§5.3. Секстан

Краткая теория и устройство навигационного секстана

Для решения полярного треугольника необходимо знать любые три его элемента. Одним из этих элементов является высота светила.

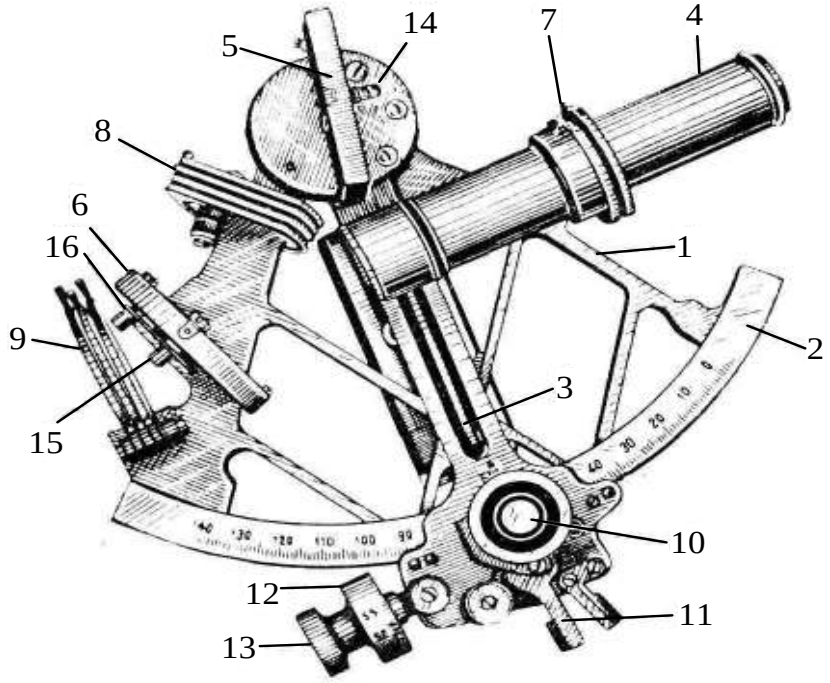


Рис. 5.3

1 – рама секстана, 2 – лимб, 3 – алидада, 4 – зрительная труба, 5 – большое зеркало, 6 – малое зеркало, 7 – обойма зрительной трубы, 8 – светофильтры большого зеркала, 9 – светофильтры малого зеркала, 10 – лупа, 11 – рычаги зажима алидады, 12 – отсчетный барабан, 13 – головка тангенциального винта, 14 – исправительный винт большого зеркала, 15 – исправительный винт малого зеркала, 16 – исправительный винт для изменения величины поправки индекса.

Для измерения высоты в береговых условиях применяется универсальный инструмент, устанавливаемый неподвижно на какое-либо основание. В условиях судна универсальный инструмент применить невозможно.

Наиболее удобным типом морского угломерного инструмента является *секстан*, получивший свое название от размера основной

части инструмента – дуги сектора равной $\frac{1}{6}$ части полной окружности.

Секстан – переносной угломерный инструмент отражательного типа. К инструментам отражательного типа относятся приборы, в оптическую систему которых введены зеркала или призмы, служащие для отражения лучей идущих от наблюдаемых предметов.

Идея устройства секстана впервые была высказана Исааком Ньютоном в 1699 г., но его записки, содержащие описание и чертеж октана, были опубликованы лишь в 1742 г. В 1730-1731 гг. такой прибор был сконструирован, независимо друг от друга, Дж.Гадлеем (Англия) и Т.Годфреем (США). Первые угломерные инструменты имели дугу сектора, равную $\frac{1}{8}$ части окружности, и назывались октанами («окто» по-гречески – восемь). Октан позволял измерять углы до 90º. В дальнейшем англичанин Рамсден усовершенствовал октан, увеличив угломерную дугу с 45º до 60º.

Навигационный секстан служит для измерения:

1. Высоты небесных светил для определения места судна в море астрономическими методами.
2. Горизонтальных углов между видимыми с судна земными предметами для определения места судна по двум углам или углу и пеленгу.
3. Вертикальных углов для определения расстояния до предмета, высота которого известна.

Устройство и принцип действия секстана основаны на следующих законах оптики:

1. Угол падения луча на плоское зеркало равен углу отражения.
2. Лучи падающий и отраженный находятся в одной плоскости с перпендикуляром к плоскости зеркала, восстановленным в точке падения луча.

