Отсюда мы получаем

$$d = 2r(1 - F).$$

Так как в точке **А** в текущий момент полночь, и Солнце проходит точку нижней кульминации, плоскость меридиана в этой точке совпадает с плоскостью рисунка. Следовательно, плоскость рисунка содержит и северный полюс Земли. Обозначим его как **Р** и отметим также проекцию земного экватора. Затмение происходит 1 июня, и северный полюс освещен Солнцем. Склонение Солнца δ в это время близко к величине наклона экватора к эклиптике, 23.4° (в реальности оно составляет около $+22^\circ$).

Космическая станция находится на круговой геосинхронной орбите. Период ее обращения составляет один звездные сутки ($23^h56^m04^s$). Радиус орбиты равен

$$L = \left(\frac{GMT^2}{4\pi^2} \right)^{1/3}$$

или 42.16 тыс. км. Чтобы космонавты в этот момент наблюдали центральное полное солнечное затмение, они должны находиться на оси тени, причем ближе к Луне, чем точка **С** (иначе затмение было бы кольцеобразным). Обозначим положение орбитальной станции как **S**. Угол γ с вершиной в центре Земли, образованный направлениями на станцию и точку **А**, равен

$$\gamma = \arccos \frac{R + d}{L} = \arccos \frac{R + 2r(1 - F)}{L} = 79^\circ.$$

Отсюда мы получаем значение широты точки поверхности Земли **В**, над которой находится станция:

$$\varphi = 90^\circ - \gamma + \delta = 33^\circ.$$

Чтобы определить долготу этой точки, обратим внимание, что она располагается с другой стороны от полюса по отношению к точке **А**. Тогда в указанный момент в точке **В** должен наступить солнечный полдень. Этот момент соответствует 21^h16^m по Всемирному времени (UT). Долгота меридиана, на котором в это время наступает полдень, составляет

$$\lambda = 12^h - UT = -9^h16^m$$

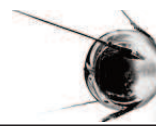
или 139° з.д. Данная точка располагается в Тихом океане. Интересно, что в самой этой точке солнечное затмение видно не будет.



4

ЗЕРКАЛЬНО-БЕЛЫЙ СТРАННИК

О.С. Угольников

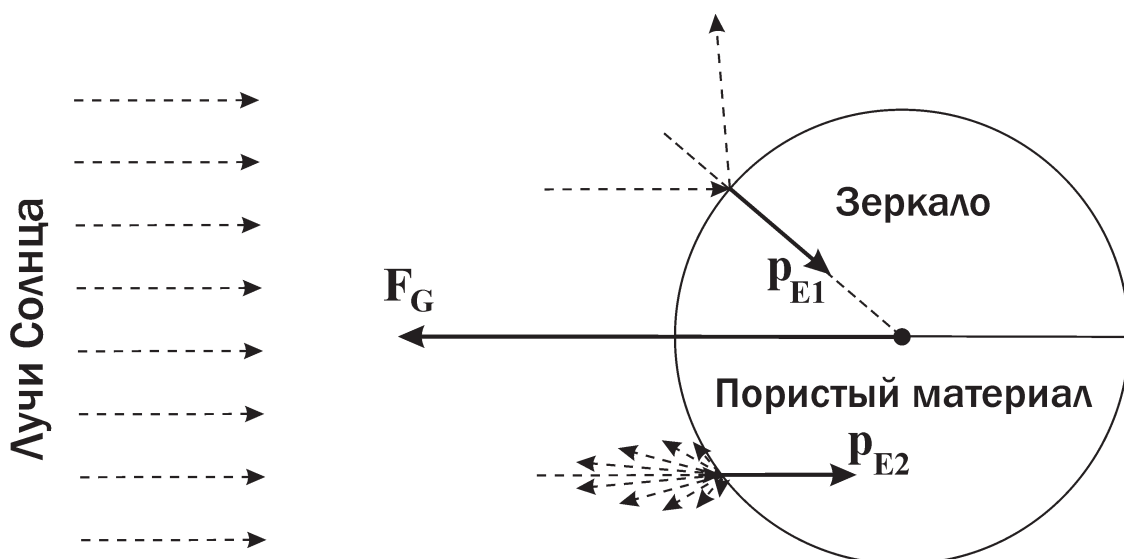


? Для изучения межпланетной среды в Солнечную систему запущен аппарат-зонд нового поколения. Он имеет сферическую форму, очень малые размеры и состоит из сверхлегких материалов. Одно его полушарие покрыто идеально отражающим зеркальным слоем, а другое – белым пористым материалом, похожим на снег, также отражающим 100% падающего излучения. Аппарат был доставлен в некоторую точку Солнечной системы и приведен изначально в состояние покоя относительно Солнца, не вращаясь. При этом Солнце освещало половину каждого из полушарий аппарата. Каким полушарием аппарат начнет поворачиваться к Солнцу сразу после начала своей работы? Материалы, из которых состоит аппарат, устойчивы, не испаряются и не меняют своих свойств со временем. Центр масс аппарата находится в его геометрическом центре. Действие планет и малых тел Солнечной системы на аппарат не учитывать.

! Так как аппарат маленький и легкий, существенное влияние на его движение будут оказывать силы светового давления, которые могут быть сравнимы с силой притяжения Солнца. Действие этих сил может привести к тому, что аппарат может начать поворачиваться к Солнцу одним из своих полушарий. Это может произойти вследствие вращения аппарата или его перемещения в боковом направлении относительно Солнца.

Чтобы понять, начнет ли аппарат вращаться, рассмотрим все силы, действующие на него. Гравитационная сила F_G направлена точно к Солнцу и приложена к центру масс сферического аппарата. Очевидно, она не создает момента сил и не может привести к вращению. Сила светового давления F_E есть сумма импульсов p_E , переданных аппарату фотонами, попавшими в него за единицу времени. Рассмотрим фотон, попадающий в зеркальную полусферу. Он отразится от нее в соответствии с законами геометрической оптики. Импульс, переданный сфере этим фотоном (p_{E1}) будет направлен вдоль радиуса сферы, к его центру. Это свойство выполняется для любой точки зеркальной полусферы, в которую попадет фотон. Следовательно, суммарный момент сил фотонного давления, действующих на зеркальную полусферу, равен нулю.

Пористая поверхность в каждой своей точке будет отражать излучение в широком диапазоне углов. Если в грубом приближении принять, что свет из каждой точки рассеивается изотропно в полусферу, то сила реакции от уходящих фотонов не будет создавать момента движения, но он будет создаваться импульсами падающих фотонов, направленными от Солнца (p_{E2} на рисунке). Из этого можно сделать вывод, что сферический аппарат начнет вращаться, поворачиваясь к Солнцу зеркальным полушарием.



Можно рассмотреть ситуацию более детально и учесть, что распределение рассеянного света в каждой точке не будет изотропным. На примере Луны, которая светит в небе Земли в полнолуние примерно в 10 раз ярче, чем в первой или последней четверти, мы видим, что отражение имеет преимущественное направление назад, обратно к Солнцу, причем это правило сохраняется для любого угла ориентации поверхности к Солнцу. У этого эффекта есть несколько причин, в том числе чисто геометрическая – при наблюдении со стороны Солнца мы не видим теней на пористой поверхности сферы, и она предстает нам наиболее яркой. В результате подобного процесса импульс p_{E2} , сообщенный аппарату, будет еще большим и также направленным противоположно Солнцу (или, строго говоря, образует малый угол с этим направлением). Как видно на рисунке и уже сказано выше, совокупность таких импульсов создает момент вращения, который начнет поворачивать аппарат зеркальным полушарием к Солнцу.

Наряду с вращением проявится еще один эффект, который также приведет к повороту зеркального полушария к Солнцу. Как видно на рисунке, сила фотонного давления на пористое полушарие направлена практически вдоль линии «Солнце-аппарат», перпендикулярная составляющая этой силы мала. В то же время для зеркальной полусферы эта компонента значительна, и она приведет к движению всего аппарата вбок по отношению к Солнцу зеркальным полушарием назад. Этот эффект также приведет к тому, что большая часть зеркального полушария со временем станет освещена солнечными лучами.



5

ДАЛЕКАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ

О.С. Угольников



? Космическая экспедиция прибыла на обитаемую планету в далекой звездной системе. Температурные условия на этой планете были аналогичны земным. При этом вторая космическая скорость для поверхности этой планеты оказалась ровно вдвое меньше третьей космической скорости и в 50 раз меньше второй космической скорости для поверхности звезды, вокруг которой обращается планета. Орбита планеты круговая. Найдите эффективную температуру центральной звезды.

! Обозначим массу и радиус звезды через M и R , массу и радиус планеты – через m и r , расстояние от звезды до планеты – через L . Получим выражения для всех скоростей, указанных в условии задачи. Вторая космическая скорость для поверхности планеты равна

$$v_2 = \sqrt{\frac{2Gm}{r}}.$$

Третья космическая скорость – это минимальная скорость запуска тела с поверхности планеты, при которой оно может в дальнейшем покинуть зону притяжения не только планеты, но и центральной звезды. Для определения этой скорости запишем выражение для орбитальной скорости планеты

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM}{L}}.$$

Чтобы в дальнейшем покинуть окрестности звезды, физическое тело на расстоянии L от звезды должно иметь скорость, не меньшую

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{L}} = \sqrt{2}v_0.$$

Минимальная скорость тела относительно планеты в этом случае будет равна

$$u = v - v_0 = (\sqrt{2} - 1)\sqrt{\frac{GM}{L}}.$$

Чтобы иметь такую скорость после выхода из сферы притяжения планеты, скорость при запуске должна составлять

$$v_3 = \sqrt{u^2 + \frac{2Gm}{r}} = \sqrt{(3 - 2\sqrt{2})\frac{GM}{L} + \frac{2Gm}{r}}.$$

Мы получили выражение для третьей космической скорости на поверхности планеты. Остается записать выражение для второй космической скорости на поверхности звезды:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

По условию задачи

$$v_3 = 2 v_2,$$

$$V_2 = 50 v_2.$$

Подставляя в эти соотношения полученные выше формулы, записываем:

$$(3 - 2\sqrt{2}) \frac{GM}{L} + \frac{2Gm}{r} = 4 \cdot \frac{2Gm}{r};$$

$$\frac{2GM}{R} = 2500 \cdot \frac{2Gm}{r}.$$

Из первого соотношения следует:

$$(3 - 2\sqrt{2}) \frac{GM}{L} = \frac{6Gm}{r}.$$

Далее, из второго соотношения:

$$(3 - 2\sqrt{2}) \frac{GM}{L} = \frac{6}{2500} \frac{GM}{R}.$$

В итоге, мы получаем связь радиуса звезды и расстояния от нее до планеты:

$$L = \frac{2500 \cdot (3 - 2\sqrt{2})}{6} R = K \cdot R,$$

где число K составляет 71.5. Отсюда следует, что видимый угловой радиус звезды ρ при наблюдении с планеты составляет $(1/K)$ радиан или $48'$, что примерно в 3 раза больше углового радиуса Солнца при наблюдении с Земли. Обозначим радиус Солнца через R_0 , расстояние от Солнца до Земли – через L_0 . Сходство температурных условий на Земле и далекой планете означает, что поток энергии от Солнца на Земле и от звезды на ее планете одинаков. Учитывая закон Стефана-Больцмана для светимостей звезд, получаем

$$\frac{4\pi\sigma T^4 R^2}{4\pi L^2} = \frac{4\pi\sigma T_0^4 R_0^2}{4\pi L_0^2}.$$

Здесь σ – постоянная Стефана-Больцмана, T и T_0 – эффективные температуры звезды и Солнца. Отсюда мы получаем выражение для эффективной температуры звезды:

$$T = T_0 \sqrt{\frac{R_0}{L_0} \cdot \frac{L}{R}} = T_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = T_0 \sqrt{K \cdot \rho_0}.$$

Здесь ρ_0 – видимый радиус Солнца при наблюдении с Земли. Эффективная температура звезды составляет около 3500 К.



