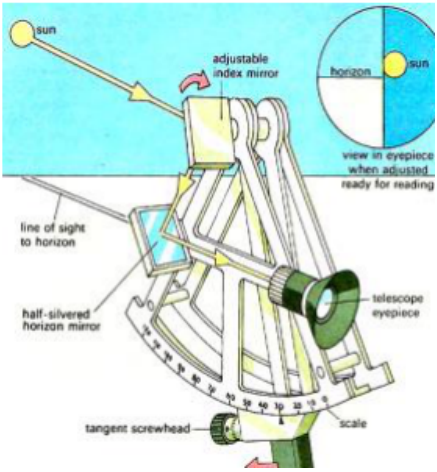
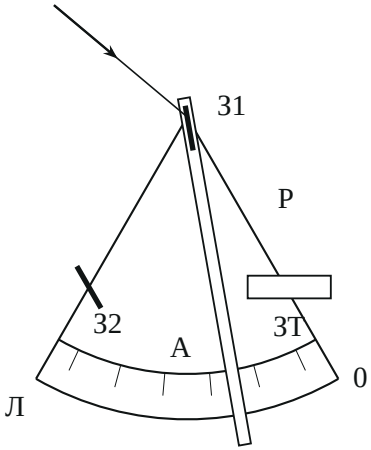
Секстант

Задача 1. [ИОШ 2015/16, 11 класс, задача 1] Для измерения угла склонения звезды или планеты над горизонтом используется секстант, идею которого предложил И. Ньютон. Измерения угла склонения с помощью секстанта можно провести и на палубе корабля в сильный шторм. Секстант состоит из неподвижной рамы Р с лимбом Л и нанесённой на нём угловой шкалой (образующей 1/6 полного угла — отсюда название прибора), подвижной радиальной планки (алидады) — А, имеющей шарнирное крепление в центре рамы, жёстко связанного с алидадой в центре секстанта зеркала 31, полупрозрачного неподвижного зеркала 32, параллельного нулевому отсчёту шкалы лимба — 0, зрительной трубы ЗТ. Посмотрите на рисунки и опишите, как с помощью секстанта можно измерить угол склонения планеты над горизонтом. Что нужно измерять, чтобы найти угол склонения планеты? Почему шторм «не мешает» проводить измерения с помощью секстанта?

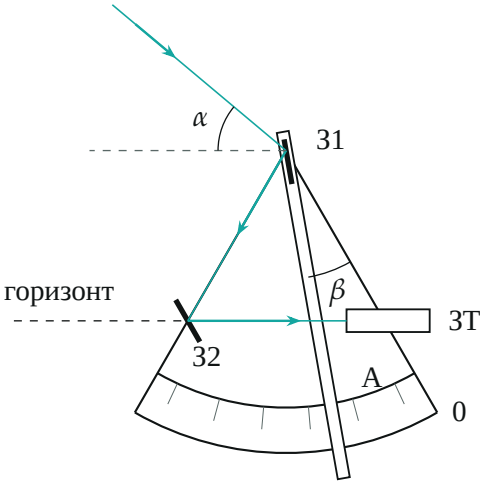




▲ **Решение. Что происходит.** В трубу одновременно видны два изображения: горизонт — прямо, сквозь полупрозрачное зеркало 32, и звезда — после двух отражений, от 31 и от 32. Наблюдатель поворачивает алидаду, пока звезда не «сядет» на линию горизонта. Главная идея: два последовательных отражения поворачивают луч на удвоенный угол между зеркалами, и этот поворот не зависит от того, как наклонён сам прибор. Задача на закон отражения и геометрию лучей.

Обозначения. α — угол склонения звезды над горизонтом; β — угол между алидадой и нулевым отсчётом шкалы (он же угол между зеркалами 31 и 32: 31 жёстко связано с алидадой, 32 параллельно нулевому отсчёту); направление луча задаём углом с горизонталью, отсчитанным против часовой стрелки.

1. Ход лучей. Свет звезды падает на зеркало 31 в центре секстанта, отражается вдоль рамы к зеркалу 32, отражается от него и идёт в зрительную трубу. Свет от горизонта проходит в трубу сквозь 32 напрямую. Звезда «стоит на горизонте» в трубе, когда оба пучка входят в трубу в одном направлении — параллельно.



Ход лучей: свет звезды (бирюзовый) падает на 31 под углом α к горизонту, после 31 и 32 идёт в трубу параллельно линии горизонта (пунктир). Угол β — между алидадой и нулевым отсчётом.

2. Одно отражение. По закону отражения угол падения равен углу отражения. Если зеркало направлено под углом θ к горизонтали, а падающий луч — под углом φ, то отражённый идёт под углом

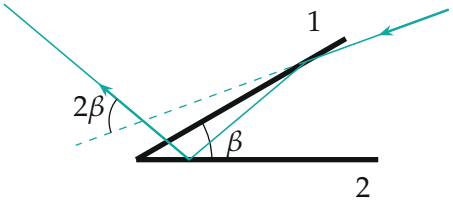
$$\varphi' = 2\theta - \varphi :$$

зеркальная линия — биссектриса угла между продолжением падающего луча и отражённым, поэтому $\theta - \varphi = \varphi' - \theta$.