Предположим, что глазу наблюдателя, расположенному в точке *O* (рис. 5.4), предметы *A* и *B* представляются под углом *AOB* = *h*. Для измерения этого угла на пути луча *AO* устанавливают перпендикулярно к плоскости чертежа большое зеркало cc_1, а на линии *BO* помещают малое зеркало dd_1. Луч света AC сначала падает на зеркало cc_1 в точку *C* под углом α к нормали и после отражения под тем же углом пойдет по направлению *CD*. В точке D луч *CD* встречает второе зеркало dd_1 под углом β к нормали, отразившись от зеркала под тем же углом луч пойдет по направлению *DO* и попадет в глаз наблюдателя. Таким образом, глаз наблюдателя, помещенный в точку *O*, увидит предметы *A* и *B* по одному и тому же направлению *BO*: предмет A после двукратного отражения от двух зеркал, а предмет B поверх малого зеркала dd_1.

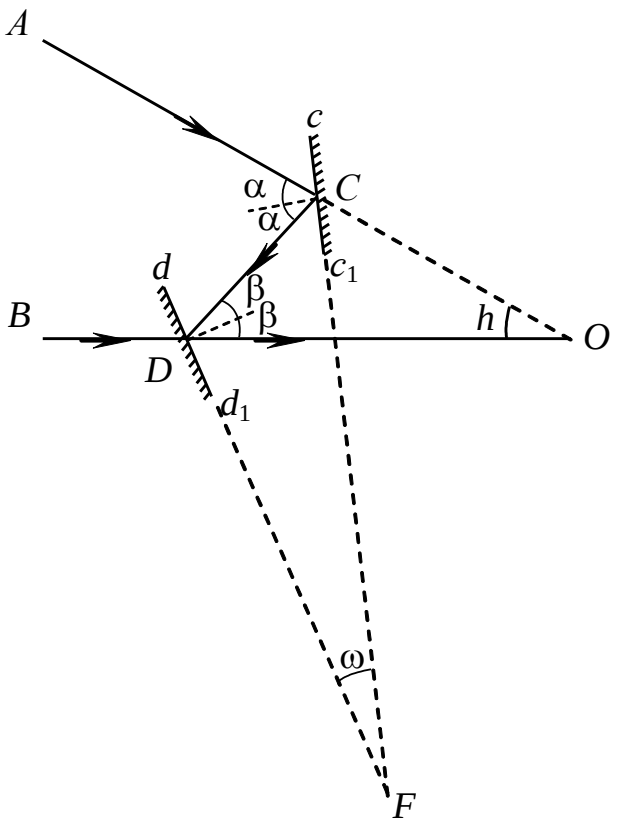


Рис. 5.4

Угол, между продолжениями плоскостей обоих зеркал, обозначают буквой ω.

Определим соотношение между углами *h* и ω.

Рассмотрим треугольник *COD*, в котором внешний угол *CDB* равен сумме двух внутренних углов, не смежных с ним

