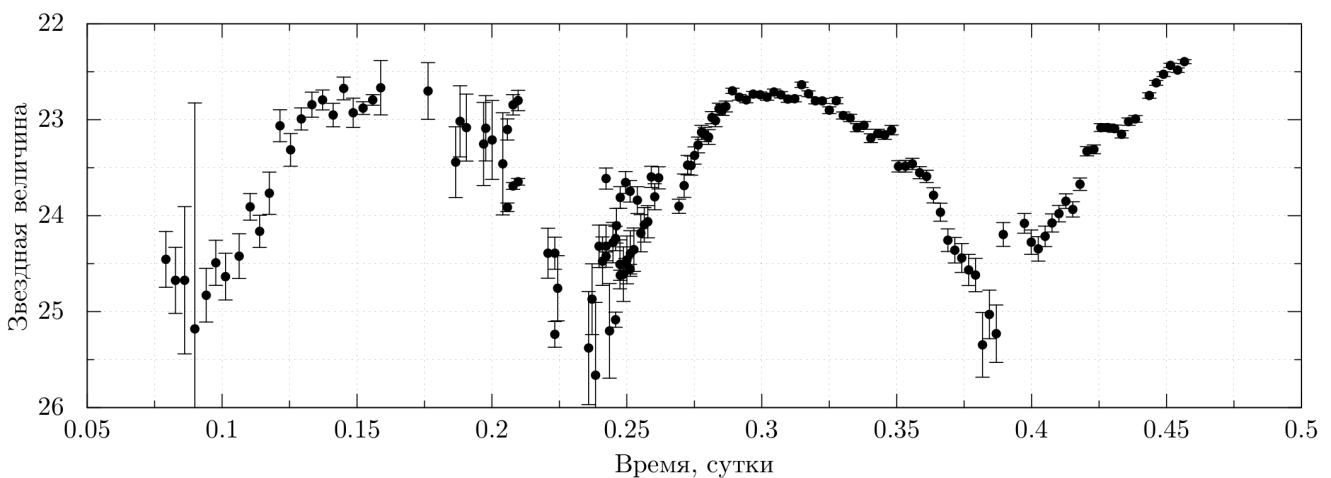
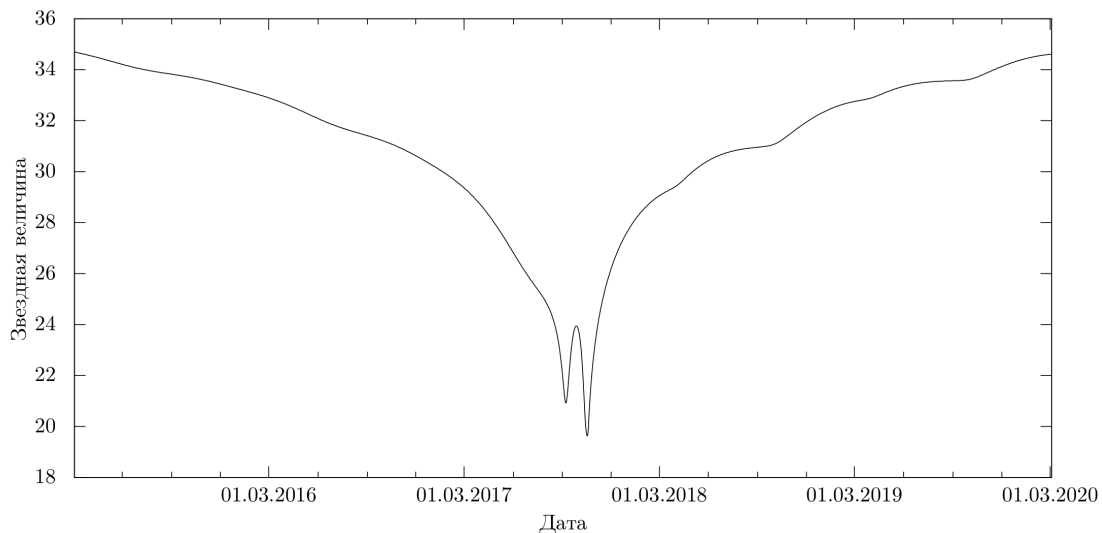


11 класс

Вам даны кривые блеска некоторого объекта, находящегося в Солнечной системе, полученные при наблюдениях с Земли. По оси ординат на обоих графиках отложена видимая звездная величина в оптическом диапазоне. Из фотометрических наблюдений объекта в системе $u'g'r'i'z$ известны его показатели цвета: $g - r = 0^m.85$, $g - i = 1^m.15$ и $g - z = 1^m.25$. Характерные длины волн полос в этой фотометрической системе равны: для полосы $g - 4750 \text{ \AA}$, $r - 6250 \text{ \AA}$, $i - 7700 \text{ \AA}$, $z - 10000 \text{ \AA}$. Известно, что в перигелии своей орбиты объект находился на расстоянии 0.25 а.е. от Солнца. Определите все параметры этого объекта и его орбиты, которые Вы сможете получить из приведенных данных.