6

МНОЖЕСТВО ЦИВИЛИЗАЦИЙ

О.С. Угольников



? Представьте себе, что около каждой десятой звезды в нашей Галактике существует по одной обитаемой планете. Жители всех этих планет проводят поиски других цивилизаций, пользуясь только данными сверхточной фотометрии звезд. Точность измерений блеска составляет 0.00001^m для звезд 0^m и ухудшается в 2 раза для звезд в 4 раза слабее, в 3 раза для звезд в 9 раз слабее и т.д. Сколько цивилизаций в результате смогут в обозримом будущем (за 100 ближайших лет) открыть планету Земля около звезды Солнце? Объемную концентрацию звезд в диске Галактики считать равной 1 пк^{-3} .

! Так как по условию задачи все цивилизации пользуются только данными звездной фотометрии, не изучая спектры или собственное движение звезд, единственное проявление существования Земли около Солнца, которое они могут зафиксировать – падение блеска Солнца при прохождении Земли по его диску. Расстояния до звезд несравнимо больше расстояния между Солнцем и Землей. В этом случае мы можем вычислить величину максимального падения блеска Солнца:

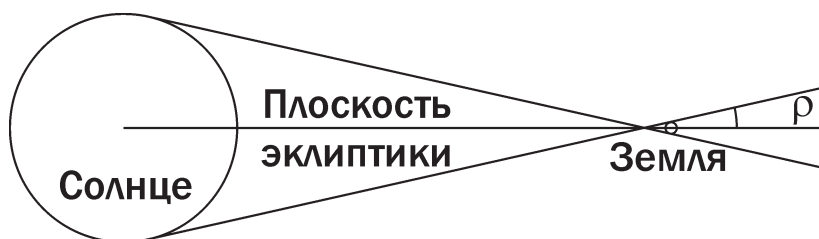
$$\Delta m = -2.5 \lg \frac{R^2 - r^2}{R^2} = 0.000091^m.$$

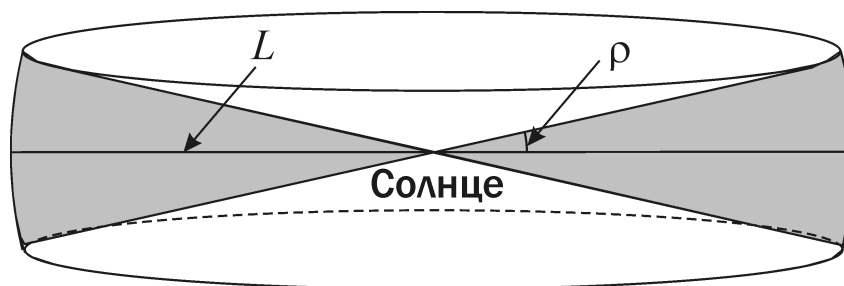
Эта величина в 9.1 раз больше точности фотометрии звезд 0^m , доступной далеким цивилизациям. Следовательно, подобное падение блеска они смогут заметить не только у звезд 0^m , но и у звезд в 9.1^2 , то есть в 83 раза слабее. Предельная звездная величина, для которой возможна такая регистрация, составит

$$m = 0 + 2.5 \lg 83 = 0 + 5 \lg 9.1 = 4.8.$$

Полученное значение совпадает с абсолютной звездной величиной Солнца. Такой блеск наша звезда имеет с расстояния L , равного 10 пк. Чтобы открыть планету Земля, зафиксировав ее прохождение по диску Солнца, другая цивилизация должна располагаться не далее 10 пк от Солнечной системы.

Но и среди близких звезд далеко не с каждой можно будет наблюдать прохождение Земли по диску Солнца. Для этого звезда должна находиться достаточно близко к плоскости эклиптики. На рисунке показана соответствующая область пространства. Видно, что угловое расстояние звезды от линии эклиптики при наблюдении с Земли не должно превышать ρ – угловой радиус Солнца. Ограничи-





вая эту область пространства сферой радиусом 10 пк, мы получаем фигуру, показанную на втором рисунке. Планета Земля сможет быть открыта со всех обитаемых планет, попавших внутрь этой фигуры.

Собственное движение звезд мало влияет на количество этих планет. Характерные собственные движения даже самых близких звезд за редким исключением не превосходят 1-2'' в год. Так как вопрос задачи относится к периоду в 100 ближайших лет, звезды преодолеют в своем движении не более 100-200'', что меньше величины ρ (около 1000''). Число звезд, влетевших в данную область пространства за 100 лет, будет существенно меньше числа звезд, уже находившихся в нем в начале данного периода.

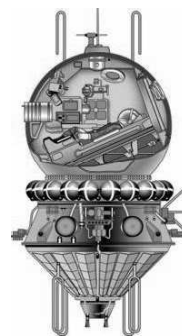
Нам необходимо вычислить объем полученной фигуры. Это можно сделать, представив ее как цилиндр радиусом L и высотой $2L\rho$, из которого вырезаны два конуса радиусом L и высотой $L\rho$. Объем получается равным

$$V = \pi L^2 \cdot 2L\rho - 2 \cdot \frac{1}{3} \pi L^2 \cdot L\rho = \frac{4}{3} \pi \rho L^3.$$

Взяв радианную меру угла ρ (около 0.0047), получаем величину объема: 20 пк³. В этот объем попадут около 20 звезд. Если у каждой десятой звезды окажется по одной обитаемой планете, то, скорее всего, две цивилизации смогут узнать о существовании планеты Земля около звезды Солнце.



1961 ════════ **2011**



ПРАКТИЧЕСКИЙ ТУР



9 класс



9

1

КОСМИЧЕСКИЙ РИСУНОК

О.С. УГОЛЬНИКОВ



? Вашему вниманию предоставлен детский рисунок (автор – Полина Приставка, Нижний Новгород, 2 стр. обложки). На нем изображены Солнце, Земля, Луна и небольшой искусственный спутник Земли. Считая орбиту этого спутника круговой, оцените период его обращения вокруг Земли. Неточности в отображении освещенности Земли, Луны и спутника (их фазы) в расчет не принимать.

Если не обращать внимание на неточности в отображении освещенности небесных тел, то рисунок вполне может отображать реальную ситуацию в околоземном космическом пространстве. На этом рисунке Земля имеет достаточно большие угловые размеры, что указывает на ее относительную близость к наблюдателю. Луна располагается на небольшом угловом расстоянии от Солнца и немного уступает ему по угловым размерам. Очевидно, что по отношению к наблюдателю Луна находится позади Земли и ее видимый диаметр меньше, чем при наблюдении с Земли. Искусственный спутник Земли небольшой, но также имеет значительные угловые размеры – он находится в непосредственной близости от точки наблюдения.

Для решения задачи нам необходимо найти расстояние между искусственным спутником (или, что фактически то же самое) точкой наблюдения и Землей. Рисунок дает нам возможность сделать это несколькими способами. Более простой из них состоит в сравнении видимых поперечников Солнца (d_0) и Земли (d_E). Измерения на рисунке дают результат

$$\frac{d_{\text{E}}}{d_0} \approx 9.$$

Подобное соотношение дает нам значение углового диаметра Земли в 4.5° , а расстояние до центра Земли составляет

$$a_{01} = \frac{R_E}{\sin(d_E/2)}$$

или 160 000 километров (здесь R_E – радиус Земли). Другой способ определения расстояния состоит в сравнении видимых поперечников Солнца и Луны. Из рисунка получаем

$$\frac{d_L}{d_0} \approx 0.8.$$

Видимый диаметр Луны d_L получается равным около $26'$, а расстояние до Луны

$$L = \frac{R_L}{\sin(d_L / 2)} = 450\,000 \text{ км.}$$

Угловое расстояние между Землей и Луной невелико. Очевидно, что Луна по отношению к наблюдателю находится позади Земли. Чтобы получить расстояние от наблюдателя до Земли, достаточно вычесть из величины L расстояние от Луны до Земли a_L :

$$a_{02} = L - a_L = 80\,000 \text{ км.}$$

Мы видим, что величины a_{01} и a_{02} различаются примерно вдвое, что определяет точность ответа на задачу. Нам остается определить орбитальный период спутника, считая его орбиту круговой. Это проще всего сделать, исходя из «классического» вида III закона Кеплера, сравнивая данный спутник с Луной:

$$\frac{T_0}{T_L} = \left(\frac{a_0}{a_L} \right)^{3/2}.$$

Здесь T_L – период обращения Луны вокруг Земли. В зависимости от принимаемого значения a_0 (80 или 150 тысяч км) величина периода обращения искусственного спутника Земли составляет от 2.5 до 7 суток.