$$\angle CDB = \angle OCD + \angle COD$$

или

$$2(90° - \beta) = 2(90° - \alpha) + h,$$

откуда

$$h = 2(\alpha - \beta).$$

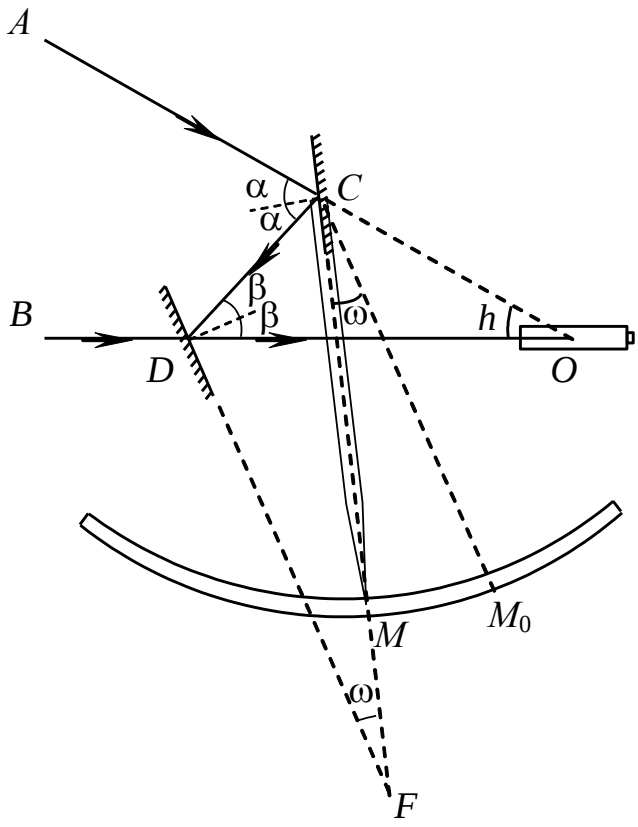


Рис. 5.5

Из треугольника *CDF* имеем

$$\angle dDC = \angle DCF + \angle CFD$$

или

$$90° - \beta = 90° - \alpha + \omega,$$

откуда

$$\omega = \alpha - \beta.$$

Сопоставляя формулы для h и ω, получаем

$$h = 2\omega.$$

Таким образом, измеряемый угол между предметами h равен удвоенному углу между зеркалами ω. Следовательно, измерение угла h сводится к измерению угла ω, когда прямовидимое и дважды отраженное изображения предметов находятся в совмещении. В этом и состоит краткая теория угломерного инструмента, которая лежит в основе устройства секстана.

Принцип измерения угла ω показан на рис 5.5. Малое зеркало укрепляется на раме секстана неподвижно, а большое зеркало устанавливается на алидаде, ось вращения которой совпадает с центром делений лимба. Для повышения точности совмещения изображений предметов *A* и *B* на раме секстана устанавливается зрительная труба, оптическая ось которой параллельна плоскости

лимба.

Проведем через центр вращения алидады прямую CM_0 параллельно плоскости малого зеркала. Эта прямая представляет начальное положение алидады, при котором $\angle DFC = \angle MCM_0 = \omega$. Измерение угла ω между зеркалами производится при помощи лимба, на верхней плоскости которого нанесены градусные деления.

Чтобы измерить угол между предметами *A* и *B*, необходимо плоскость лимба расположить в плоскости измеряемого угла *AOB*. Направив трубу секстана на прямовидимый объект *B*, перемещают алидаду в сторону увеличения отсчетов до тех пор, пока в поле зрения трубы не появится дважды отраженное изображение предмета *A*. Затем добиваются точного совмещения дважды отраженного предмета *A* с прямовидимым *B*. При этом алидада займет положение *CM*, а дуга MM_0 даст величину угла наклона большого зеркала ω, удвоив который, получают угол *h* между предметами *A* и *B*. Чтобы каждый раз не удваивать угол ω, при оцифровке делений лимба каждое полуградусное деление принимают за градусное. Поэтому отсчет *M* по лимбу сразу дает величину измеряемого угла $h = 2\omega$.

Место нуля на лимбе

При измерении углов между предметами каждый раз требуется определять начальное положение алидады, от которого отсчитываются углы поворота большого зеркала или измеряемые углы $h = 2\omega$.

Предположим, что при помощи секстана наблюдается предмет *A* (рис. 5.6), бесконечно удаленный от наблюдателя. В этом случае луч *AC*, падающий на большое зеркало *C*, и луч *AD* падающий через прозрачную часть малого зеркала *D* в глаз наблюдателя *O*, будут располагаться параллельно друг другу. Очевидно, при совмещении прямовидимого и дважды отраженного изображений одного и того же предмета *A* подвижное большое зеркало *C*

расположится параллельно по отношению к неподвижному малому зеркалу D ($\alpha = \beta$). В этом случае индекс алидады расположится против отсчета M_0 и измеряемый угол окажется равным

$$h = 2\omega = 2(\alpha - \beta) = 0.$$

Отсчет секстана M_0, соответствующий параллельному положению зеркал, называется *местом нуля на лимбе*.