Решение (20 баллов):

В условии сказано, что объект находится в Солнечной системе, поэтому очевидно, что это не звезда, следовательно, объект светит отраженным солнечным светом. По данным показателям цвета можно понять, что в сине-зеленой части оптического диапазона объект примерно

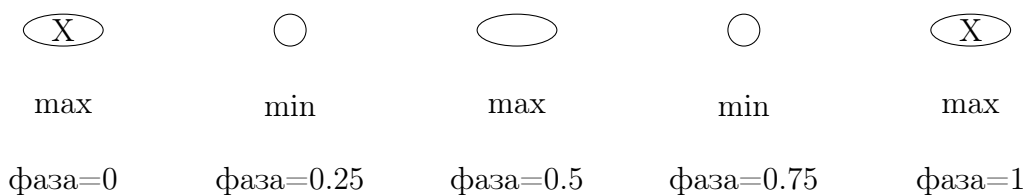
в 3 раза слабее, чем в далекой красной и ближней ИК. Следовательно, объект очень темный, т.е. его альbedo в видимой области мало (в противном случае спектр объекта примерно совпадал бы со спектром Солнца). Из этого факта сразу можно сделать предположение о природе объекта. Видимо, это скорее не ледяное, а каменное тело с малым коэффициентом отражения, подобно темным астероидам.

Из того, что в качестве характерной длины волны для полосы z даны 10000 \AA , а показатель цвета $g - z$ — наибольший из приведенных, не следует, что на длину волны 10000 \AA приходится максимум энергии в спектре объекта. Показатели цвета непрерывно растут, и сказать по приведенным четырем (показатель $g - g = 0^m$, что очевидно) значениям растущей на заданном отрезке функции, где будет ее максимум, не представляется возможным. Тем более неправомерно оценивать температуру объекта, используя формулу смещения Вина с $\lambda_{max} = 10000 \text{ \AA}$, т.к. собственное тепловое излучение тела наверняка имеет максимум в гораздо более длинноволновой области. Если есть желание определить температуру объекта, то можно оценить ее, например, в перигелии его орбиты, как равновесную для такого расстояния от Солнца. Так как объект очень темный, то с хорошей точностью его можно считать абсолютно черным телом (альbedo равно 0). Тело получает от Солнца на единицу площади своей поверхности количество энергии, равное $L_{\odot}/4\pi r^2$, где L_{\odot} — светимость Солнца, а r — расстояние от Солнца до тела, а испускает с единицы площади своей поверхности количество энергии, равное σT^4 . Приравнявая энергии, выражая T , подставляя числа ($r = 0.25$ а.е.) и вычисляя, получаем оценку $T \approx 600 \text{ К}$. Эту оценку можно получить гораздо быстрее, если вспомнить, что равновесная температура на орбите Земли порядка 300 К (на самом деле, чуть меньше, около 280 К), а зависимость ее от расстояния от Солнца очевидным образом выглядит так: $T \propto 1/\sqrt{r}$. Таким образом максимум собственного теплового излучения тела лежит в области около 55 тыс. \AA .

По нижней кривой блеска можно понять, что объект меняет на очень коротком промежутке яркость примерно на $2^m.5$, причем периодически. Период изменений равен 3.6 часа. Очевидно, это не может быть из-за удаления от Солнца. Таким образом остается предположить, что эти изменения связаны с вращением объекта вокруг своей оси. Из разности звездных величин в разных фазах вращения получаем, что отношение яркостей двух сторон объекта достигает 10. Разные стороны объекта могут отражать разное количество света либо из-за разного альbedo, либо из-за разной площади (правда, возможно и сочетание этих двух факторов). Сложно представить себе движущийся рядом с Солнцем объект, который имел бы шарообразную форму и при этом состоял из 2-х половинок, альbedo которых различалось бы в 10 раз. Однако, если это так, то период вращения объекта равен периоду изменений блеска, 3.6 часа.

Если все же принять, что альbedo постоянно по всей поверхности, то изменения связаны с формой. Тогда площади сторон, «видимых» в максимуме и минимуме блеска различаются в 10 раз. В простом случае, когда объект представляет собой эллипсоид вращения, можно оценить отношение его малой и большой осей. В этом случае его максимальная площадь пропорциональна произведению максимального и минимального размера, а минимальная — квадрату минимального. Тем самым соотношение размеров 1:10.

Заметим, что если объект обладает вытянутой формой, то период его вращения в 2 раза больше, чем период изменения блеска, т.е. 7.2 часа. Проще всего показать это на рисунке. «Пометим» одну из длинных сторон объекта (X) и отметим на рисунке моменты максимумов (max) и минимумов (min) кривой блеска в разные фазы вращения:



Заметим также, что подобное изменение блеска нельзя объяснить тем, что объект двойной. Получить этот вывод можно, поняв, что в этом случае максимальный блеск объекта

станет меньше (поскольку окажется «не работающей» площадь между двумя компонентами), и для объяснения столь сильных изменений блеска все равно придется считать компоненты сильно вытянутыми (и ориентированными вдоль одной прямой), что менее вероятно, чем одиночный объект той же формы.