9

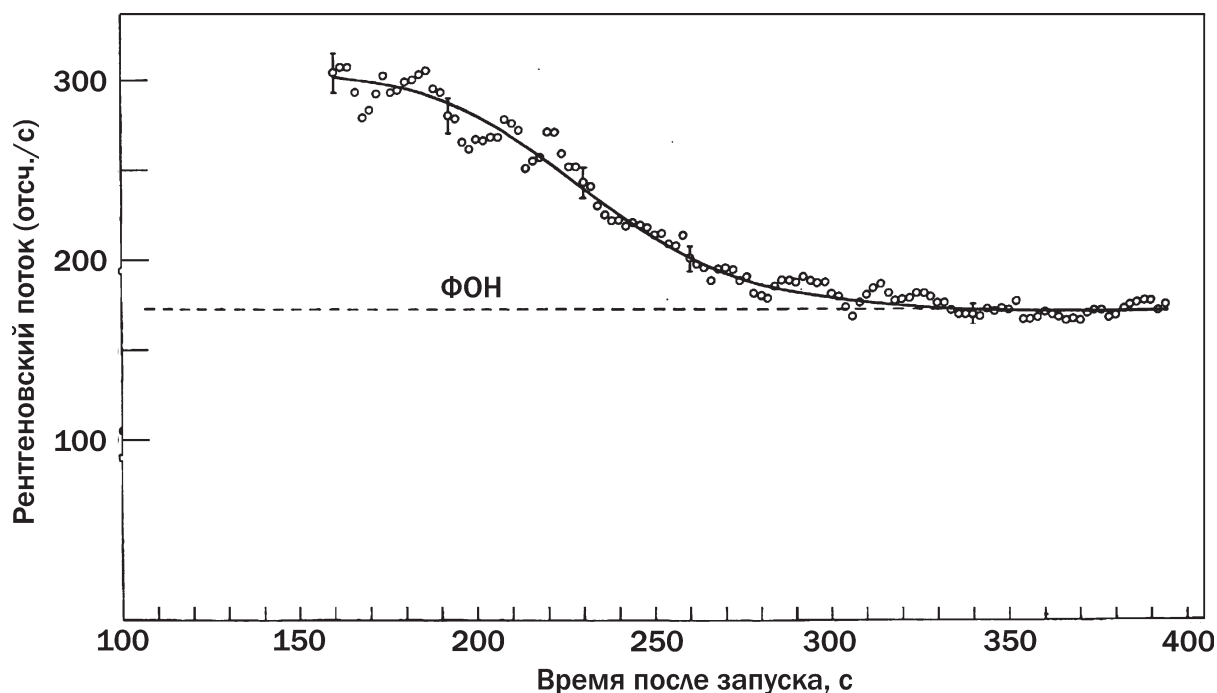
2

НАБЛЮДЕНИЯ С БОРТА РАКЕТЫ

О.С. Угольников



? 7 июля 1964 года с борта американской метеорологической ракеты «Аэроби» наблюдалось покрытие Луной рентгеновского источника, расположенного в Крабовидной туманности. На графике (след. стр.) представлена зависимость потока рентгеновского излучения, зафиксированного на борту ракеты, от времени. Оцените пространственный размер источника, если расстояние до Крабовидной туманности составляет 6500 световых лет. Считать, что траектория ракеты представляет собой отрезок прямой, направленный от центра Земли, а Луна в месте запуска располагалась вблизи зенита. Покрытие Луной рентгеновского источника считать центральным.



❗ Следуя условию задачи, мы предполагаем, что ракета «Аэробы» движется вдоль радиуса-вектора, направленного от центра Земли, а Луна в ходе явления располагается вблизи зенита в точке запуска. Тогда ракета будет все время находиться вблизи линии, соединяющей центры Земли и Луны, оставаясь при этом недалеко от поверхности Земли (как видно на графике, измерения производились через несколько минут после запуска ракеты). Тогда перемещение Луны относительно звезд и галактических объектов будет происходить с угловой скоростью, равной угловой скорости орбитального движения Луны:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Здесь T – звездный период обращения Луны (27.32 суток). Угловая скорость составляет 0.55° в час или $0.55''$ в секунду. По условию задачи, покрытие рентгеновского источника было центральным, и он двигался вдоль радиуса лунного диска. Тогда его угловой диаметр равен

$$\delta = \omega \cdot t,$$

где t – продолжительность частной фазы покрытия. Ее можно определить из графика. Яркость рентгеновского источника начала уменьшаться вблизи начала сеанса измерений (160 секунд после запуска) и вышла на фоновый уровень через 330 секунд после запуска. В итоге, величина t составляет 170 секунд, а угловой диаметр рентгеновского источника в Крабовидной туманности – порядка $90''$.

Расстояние до Крабовидной туманности составляет 6500 световых лет или 2000 парсек. Чтобы получить размер рентгеновского источника в астрономических единицах, достаточно перемножить расстояние до него в парсеках на угловой диаметр в секундах дуги. Размер источника составляет 180000 а.е. или чуть меньше 1 парсека.



? Представьте, что в не очень давние времена Марс был обитаем, по его поверхности текли реки. В одну ясную ночь наблюдателю на поверхности Марса предстала картина, изображенная на рисунке (художник – Ютака Кагайя, Япония, 2 стр. обложки). На ней видны звезды и другие две планеты Солнечной системы. Какие это планеты и в каких созвездиях (по нашим современным звездным картам) они находятся?

! На рисунке мы видим знакомые нам «зимние» созвездия: Возничий, Телец, Близнецы, Орион, Большой и Малый Пес. В этих созвездиях достаточно много ярких звезд. В созвездии Тельца находятся два ярких «лишних» светила – одно в точности между звездными скоплениями Плеяды и Гиады, другое – несколько правее. Оба светила превосходят в блеске все находящиеся неподалеку звезды. Очевидно, это и есть две планеты.

Чтобы установить, какие это планеты, вспомним, что Уран и Нептун на небе Марса хоть и могут быть немного ярче, чем при наблюдении с Земли, но не могут сравняться в блеске с наиболее яркими звездами. Планеты земной группы – Меркурий, Венера и Земля – могут быть очень яркими, но все они будут внутренними. Дальше всех из этих планет от Солнца на небе может удалиться Земля. Величина ее максимальной элонгации составит

$$\varepsilon = \arcsin \frac{r_3}{r_4},$$

где r_3 и r_4 – расстояния Земли и Марса от Солнца. Даже если учесть эллиптичность орбит Земли и Марса и подставить в формулу максимальное расстояние Земли (1.02 а.е.) и минимальное расстояние Марса (1.38 а.е.), элонгация не может быть больше 48° .

Наличие жизни на планете предполагает существование атмосферы. Видимость звезд на небе, особенно у горизонта, возможно только ночью, когда Солнце находится под горизонтом. Угол между плоскостями орбит Земли и Марса невелик, и эклиптика (видимый путь Солнца) на Марсе проходит примерно через те же области звездного неба, что и на Земле. Мы видим, что зодиакальное созвездие Рака уже поднялось над горизонтом (звездное скопление Ясли как раз появляется над деревом). Солнце еще не взошло, и оно может располагаться только в созвездии Льва или еще дальше от области неба, изображенной на рисунке. В результате, угловое расстояние между Солнцем и двумя планетами составляет не менее 80° . Следовательно, ни Меркурий, ни Венера, ни Земля ими быть не могут.

Остается единственный возможный вариант – в созвездии Тельца видны Юпитер и Сатурн. Планета, расположенная левее и заметно превосходящая в блеске все звезды – это, очевидно, Юпитер. Вторая планета, Сатурн, тоже светит несколько ярче Капеллы – звезды нулевой величины. Это также возможно в случае широкого раскрытия колец Сатурна.



10

1

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

О.С. Угольников



? Вам предложена фотография пролета Международной космической станции по диску Луны (автор – Эд Морана, США, 3 стр. обложки). Изображения МКС сделаны с интервалом 1/60 секунды друг после друга. Большой кратер, видимый на поверхности Луны – Тихо – имеет диаметр 85 км. Оцените размер Международной космической станции и ее высоту над поверхностью Земли. В момент съемки Луна проходила точку перигея орбиты и располагалась вблизи зенита в точке съемки.

! Для начала определим масштаб снимка. На нем присутствует один объект с известным нам размером – лунный кратер Тихо. Как известно, он располагается не в центре лунного диска и наблюдается с Земли под некоторым углом к лучу зрения. Поэтому для определения масштаба нам необходимо взять его видимую большую ось. Ее угловой размер составит

$$d = \frac{D}{L - R} = 0.00024$$

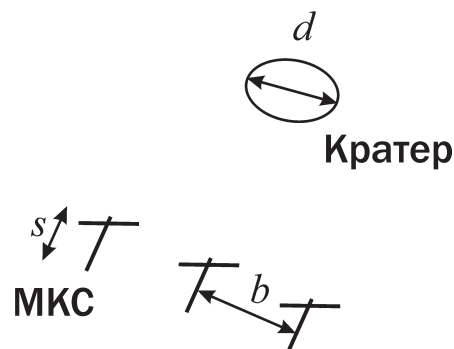
или 50". Здесь D – диаметр кратера Тихо, L – геоцентрическое расстояние до Луны в перигее, R – радиус Земли. Здесь было учтено, что Луна в пункте наблюдения располагается в зените. Обозначим через b угловое расстояние между двумя соседними положениями Международной космической станции на фотографии. Измеряя его, мы получаем

$$b = (8/7) \cdot d = 0.00027$$

или 57". Отсюда мы можем получить видимую угловую скорость Международной космической станции:

$$\omega = \frac{b}{t} = 0.016 \text{ с}^{-1}.$$

Здесь t – интервал времени между соседними изображениями МКС. По условию задачи, Луна и МКС в момент съемки находились вблизи зенита, а орбита станции круговая. Осевое вращение Земли и движение Луны мы не принимаем в расчет, так как их скорости (линейные и угловые) много меньше, чем у МКС. Тогда скорость станции v направлена перпендикулярно лучу зрения, и для видимой угловой скорости МКС справедливо соотношение



$$\omega = \frac{v}{H} = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{GM}{(R+H)}} \approx \sqrt{\frac{GM}{RH^2}} \cdot \left(1 - \frac{H}{2R}\right) = \sqrt{\frac{GM}{RH^2}} - \sqrt{\frac{GM}{4R^3}} = \sqrt{\frac{GM}{RH^2}} - \frac{\omega_0}{2}.$$

Здесь M – масса Земли, а H – высота станции над поверхностью Земли (т.е. над наблюдателем), при этом учтено, что величина H значительно меньше радиуса Земли R . Величина ω_0 есть геоцентрическая угловая скорость спутника с приземной круговой орбитой. Период для такой орбиты составляет 84 минуты, а величина ω_0 равна 0.0012 с^{-1} , что существенно меньше величины ω . Отсюда мы получаем значение высоты:

$$H = \sqrt{\frac{GM}{R}} \cdot \frac{1}{\omega + (\omega_0 / 2)} = \frac{v_1}{\omega + (\omega_0 / 2)}.$$

Здесь v_1 – первая космическая скорость для поверхности Земли. Высота МКС получается равной 470 км. По фотографии можно оценить видимый размер космической станции:

$$s = 0.6 \cdot d = 0.00014$$

или $30''$. Пространственный размер станции составляет

$$S = H \cdot s = 65 \text{ м.}$$



2

ТЕЛЕСКОП В КОСМОСЕ

А.М. Татарников



? Помогите космонавту на борту орбитальной станции определить фокусное расстояние объектива большого зеркально-линзового телескопа и сложного (многолинзового) окуляра этого телескопа. Диаметр входного отверстия равен 300 мм. Из измерительных средств у космонавта имеется только устройство, похожее на линейку, но с большей точностью измерения (цена деления 0.1 мм).

! Конструкция зеркально-линзового телескопа не позволит определить фокусное расстояние простым измерением расстояния от объектива до фокальной плоскости. Тем не менее, существует несколько способов определения оптических характеристик объектива телескопа даже в столь стесненных условиях. Приведем лишь один, наиболее очевидный вариант решения.