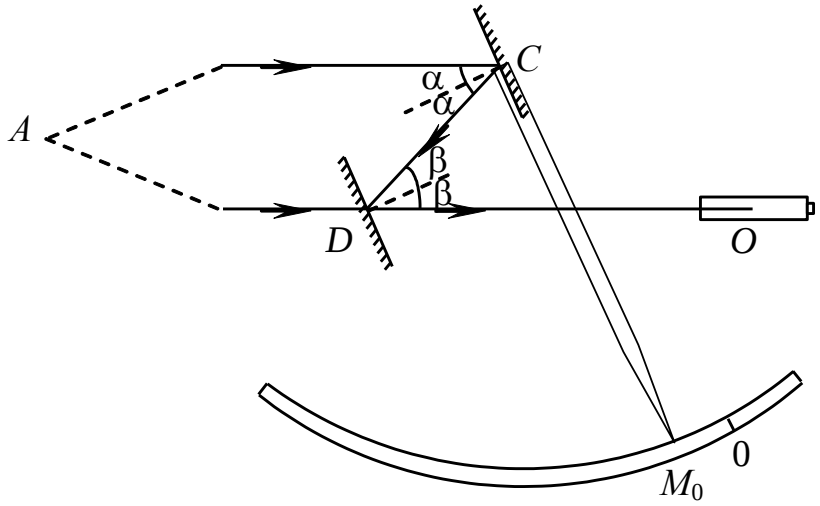


Рис. 5.6

Поправка индекса и ее определение

При изготовлении секстана нулевое деление на лимбе наносится в том месте, где устанавливается индекс алидады при параллельном положении зеркал. Но вследствие технических неточностей нулевое деление лимба, нанесенное при изготовлении, как правило, не соответствует положению индекса алидады при параллельном положении зеркал. Место нуля может располагаться как справа, так и слева от нулевого деления. Величина дуги лимба между отсчетам, полученным совмещением прямовидимого и дважды отраженного изображений одного и того же предмета, и нулевым делением лимба называется *поправкой индекса* i.

Поправка индекса может быть отрицательной, если индекс

алидады остановился слева от деления нуля на лимбе, и положительной, если индекс алидады – справа.

Поправка индекса определяется перед каждыми наблюдениями по отдаленному предмету путем совмещения его прямовидимого изображения с дважды отраженным изображением. В качестве отдаленного предмета может выступать звезда, Солнце и видимый морской горизонт, а также любой другой земной предмет, если он удален на расстояние более 1 мили.

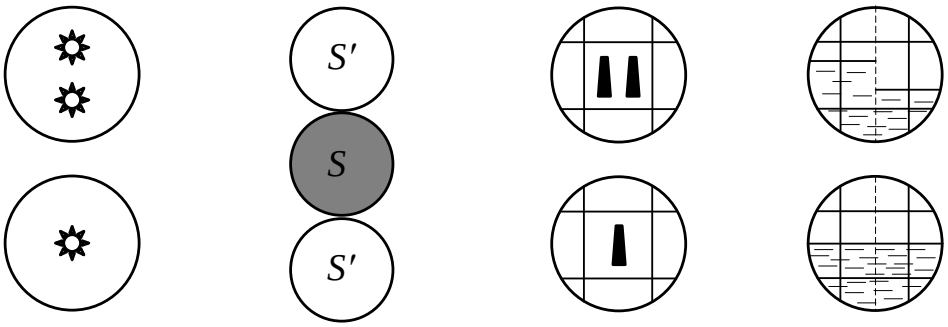


Рис. 5.7

Поправку индекса при ночных астрономических наблюдениях определяют **по звезде**. Ставят алидаду секстана на нулевое деление лимба и закрепляют алидаду зажимным винтом. После этого, удерживая секстан в вертикальной плоскости, наводят его на какую либо звезду. В поле зрения окажутся прямовидимое и дважды отраженное изображения наблюдаемой звезды (рис. 5.7 *а*). Не теряя их из поля зрения, движением микрометрического винта их сводят вместе. После чего замечают отсчет индекса *oi* по лимбу и вычисляют поправку индекса *i* по формуле

$$i = 360° - oi.$$

Точнее всего поправка индекса определяется **по Солнцу**. При определении *i* по Солнцу невозможно точно совместить прямовидимое и дважды отраженное изображения дисков светила. Поэтому поступают следующим образом: наводят трубу секстана на Солнце *S* и микрометрическим винтом подводят в

соприкосновение края прямовидимого S и дважды отраженного S' изображений Солнца, беря отсчет индекса oi_1 по лимбу (рис. 5.7 *б*). Затем, вращая микрометрический винт, переводят дважды отраженное S' изображение Солнца через прямовидимое S изображение и снова приводят оба диска в соприкосновение, замечая отсчет индекса oi_2 по лимбу. Полученные отсчеты дают возможность рассчитать видимый полудиаметр светила

$$R = \frac{oi_2 - oi_1}{4}$$

и сравнивают его с полудиаметром указанным на данный день в МАЕ.