3. Два отражения. После зеркала 31 (угол θ_1) и 32 (угол θ_2):

$$\varphi'' = 2\theta_2 - \varphi' = 2\theta_2 - (2\theta_1 - \varphi) = \varphi + 2(\theta_2 - \theta_1).$$

Луч повернулся на угол $2(\theta_2 - \theta_1)$ — удвоенный угол между зеркалами, и этот поворот не зависит от направления падающего луча φ.



Два зеркала под углом β: луч после двух отражений отклоняется от первоначального направления на 2β при любом угле падения.

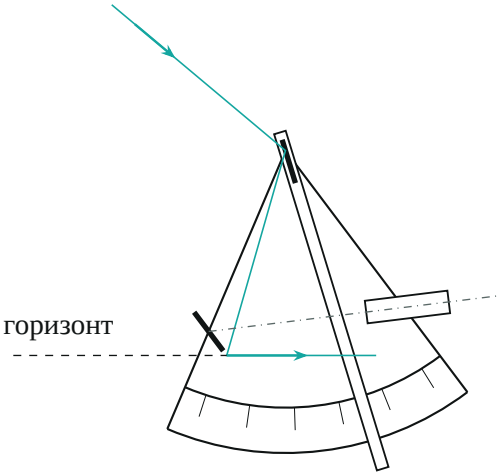
4. Угол склонения. Угол между зеркалами 31 и 32 равен β. Луч звезды после двух отражений идёт параллельно лучу от горизонта, то есть свет звезды повёрнут на 2β относительно направления на горизонт. Значит, звезда видна под углом 2β над горизонтом:

$$\alpha = 2\beta.$$

Проверка на нуле: при $\beta = 0$ зеркала параллельны, луч после двух отражений идёт параллельно падающему — в трубе совпадают изображения горизонта и предмета на горизонте, $\alpha = 0$.

5. Как измерять. Направляем трубу на горизонт так, чтобы его линия была видна сквозь 32. Плавно поворачиваем алидаду, пока изображение звезды, отражённое зеркалами 31 и 32, не сядет точно на линию горизонта. Отсчитываем по шкале лимба угол β между алидадой и нулевым отсчётом; угол склонения $\alpha = 2\beta$. Шкала охватывает $60°$, а измерить так можно углы до $120°$; поэтому на настоящих секстантах деления шкалы подписаны сразу удвоенными значениями — отсчёт даёт α.

6. Почему шторм не мешает. При качке весь секстант поворачивается в своей плоскости на какой-то угол δ. Оба зеркала поворачиваются вместе, угол между ними остаётся β, и по п. 3 луч звезды после двух отражений по-прежнему повёрнут на 2β относительно падающего, то есть идёт строго горизонтально — параллельно лучу от горизонта. В поле зрения трубы оба изображения смещаются вместе, звезда остаётся на линии горизонта. Нужно лишь ловить моменты, когда горизонт виден в трубе.



Секстант при качке повёрнут на 7° (ось трубы — штрихпунктир наклонна), а луч звезды после двух зеркал всё равно горизонтален и совпадает с лучом от горизонта.

Обратите внимание. Измеряется не угол между алидадой и горизонтом, а угол между алидадой и нулевым отсчётом — внутренний угол прибора; поэтому его положение относительно горизонта и не важно. Угол склонения вдвое больше отсчёта: зеркало, повёрнутое на β, поворачивает отражённый луч на 2β.

Проверка. Второй способ — через треугольники, образованные лучами и зеркалами (так в решении организаторов). Ось трубы горизонтальна, а рама образует угол 60°, поэтому все углы, которые луч к трубе образует с зеркалом 32 и со стороной рамы, равны 60°. Пусть δ — угол между 31 и лучом 3132 (по закону отражения он же — между 31 и продолжением падающего луча). Из треугольника, образованного 31, 32 и точкой пересечения прямых 32 и алидады: $120^\circ + \beta + \delta = 180^\circ$. Из треугольника, образованного лучом звезды, лучом 3132 и горизонталью: $60^\circ + 2\delta + \alpha = 180^\circ$. Исключая δ: $\alpha = 120^\circ - 2(60^\circ - \beta) = 2\beta$ — то же.

Ответ. Совмещают в трубе изображение планеты (после зеркал 31 и 32) с линией горизонта и измеряют угол β между алидадой и нулевым отсчётом; $\alpha = 2\beta$. Шторм не мешает: два зеркала поворачивают луч на 2β при любом наклоне прибора, изображения планеты и горизонта смещаются вместе.