Фокусное расстояние объектива может быть определено по масштабу изображения в фокальной плоскости. Для этого направим объектив на объект с известным угловым размером, например, на Луну. Измерим размер изображения Луны в фокальной плоскости. Он зависит только от фокусного расстояния:

$$L = \alpha \cdot F,$$

где α – угловой диаметр Луны в радианах, F – фокусное расстояние объектива. Отсюда:

$$F = \frac{L}{\alpha}.$$

Угловой диаметр Луны равен 0.5° , следовательно

$$F = \frac{L}{0.5} \cdot \frac{180}{\pi} \approx 115 \cdot L.$$

Существуют разные методы определения фокусного расстояния окуляра, но не все они применимы к любому окуляру сложной конструкции. Наиболее универсальный метод измерения фокусного расстояния окуляра состоит в нахождении увеличения, даваемого телескопом с его использованием. Установим окуляр в телескоп, направим его на ярко освещенный предмет (ту же Луну) и измерим диаметр выходного зрачка d . Тогда увеличение равно:

$$\Gamma = \frac{D}{d} = \frac{F}{f}.$$

Здесь D – диаметр входного отверстия. Отсюда находим фокусное расстояние окуляра:

$$f = \frac{d \cdot F}{D} = \frac{d \cdot F}{300}.$$

В последнем равенстве все величины выражаются в миллиметрах.



3

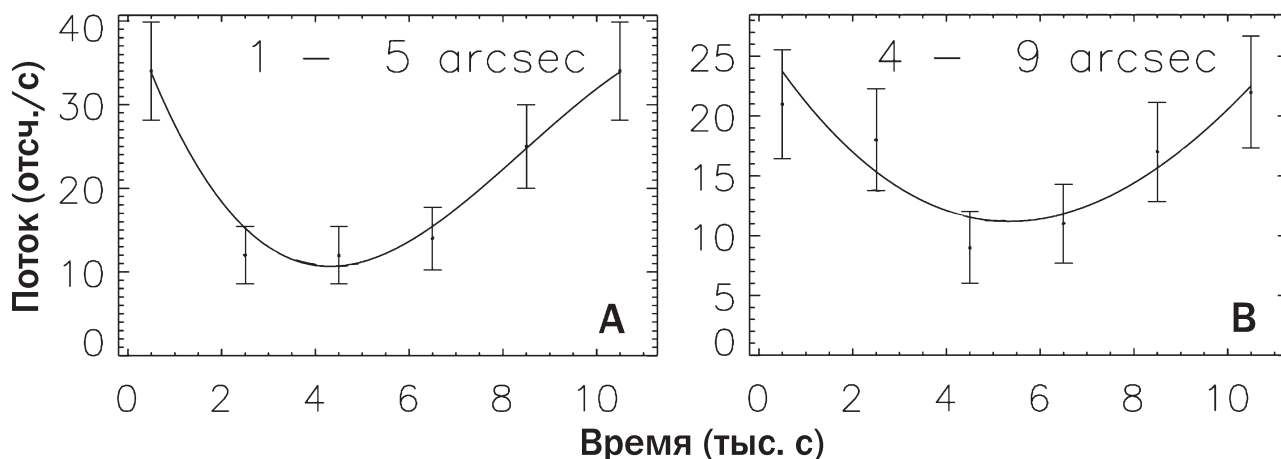
РЕНТГЕНОВСКИЙ ИСТОЧНИК

О.С. Угольников



? Вам представлена рентгеновская фотография объекта Лебедь X-3, сделанная с борта орбитального рентгеновского телескопа «Чандра» (3 стр. обложки). Данный объект, входящий в состав тесной двойной системы, изменяет свою яркость с периодом 4.8 часа (орбитальный период системы). С помощью телескопа «Чандра» одновременно были построены кривые блеска двух областей гало объекта Лебедь X-3. Эти области показаны в виде кругов на фотографии. Кривые блеска (зависимость рентгеновского потока от времени) приведены на графиках. Считая, что гало возникает вследствие рассеяния излучения в межзвездной среде на полпути между источником и наблюдателем, оцените расстояние до источника Лебедь X-3.

! По графикам изменения рентгеновской светимости мы видим, что все измерения источника Лебедь X-3 рентгеновским телескопом «Чандра» охватывали интервал около 10 000 секунд или 3 часов, что меньше периода изменений блеска. На графиках представлена часть периодической кривой, содержащий момент минимума светимости. Зона **A** попадает во внутреннюю область гало, непосредственно примыкающую к источнику. В этой области минимум наступает несколько раньше, чем в зоне **B**, более удаленной от источника Лебедь X-3. Чтобы



понять причину этой разницы, рассмотрим геометрию распространения излучения, регистрируемого в гало источника Лебедь X-3.

Излучение, идущее от источника, рассеивается в точке межзвездной среды **М**, равноудаленной от источника и Земли. Далее оно регистрируется на Земле. Путь, который прошло излучение по данной траектории, составляет

$$L = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + h^2} = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{D\alpha}{2}\right)^2} = D\sqrt{1 + \alpha^2} \approx D + \frac{D\alpha^2}{2}.$$

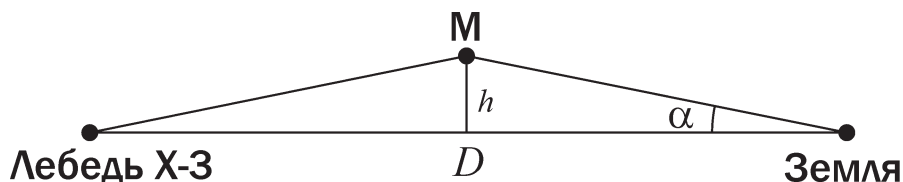
Здесь α – угловое расстояние между наблюдаемой точкой гало и источником. Полученная длина больше, чем расстояние между источником и наблюдателем D . Если источник характеризуется колебаниями блеска, то они будут повторяться и в гало, но с временной задержкой, связанной с разностью длин траекторий. Величина этой задержки составит

$$\Delta t = \frac{L - D}{c} = \frac{D\alpha^2}{2c}.$$

Из графиков изменения блеска в зонах **A** и **B** мы не можем напрямую получить значение величин задержки в этих зонах, но можем определить их разность. При наблюдении в зоне **B** минимум наступает на 700 секунд позже, чем в зоне **A**. Обозначим эту величину как t_{AB} . Тогда справедливо выражение

$$t_{AB} = \Delta t_B - \Delta t_A - N \cdot T.$$

Здесь T – период изменения блеска источника, а N – целое неотрицательное число. Обратим внимание, что обе зоны имеют некоторые угловые размеры и даже частично перекрываются друг с другом. Если бы число N отличалось от нуля, и разница временных задержек в зонах **A** и **B** превышала период T , то она существенно



изменялась бы и внутри каждой зоны. В результате, колебания блеска в таких зонах были бы полностью замыты. Мы же видим, что они весьма существенны – поток изменяется примерно вдвое. Это дает нам основание считать число N равным нулю (еще одно подтверждение этому будет дано в конце решения). Следовательно,

$$t_{AB} = \frac{D(\alpha_B^2 - \alpha_A^2)}{2c}.$$

Величины α_A и α_B есть угловые расстояния между источником и центром каждой из зон. Их можно определить по рисунку, а также по данным графика – $3''$ и $6.5''$ соответственно. Их нужно перевести в радианную меру и подставить в выражение для расстояния до источника:

$$D = \frac{2ct_{AB}}{\alpha_B^2 - \alpha_A^2}.$$

Расстояние до источника Лебедь X-3 получается равным 17 кпк. Обратим внимание, что при подстановке числа $N > 0$ мы бы получили расстояние, существенно большее размеров нашей Галактики. Это также может рассматриваться как подтверждение правильного выбора числа N , равного нулю.



1

ТРАССЫ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ

Е.Н. Фадеев



? Вам предоставлены два рисунка, на которых изображены трассы искусственных спутников Земли (траектории точки на поверхности Земли, где спутник виден в зените, стр.42) в равноугольной проекции. Орбиты спутников круговые. Определите периоды обращения спутников и наклонение их орбит к плоскости экватора Земли.

! В начале решения рассмотрим вопрос о наклонении орбит спутников. Изобразим Землю и орбиту спутника в проекции, перпендикулярной плоскости орбиты спутника и плоскости экватора.

Если спутник движется по своей орбите с запада на восток, в ту же сторону, что и Земля вокруг своей оси (направление **А** на рисунке), то величина наклонения орбиты i_A равна углу между плоскостями экватора и орбиты спутника. Тогда, как видно на рисунке, для наклонения справедливо простое соотношение

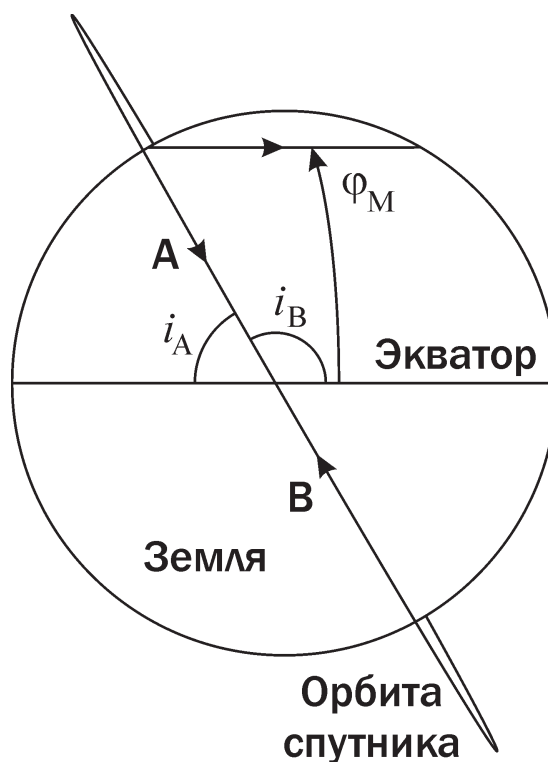
$$i_A = \varphi_M,$$

где φ_M – наибольшая широта места, в котором спутник можно наблюдать в зените. Если же спутник движется в противоположную сторону (направление **В** на рисунке), то наклонение его орбиты считается равным