Если расхождение между полудиаметрами, полученным в ходе наблюдения и указанным в МАЕ, не превышает 0,2′, то можно определять поправку индекса. Поправку индекса по Солнцу определяют по следующей формуле

$$i = 360° - \frac{oi_1 + oi_2}{2}.$$

Определения поправки индекса **по береговому предмету** применяются при измерении углов меду береговыми ориентирами (например, для определения места судна по двум горизонтальным углам). Для этого необходимо совместить дважды отраженное изображение с прямовидимым изображением (рис. 5.7 *в*), и снять с лимба отсчет индекса *oi*. Поправку индекса *i* определяют по той же формуле, что и для определения поправки индекса по звезде.

Когда расстояние до предмета менее 1 мили, определение поправки индекса можно производить **по видимому горизонту.** Устанавливают алидаду на нулевое деление лимба, наводят трубу секстана на видимый горизонт, располагая плоскость лимба в вертикальной плоскости. В поле зрения обнаружатся изображения видимого горизонта, смещенные относительно друг друга (рис. 5.7 *г*). Вращением микрометрического винта дважды отраженную и

прямовидимую части горизонта совмещают так, чтобы одно изображение служило продолжением другого. Затем снимают отсчет индекса *oi* по лимбу и вычисляют поправку индекса по формуле для определения поправки индекса по звезде.

Инструментальные погрешности секстана

Вследствие несовершенства изготовления отдельных частей секстана и неточности сборки его конструктивных узлов, измеряемые секстаном углы содержат систематические погрешности, (подробнее систематические погрешности будут рассматриваться в §6.4).

Наиболее заметные систематические ошибки у секстана:

1. Несовпадение оси вращения алидады с центром дуги лимба – *эксцентриситет алидады*.
2. Призматичность большого зеркала.
3. Систематические ошибки делений лимба.
4. Призматичность светофильтров большого и малого зеркал.

Перечисленные причины вызывают появление накладывающихся друг на друга погрешностей, которые в итоге проявляются в виде систематических ошибок в измеряемых секстаном иглах. Создаваемые этими причинами погрешности зависят от величины измеряемых углов; некоторые из этих причин вызывают ошибки, увеличивающиеся с возрастанием углов, а друге – уменьшаются три том же условии.

Для выяснения совокупного действия систематических ошибок на измеряемые секстаном углы каждый секстан подвергают лабораторным исследованиям. Результаты исследования помещают в аттестат секстана, куда вносят значения инструментальных погрешностей *s* секстана в виде постоянных поправок вычисленные для углов кратных 10°.

§5.4. Выверка секстана в судовых условиях

Проверка параллельности оптической оси трубы плоскости лимба

Закрепив трубу на раме, секстан устанавливают не неподвижное горизонтальное основание. Затем по краям лимба ставят диоптры так, чтобы их вертикальные плоскости были перпендикулярны оси трубы. Наблюдая вдоль горизонтальных срезов диоптров, выбирают какой-либо предмет, удаленный на 40-50 м.

Если ось трубы параллельна плоскости лимба, то предмет будет виден в середине горизонтальных им вертикальных нитей оптической трубы. Если ось трубы не параллельна плоскости лимба, то предмет будет виден в верхней или нижней части поля зрения трубы. Для исправления не параллельности оптической оси вращают исправительные винты в обойме зрительной трубы.

Проверка перпендикулярности большого зеркала к плоскости лимба

Алидаду секстана ставят на отсчет 30-35° и закрепляют. По обе стороны алидады устанавливают на лимбе по одному диоптру. Затем под углом 20-30° с расстояния 20-30 см смотрят в большое зеркало и передвигают оба диоптра вдоль дуги лимба до тех пор, пока диоптр, стоящий слева, не будет виден помимо зеркала, а второй диоптр, стоящий справа, можно будет видеть тем же глазом в большом зеркале. Если при этом линии верхних срезов прямовидимого и отраженного диоптров будут казаться продолжением одна другой, то, следовательно, зеркало установлено правильно, т.е. перпендикулярно к плоскости лимба. Если же линии верхних срезов не являются продолжением одна другой, то это свидетельствует о том, что большое зеркало неперпендикулярное к плоскости лимба. В последнем случае вращением исправительного винта, расположенного позади большого зеркала, добиваются

полного совмещения линий верхних срезов обоих диоптров.