Рассмотрим 5-летнюю кривую блеска. По поведению кривой на краях очевидно, что объект ярчал и до 2015 года и продолжит терять яркость и после 2020 года. То есть движение объекта не обладает периодом в 5 лет. По длинной кривой блеска видно, что объект во второй половине 2017 года 2 раза приближался к Земле/Солнцу. Так как яркость объекта зависит от расстояний как от Солнца, так и до Земли, то можно считать, что один из пиков яркости соответствует минимальному расстоянию объекта от Солнца, а второй — минимальному расстоянию от объекта до Земли. Видно, что пики несимметричны, но для оценок их можно считать равными по величине. Минимальная звездная величина объекта, достигнутая в 2017 году, около $19^m.5$. Максимальная (в 2015 и в 2020) — около $34^m.5$. Разность около 15^m , что приводит к отношению освещенностей 10^6 . Если грубо оценить отношение освещенностей, как отношение расстояний в 4 степени, то получим, что расстояние до объекта изменится примерно в 30 раз, т.е. объект к 2020 году удалится далеко от Солнца (примерно на десяток а.е.). Оценим, насколько. Вблизи перигелия объект получает от Солнца на единицу площади количество энергии, равное $L_{\odot}/4\pi r_1^2$, где r_1 — расстояние от Солнца до объекта в перигелии, освещенность на Земле от объекта, находящегося в перигелии равна,

$$E_1 = \frac{SAL_{\odot}}{4\pi r_1^2 \cdot 4\pi r^2},$$

где S — площадь объекта, A — его альbedo, r — расстояние от объекта в перигелии до Земли. Вполне можно считать, что $r = 1$ а.е. Фазу можно считать полной, т.к. фазовый угол неизвестен.

В 2020 году объект будет далеко как от Солнца, так и от Земли, потому освещенность от него на Земле будет равна

$$E_2 \approx \frac{S \cdot A \cdot L_{\odot}}{4\pi r_2^4},$$

где r_2 — расстояние от Солнца до объекта в 2020 году. Так как $E_1/E_2 = 10^6$, преобразуя выражения и подставляя числа, после несложных расчетов получаем, что к 2020 году объект удалится от Солнца примерно на 15 а.е. Следовательно, примерно за 2.5 года объект пройдет около 15 а.е. Тем самым средняя скорость движения объекта составляет около $15/2.5 \approx 6$ а.е./год или чуть меньше 30 км/с.

Так как понятно, что вблизи перигелия скорость намного больше средней, то попытаемся оценить среднюю скорость на меньшем участке вблизи конца «видимой» нам траектории, где скорость меняется уже не так сильно. Для этого выберем участок кривой блеска, где звездная величина меняется приблизительно линейно. Это участок от 01.03.2018 до 01.03.2020. На нем звездная величина меняется примерно на 5, следовательно, отношение освещенностей равно примерно 100, тогда отношение расстояний с хорошей точностью можно оценить как $\sqrt[4]{100} \approx 3$. Стало быть на этом участке кривой блеска расстояние от объекта до Солнца/Земли будет от 5 до 15 а.е., т.е. за 2 года объект пройдет 10 а.е., таким образом на этом участке его средняя скорость будет равна 5 а.е./год. Посмотрим, как эта скорость соотносится с кеплеровскими скоростями в Солнечной системе. Круговая скорость на расстоянии 5 а.е. от Солнца равна $6.28/\sqrt{5}$ а.е., параболическая — $\sqrt{2} \cdot 6.28/\sqrt{5} = 6.28/\sqrt{2.5} \approx 4$ а.е./год. Таким образом, средняя скорость движения объекта на большом участке от 5 до 15 а.е. превышает параболическую на расстоянии 5 а.е. от Солнца. Следует сделать вывод, что объект движется по гиперболической орбите и, следовательно, если это не явилось следствием близкого сближения с какой-либо планетой, то объект почти наверняка не принадлежит Солнечной системе.

Можно попробовать оценить размеры объекта, сравнив его звездную величину в перигелии с Солнцем: $m_{\odot} - m = -2.5 \lg E_{\odot}/E$. Освещенность от Солнца на Земле $E_{\odot} = L/4\pi r_{\odot}^2$, где $r_{\odot} = 1$ а.е., $m_{\odot} = -27$, можно принять, что $m = 20$. Тогда, подставляя числа в выражение для освещенности, создаваемой объектом в перигелии, получаем, что $S \cdot A \approx 10^3$ м². Если альbedo принять равным $A = 0.1$ (нормальное «каменное» альbedo, чуть меньше, чем у Луны),

то $S \approx 10^4 \text{ м}^2$. Будем считать, что видна бóльшая сторона объекта. Тогда размеры его составляют порядка $200 \times 20 \text{ м}$. Если же принять альbedo равным порядка $A = 0.01$ (как у сажи), то $S \approx 10^5 \text{ м}^2$, а размеры порядка $500 \times 50 \text{ м}$.

Осталось отметить, что прототипом объекта из задачи послужил 1П/Оумуамуа — первый надежно подтвержденный межзвездный астероид, пролетающий сквозь Солнечную систему.