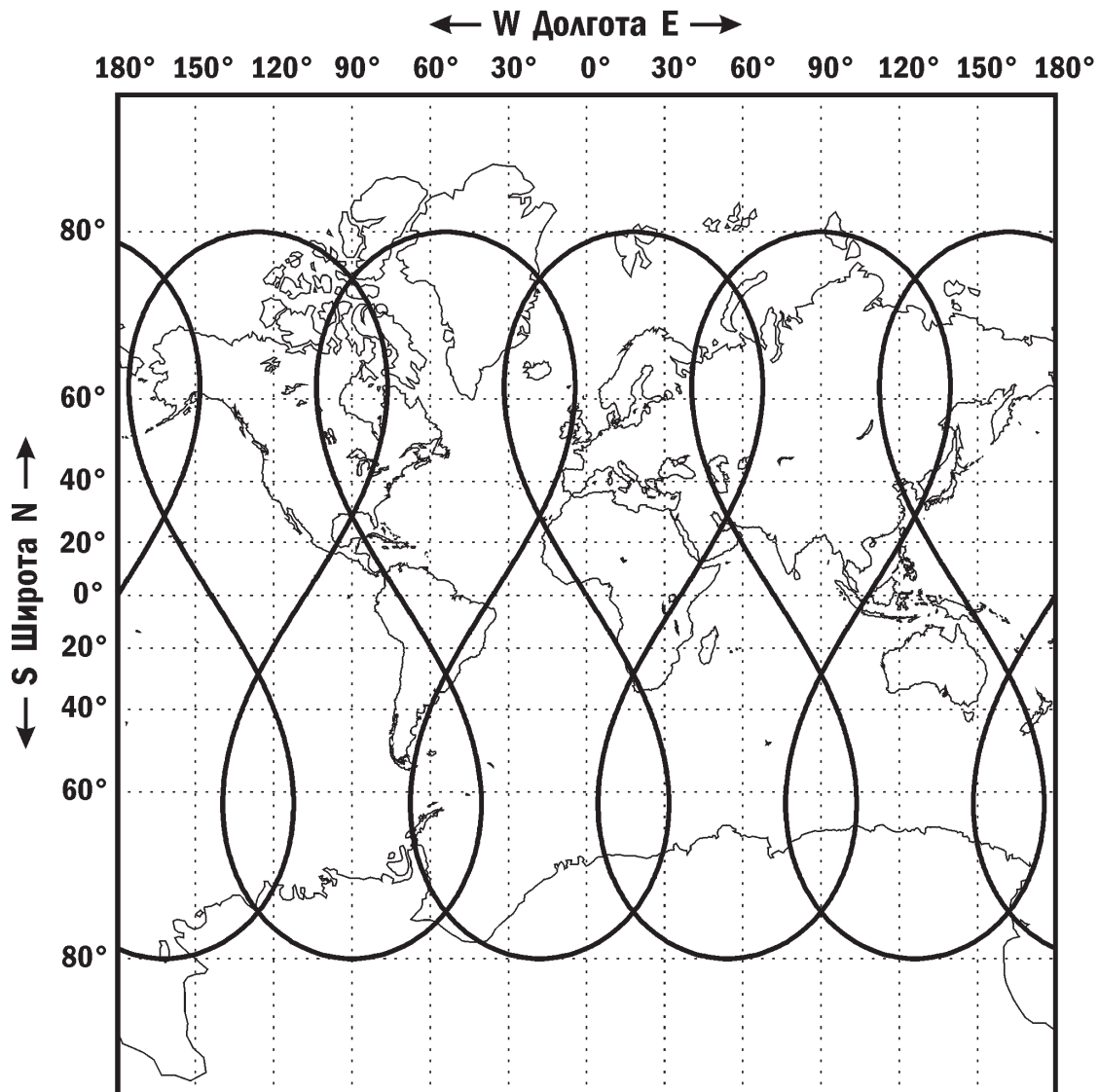
$$i_B = 180^\circ - \varphi_M.$$

Поэтому мы можем сразу сказать, что наклонение орбиты первого спутника в условии задачи равно 80° или 100° , а наклонение орбиты второго спутника – 60° или 120° . Чтобы выбрать правильные значения, нам нужно установить направление вращения обоих спутников.

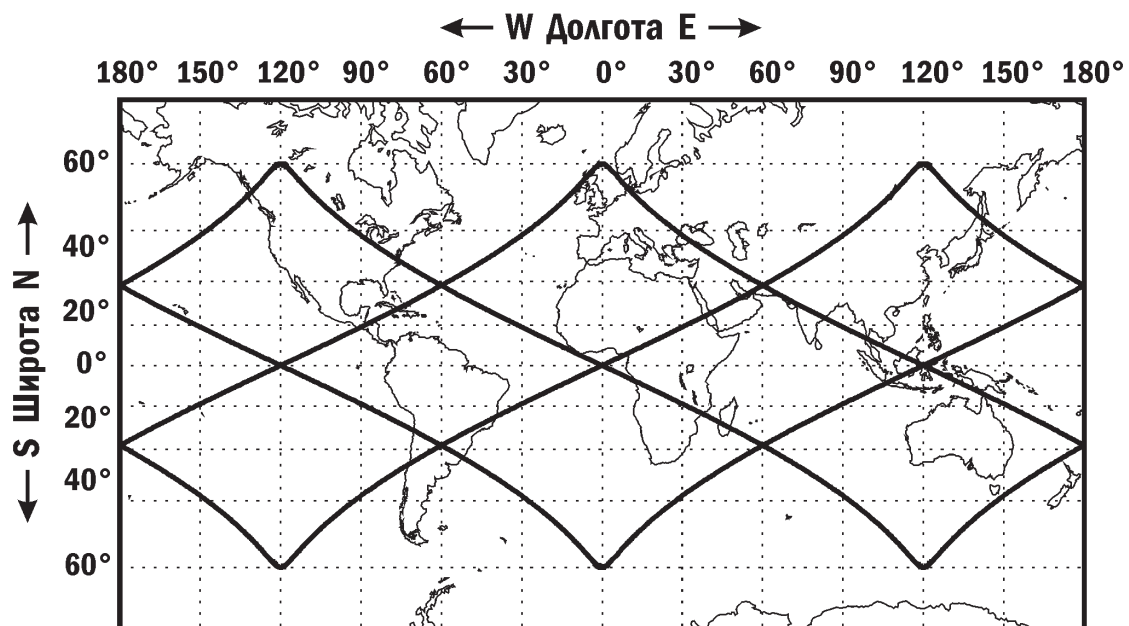
Форма трассы спутника определяется наложением орбитального движения спутника и осевого вращения Земли. Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси, то спутник, совершив один оборот, возвращался бы в ту же точку орбиты над той же самой точкой на поверхности Земли. Трасса спутника представляла бы собой замкнутую кривую, похожую на синусоиду, один период которой соответство-



Трасса 1



Трасса 2



вал бы всей окружности Земли. В реальности картина существенно сложнее. По завершению одного периода спутник возвращается в ту же точку орбиты, но Земля поворачивается вокруг своей оси, и под спутником оказывается уже другая точка поверхности, хотя и с той же широтой. Угол поворота Земли (и разность долгот) зависит от орбитального периода спутника. К примеру, для низкой орбиты с периодом 1.5 часа угол поворота Земли составит около 22.5° . В итоге, синусоидальная трасса спутника сожмется или растянется, в зависимости от соотношения направлений вращения спутника и Земли.

Рассмотрим вначале случай обратного вращения спутника (направление **В** на рисунке, наклонение орбиты более 90°). В этом случае движение спутника будет происходить с востока на запад, а движение поверхности Земли – с запада на восток. В итоге, трасса спутника во всех точках его орбиты будет сохранять западное направление по долготе. Долгота точки Земли, находящейся под спутником, будет постоянно уменьшаться.

Полученный вывод вступает в противоречие с тем, что мы видим на трассе первого спутника. На ней присутствуют характерные «петли» – долгота точки Земли под спутником то увеличивается, то уменьшается. Следовательно, первый спутник не может иметь обратного направления вращения. Он обращается в ту же сторону, что и Земля вокруг своей оси, а наклонение его орбиты составляет 80° .

Чтобы определить период обращения этого спутника, нужно выяснить, в каком направлении движется точка Земли под спутником вдоль трассы. Как уже было указано, эта точка в разных участках трассы смещается по долготе как к западу, так и к востоку. Рассмотрим движение спутника по орбите в момент пересечения плоскости экватора (точка **Е** на рисунке) и на наибольшем удалении от нее (точка **М** на рисунке). Обозначим через **Е₀** и **М₀** точки поверхности Земли, находящиеся в этот момент под спутником. За счет осевого вращения Земли эти точки движутся на восток со скоростями V и V_M , причем

$$V_M = V \cos \varphi_M.$$



По условию задачи, орбита спутника круговая. Пусть его скорость равна v . Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси, точка поверхности Земли под спутником двигалась бы вдоль трассы со скоростью $v \cdot (R/r)$, где R и r – радиусы Земли и орбиты спутника. Учтем осевое вращение Земли и определим компоненту скорости движения точки по трассе в направлении, параллельном экватору (по долготе):

$$u_E = v \cdot (R/r) \cos i - V,$$

$$u_M = v \cdot (R/r) - V \cos \varphi_M = v \cdot (R/r) - V \cos i.$$

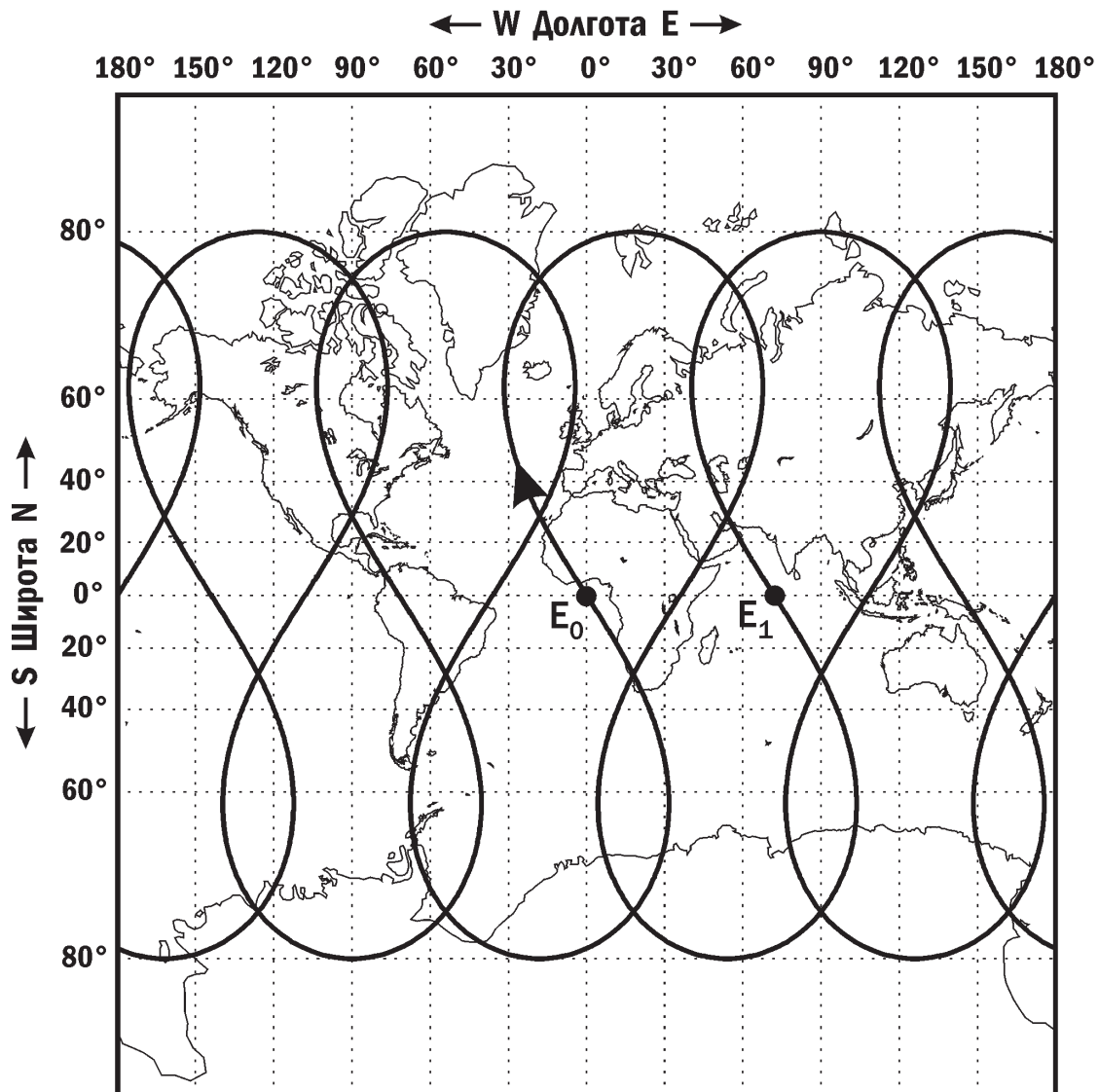
Данные величины имеют знак «+», если движение происходит к востоку, и знак «–», если движение происходит к западу. Угол i положителен и не превосходит 90° . Мы видим, что величина u_E всегда меньше, чем u_M . В частности, при определенном соотношении скоростей скорость u_E может быть отрицательной, а скорость u_M – положительной (обратная картина невозможна). Итак, изменение направления скорости указывает, что первый спутник в условии задачи движется на запад при пересечении плоскости экватора и на восток – при максимальном удалении от него. Это позволяет нам указать направление движения точки под спутником по трассе (стрелка на рисунке).

Пусть в начальный момент времени спутник пересек плоскость экватора, находясь при этом над точкой E_0 с координатами 0° ш., 0° д. Сделав один оборот, по одному разу пролетев над северным и южным полушариями Земли, спутник оказался над точкой E_1 с координатами 0° ш., 72° в.д. Как видно из трассы, данная точка удалена от точки E_0 к востоку (по направлению движения спутника и Земли) на $1/5$ часть окружности экватора. При этом трасса не замыкала круг долгот, оставаясь вблизи указанного долготного диапазона. Следовательно, за один орбитальный период Земля отстала в своем вращении от спутника на $1/5$ оборота, и период обращения спутника составляет $4/5$ звездных суток, то есть 19^h09^m .

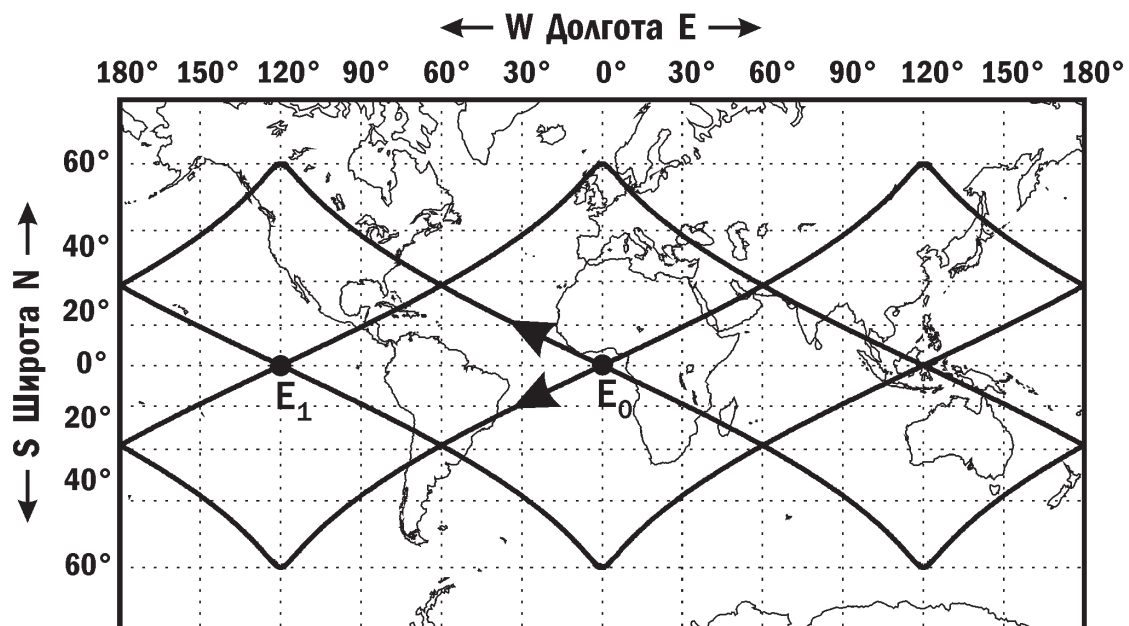
Обратимся к трассе второго спутника. Здесь точка, расположенная под спутником, движется по долготе строго в одном направлении. Однако, при достижении максимальной широты φ_M на трассе наблюдается характерный «излом». С учетом круговой орбиты спутника это означает, что скорость u_M (см. формулы выше) в этот момент приближается к нулю. Это, в свою очередь, может иметь место, если скорости v и V направлены в одну сторону, и данный спутник также обладает прямым направлением вращения. Наклонение его орбиты равно 60° .

Исходя из тех же формул, скорость u_E у этого спутника отрицательна, и при пересечении экватора он (как и первый спутник) будет двигаться к западу. При этом возможны две траектории, указанные на рисунке стрелками. В обоих случаях в течение одного орбитального периода точка трассы пройдет целый круг в 360° по долготе и сместится еще на 120° к западу. При этом сам спутник движется по орбите с запада на восток. Следовательно, в ходе своего орбитального периода он отстанет от Земли на $4/3$ оборота, и величина самого периода равна $7/3$ звездных суток или $2^d07^h51^m$.

Трасса 1



Трасса 2





? На фотографии, сделанной с искусственного спутника Земли (3 стр. обложки), вы видите полную Луну над краем Земли, помеченным красной линией. Оцените, на какой высоте над поверхностью Земли находится искусственный спутник в момент съемки. Принять величину атмосферной рефракции на поверхности Земли у горизонта равной $35'$. Считать, что на всех высотах атмосфера имеет одинаковый химический состав и температуру 0°C . Поглощение и рассеяние света в атмосфере, а также эффекты облачности не учитывать.

! Изображение Луны на фотографии искажено эффектом преломления света в атмосфере Земли. Этот эффект мы можем наблюдать и на Земле, особенно хорошо он заметен на восходе и заходе Солнца и Луны. Но картина, наблюдающаяся на данной фотографии, отличается от земных восходов и заходов Луны.

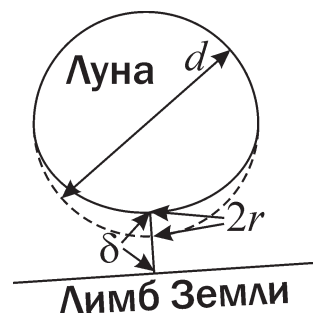
Мы видим, что верхняя половина лунного диска не искажена рефракцией – ее излучение прошло над плотными слоями атмосферы. В то же время нижний край Луны заметно приподнят над краем (лимбом) Земли. Сравнив вид Луны с неискаженным кругом, мы можем определить величину углового смещения нижнего края Луны. По фотографии оно составляет около $1/9$ от углового диаметра Луны, то есть $3.5'$. Для дальнейшего удобства обозначим эту величину $2r$. Это есть угол преломления луча от нижнего края Луны в атмосфере Земли. Нам необходимо вычислить, на какой наименьшей высоте (высоте перигея) в атмосфере прошел этот луч.

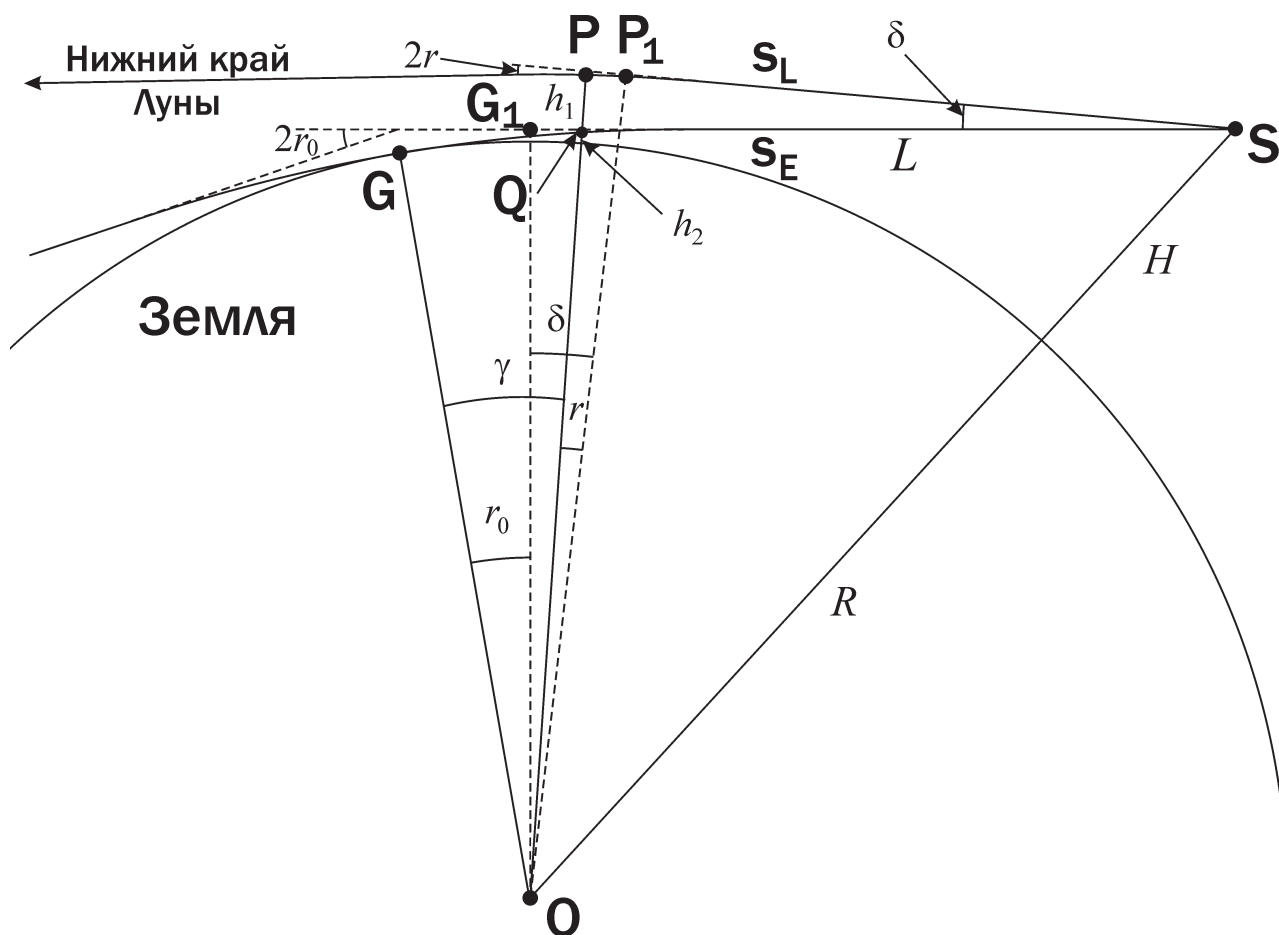
Если бы излучение прошло по касательной к поверхности Земли (например, в точке **G** на рисунке справа) и дальше вышло за пределы атмосферы, то угол его преломления составил бы $2r_0$ или $70'$ (r_0 – величина приземной рефракции у горизонта). Множитель 2 появляется вследствие того, что луч не только входит в атмосферу, но и выходит из нее.

Предположим, что луч прошел точку перигея **P** на высоте h над поверхностью Земли. По условию задачи, атмосфера имеет постоянный химический состав и температуру T (273 К). Тогда концентрация молекул изменяется с высотой по закону Больцмана:

$$n(h') = n_0 e^{-\frac{\mu g h'}{RT}} = n_0 e^{-\frac{h'}{h_0}}.$$

Здесь μ – молярная масса атмосферного воздуха, g – ускорение свободного падения, R – универсальная газовая постоянная. Величина h_0 (называемая высотой однородного столба атмосферы) равна 8.0 км. Концентрация частиц на нулевом уровне обозначена как n_0 . Если подняться на высоту h и принять данный слой атмосферы за нулевой уровень, то для вышележащих слоев будет выполняться та же формула, только с другой константой n_0 , умноженной на e^{-h/h_0} . Распространение





луча с высотой перигея h аналогично распространению луча, касающегося поверхности Земли при плотности атмосферы, умноженной на фактор e^{-h/h_0} . Преломляющие свойства в атмосфере пропорциональны концентрации частиц. В итоге, угол поворота данного луча после выхода из атмосферы составит

$$2r(h) = 2r_0 e^{-\frac{h}{h_0}}.$$

Отсюда мы получаем высоту перигея луча, идущего от нижнего края Луны к искусственному спутнику Земли:

$$h = h_0 \ln \frac{r_0}{r}.$$

Учитывая определение величины r как половины угла преломления луча от нижнего края Луны, получаем значение высоты точки **P**: 24 км.

Изобразим геометрию распространения лучей от Луны и Земли к спутнику на рисунке. Пусть спутник располагается в точке **S**. Свет от краев Луны и Земли приходит в эту точку по полупрямым s_L и s_E . Угловое расстояние между лимбом Земли и искаженным краем диска Луны (угол между полупрямыми) обозначим как δ . Его также можно определить по фотографии, оно составляет $8.5'$.

Как видно из рисунка, найденная выше высота точки **P** есть сумма величин h_1 и h_2 . Для первой из этих величин, видимой со спутника высоты точки **P** или длины отрезка **PQ**, справедливо соотношение

$$h_1 = L \cdot \delta,$$

где L – расстояние от спутника до лимба Земли. В этой формуле учтена малость угла δ и угла преломления лучей. Второе слагаемое – высота точки Q , h_2 , появляется вследствие того, что изображение лимба Земли также искажено атмосферной рефракцией – фактически мы видим на лимбе точку G . Покажем, что величина h_2 мала и фактически не влияет на ответ задания. Соединим центр Земли (точку O) прямыми линиями с точками перигея двух лучей (G и P , сплошные линии), а также проведем из точки O перпендикуляры на полупрямые s_E и s_L (пунктирные линии). Эти перпендикуляры пересекаются с полупрямыми в точках G_1 и P_1 . По свойству углов со взаимно-перпендикулярными сторонами угол P_1OG_1 равен δ . Так как лучи симметричны относительно прямых OP и OG , то углы POP_1 и GOG_1 равны половинам соответствующих углов преломления, то есть равны r и r_0 . Из этого следует соотношение углов:

$$\gamma = \angle POG = \angle P_1OG_1 - \angle P_1OP + \angle G_1OG = \delta + r_0 - r = 42'.$$

Траектория луча от точки G до точки Q – изогнутая линия, что несколько уменьшает высоту h_2 . Для того, чтобы оценить величину h_2 сверху, представим, что траектория луча – прямая линия. Тогда треугольник QOG – прямоугольный, в котором нам известен угол γ . Верхний предел на высоту точки Q равен:

$$h_2 = \frac{R}{\cos \gamma} - R \approx \frac{R \gamma^2}{2}$$

или примерно 0.5 км. Здесь R – радиус Земли, а угол γ берется в радианной мере. Мы видим, что высота h_2 существенно меньше высоты h , и далее мы можем пользоваться простым соотношением:

$$h = h_1 = L \cdot \delta.$$

Из этого мы получаем значение L :

$$L = \frac{h}{\delta} = \frac{h_0 \ln(r_0/r)}{\delta} \approx 10000 \text{ км},$$

и далее, значение высоты спутника над поверхностью Земли:

$$H = \sqrt{(R + h)^2 + L^2} - R = 5500 \text{ км}.$$



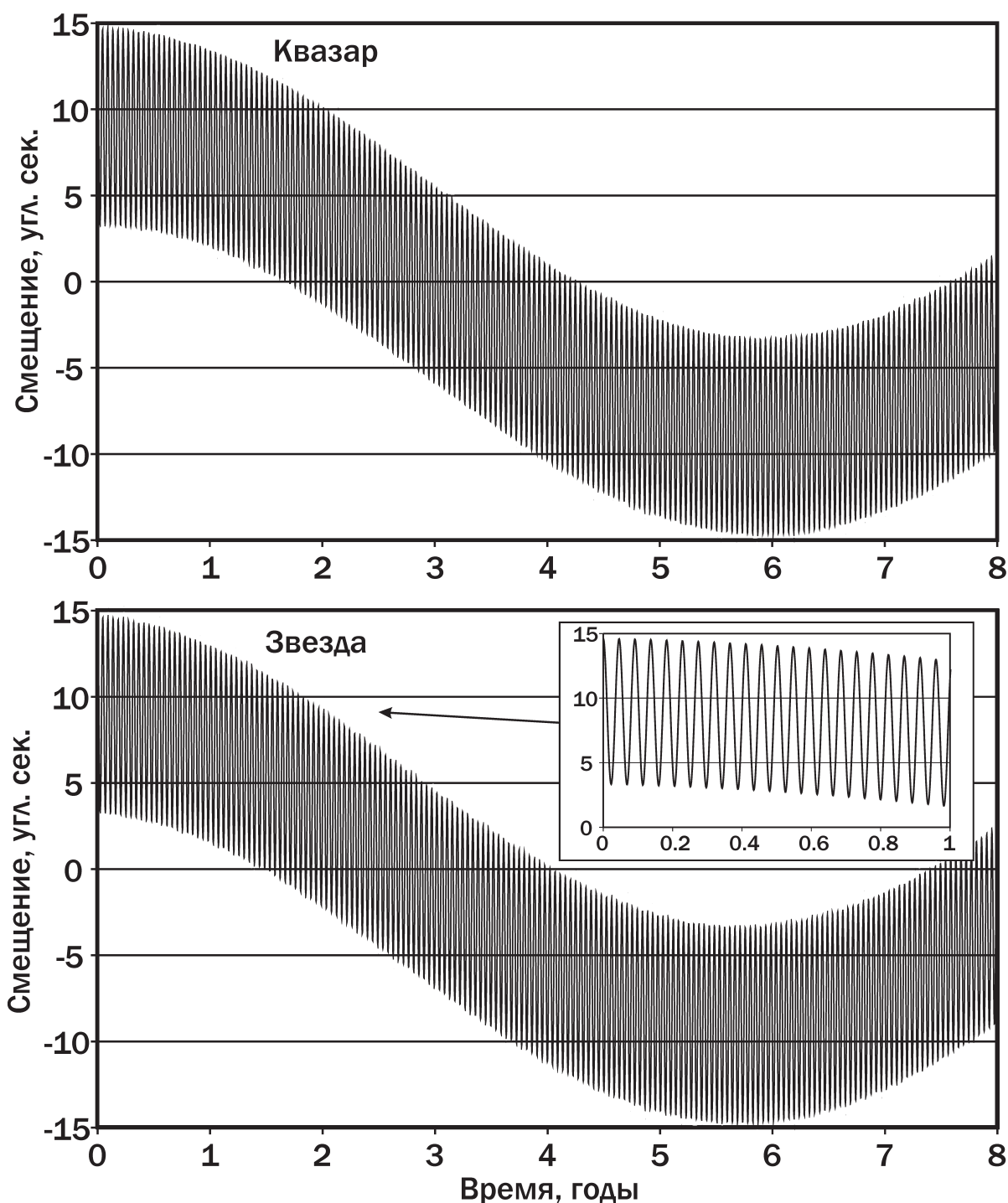
3

ВНЕЗЕМНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Е.Н. Фадеев, О.С. Угольников



? На новой обсерватории, построенной на поверхности одного из тел Солнечной системы, проводятся высокоточные измерения видимых положений светил. На графике приведены величины смещения некоторой звезды и находящегося рядом с ней далекого квазара относительно их средних положений вдоль некоторого направления на небе. Смещение квазара и звезды в перпендикулярном направлении мало и не наблюдается. Известно, что звезда одиночная и не имеет собственного движения. Чему равно расстояние до звезды? С какого объекта Солнечной системы проводились наблюдения?



! На положение далеких небесных объектов на небе влияет несколько факторов. Первый из них не связан со свойствами самих объектов и является результатом движения самого наблюдателя – это абберрация света. Величина смещения вследствие абберрации обращается в ноль, если наблюдатель движется к исследуемому объекту или от него. Если же движение происходит перпендикулярно направлению на объект, то абберрация достигает максимального значения

$$a = \frac{v}{c}; \quad a'' = 206265'' \frac{v}{c}.$$

Здесь v – скорость наблюдателя. Абберрация смещает изображение объекта вперед по отношению к движению наблюдателя. Абберрационное смещение не зависит от расстояния до объекта и определяется только его положением на небе. Если два объекта располагаются на небе рядом друг с другом, то их абберрационное смещение будет одинаковым.

Объект может изменять свое положение на небе в результате изменения геометрического положения наблюдателя – это есть параллактическое смещение объекта. При движении по кругу радиусом R параллактическое смещение обращается в ноль, если наблюдатель находится на линии, соединяющий центр его кругового движения (например, Солнце) и объект. Если же наблюдатель удалится на 90° , то параллактическое смещение составит

$$p = \frac{R}{L}; \quad p'' = 206265'' \frac{R}{L}.$$

Здесь L – расстояние до объекта. В итоге, если наблюдатель движется по круговой орбите, а объект находится в плоскости этой орбиты, то абберрационное и параллактическое смещение будут иметь период, равный периоду обращения наблюдателя. Но при этом они будут смещены по фазе на 90° : когда абберрационное смещение будет достигать максимума, то параллактическое смещение обратится в ноль и наоборот.

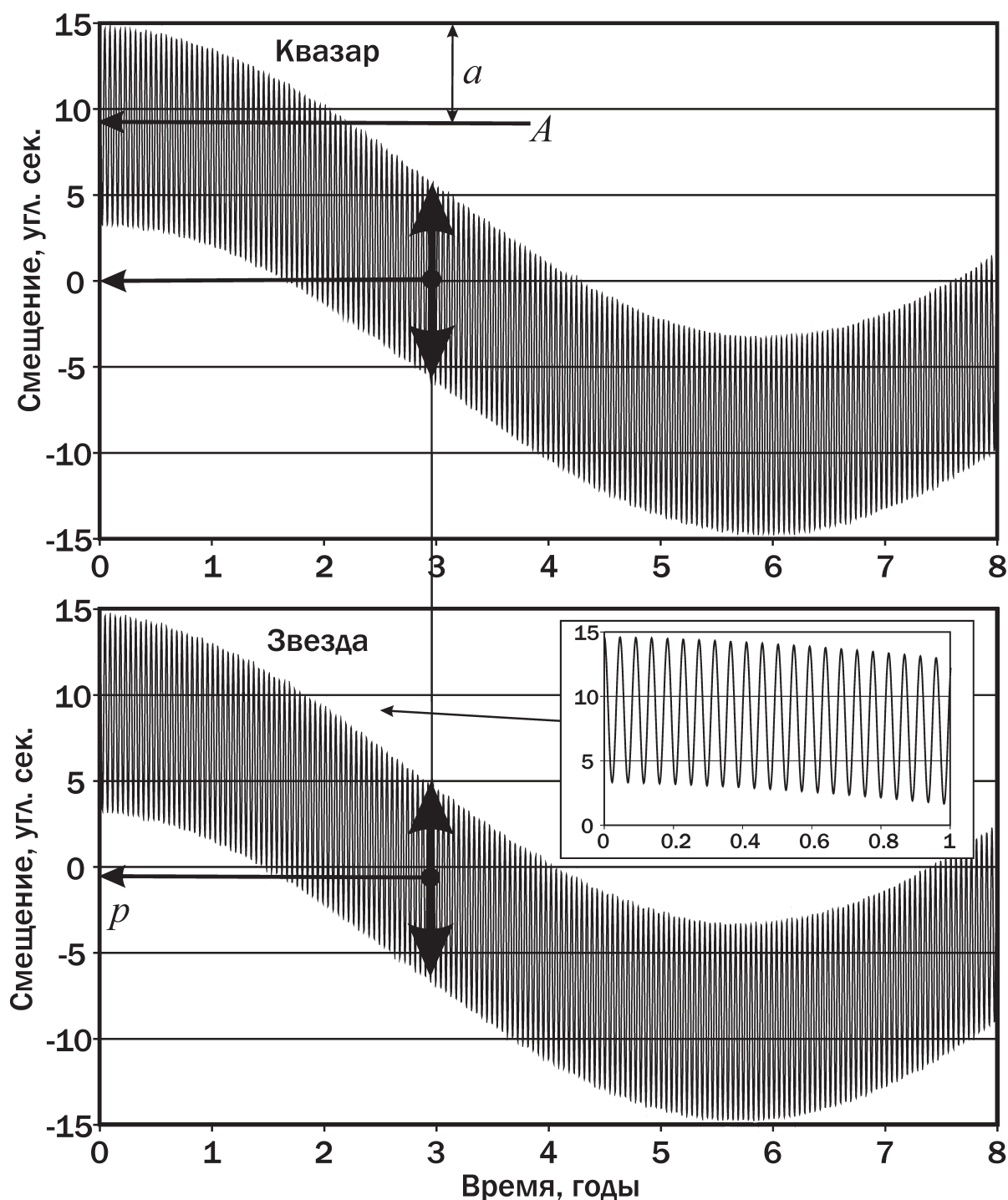
Объект может изменять свое положение в результате своего движения в пространстве (собственное движение) или своего вращения, если он входит в состав двойной или кратной системы. Если говорить о квазарах – активных ядрах далеких галактик – то они не могут иметь собственного движения, а также параллактического смещения, так как расстояние до них очень велико.

По условию задачи, квазар и звезда находятся на небе рядом друг с другом, а их смещение происходит только вдоль одного направления на небе. Собственное движение как у квазара, так и у звезды отсутствует, звезда не является двойной. Следовательно, мы наблюдаем лишь абберрацию и (только для звезды) параллактическое смещение, а движение наблюдателя происходит в плоскости, содержащей исследуемые объекты.

Смещение положения квазара может быть вызвано только абберрацией света. По графику мы видим долгопериодические изменения положения квазара, на которые накладываются быстрые вариации. По-видимому, движение наблюдателя

есть комбинация двух вращений с существенно разными периодами. Рассмотрим эти вращения по отдельности.

Аберрация, вызванная долгопериодическим вращением, имеет максимум вблизи момента $t=0$, примерно через 6 лет наступает максимальная аберрация света в противоположном направлении. Следовательно, наблюдатель участвует во вращении с периодом T около 12 лет. Очевидно, это вращение связано с планетой Юпитер, имеющей тот же орбитальный период. В этом можно убедиться следующим образом. Максимальная аберрация (усредненная по короткопериодическим колебаниям) A составляет около $9''$. Отсюда мы получаем величину орбитальной скорости:



$$V = c \frac{A''}{206265''},$$

что составляет около 13 км/с. Зная скорость и орбитальный период, мы находим радиус орбиты

$$R = \frac{V \cdot T}{2\pi}.$$

Радиус равен 5.2 а.е. Действительно, тело Солнечной системы, на котором построена обсерватория, вовлечено в движение вокруг Солнца по орбите Юпитера. Но если это был бы сам Юпитер (предположим на короткий момент, что у этой планеты могла быть твердая поверхность) или какой-либо астероид, вращающийся в устойчивой точке Лагранжа по орбите с тем же радиусом, мы бы не наблюдали короткопериодических вариаций. Очевидно, обсерватория находится не на самом Юпитере, а на его спутнике.

Из врезки на графике можно увидеть, что период вращения спутника составляет около 1/22 года или 16-17 суток. Подобный период имеет один из галилеевых спутников планеты, Каллисто. Это можно проверить аналогичным образом, определив радиус орбиты спутника. Максимальная абберрация света за счет короткопериодических вариаций, a , составляет 6'', соответствующая скорость v равна около 8.5-9 км/с, а радиус орбиты r – около 2 млн. км, что соответствует спутнику Каллисто.

Нам необходимо найти расстояние до звезды. График смещений звезды отличается от аналогичного графика для квазара наличием параллактического смещения. Оно заметно сказывается на форме долгопериодических смещений. На короткопериодических смещениях параллакс не сказывается, так как радиус орбиты Каллисто очень мал. Орбита Каллисто наклонена на малый угол к плоскости орбиты Юпитера, и абберационное смещение происходит вдоль того же направления на небе.

В моменты времени 0 лет и 6 лет, когда абберрация за счет движения Юпитера достигает максимумов (в разных направлениях), параллактическое смещение звезды обращается в ноль, и смещение звезды не отличается от смещения квазара. Возьмем момент времени около 3 лет, когда среднее (по короткопериодическим вариациям) значение смещения квазара обращается в ноль. Мы видим, что модуль аналогичной величины для звезды составляет около 1''. Это есть параллактическое смещение звезды. Отсюда мы можем получить расстояние до звезды:

$$L = \frac{R}{p}; \quad L(\text{пк}) = \frac{R(a.e.)}{p''} \approx 5.$$

В последней формуле было учтено, что 1 ПК содержит 206265 а.е. Итак, наблюдения велись со спутника Юпитера Каллисто, а расстояние до звезды равно 5 ПК.

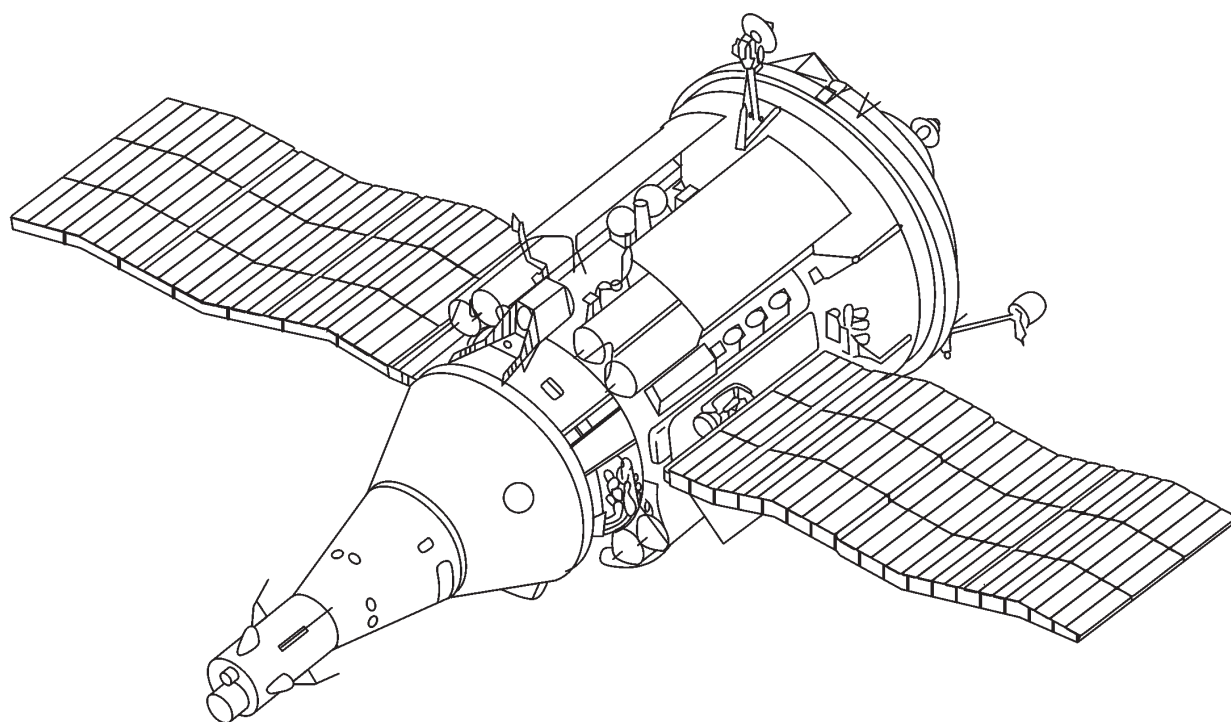
СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ТУР

9 класс.....	3
10 класс.....	12
11 класс.....	22

ПРАКТИЧЕСКИЙ ТУР

9 класс.....	32
10 класс.....	36
11 класс.....	41



ДЛЯ ЗАМЕТОК