Проверка перпендикулярности малого зеркала к плоскости лимба

Поставив алидаду на нулевое деление лимба, наводят зрительную трубу на отдаленный предмет (звезду – ночью, Солнце – днем). В поле зрения наблюдатель увидит два изображения: прямовидимое и дважды отраженное. Вращая отсчетный барабан, перемещают дважды отраженное изображение через прямовидимое изображение.

Если при этом дважды отраженное изображение полностью перекроет прямовидимое, то малое зеркало перпендикулярно к плоскости лимба. При наличии наклона малого зеркала к плоскости лимба дважды отраженное изображение светила не будет перекрывать прямовидимое. Для устранения этой погрешности надо с помощью отсчетного барабана оба изображения привести на кратчайшее расстояние друг к другу и, вращая исправительный винт малого зеркала, добиваются совмещения изображений.

Уменьшение поправки индекса

При исправлении отсчетов секстана удобно иметь поправку индекса небольшой, желательно чтобы она не превышала 6′. Изменение значения величины поправки индекса достигается вращением малого зеркала вокруг оси, перпендикулярной к плоскости лимба. Для уменьшения поправки индекса необходимо установить алидаду на нулевое значение лимба и навести зрительную трубу секстана на Солнце или звезду, отдаленный земной предмет или видимый горизонт. Затем вращают исправительный винт для изменения величины поправки индекса, добиваясь совмещения прямовидимого и дважды отраженного изображений. После этого необходимо проверить перпендикулярность малого зеркала к плоскости лимба и

определить поправку одним из способов указанных в §5.3.

§5.5. Измерение секстаном высот светил и углов между береговыми ориентирами

Измерение высоты светила или угла между береговыми предметами сводится к точному совмещению дважды отраженного изображения светила (предмета) с прямовидимым горизонтом (предметом) и взятию отсчета по лимбу и барабану секстана.

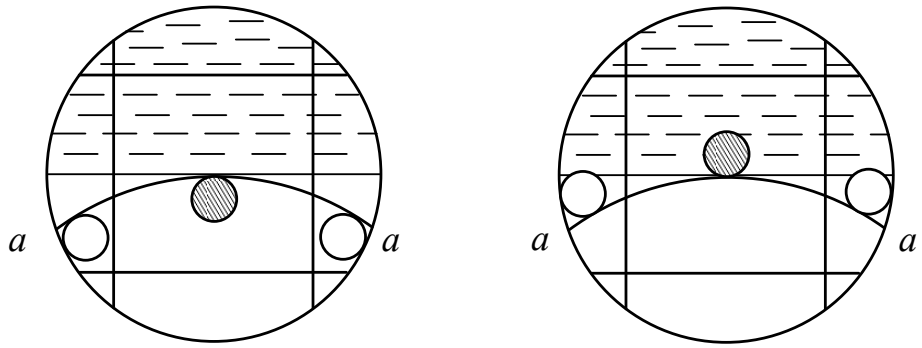
Перед началом определений необходимо приготовит секстан к наблюдениям. Это выполняют в следующем порядке:

1. Открывают ящик и отдают стопорный винт, вынимают секстан из ящика, беря его за раму.
2. Вставляют трубу и обращают внимание на правильное расположение сетки нитей в поле зрения трубы.
3. Определяют поправку индекса, если она оказывается большой ее необходимо уменьшить до нескольких минут; после чего заново проверить перпендикулярность малого зеркала и заново определить поправку индекса.

Измерение высот Солнца и Луны

При наблюдении Солнца или Луны всегда измеряют высоту нижнего или в некоторых случаях прибегают к измерению высоты верхнего края диска светил. При измерении высоты нижнего края отраженное изображение светила проектируется на небо (рис. 5.8 а), а в случае измерения высоты верхнего края светило располагается на фоне воды (рис. 5.8 б).

Изображение диска Солнца на фоне неба более отчетливо.



а *б*

Рис. 5.8

Оценивают на глаз высоту светила и устанавливают алидаду на отсчет приближенной высоты. Затем располагают плоскость секстана в плоскости вертикала Солнца и направляют трубу на ту часть горизонта, которая располагается под светилом. Не теряя из поля зрения изображение горизонта, перемещают алидаду от руки около приближенного отсчета высоты и одновременно покачивают секстан вокруг оси трубы, пока в поле зрения не появится дважды отраженное изображение Солнца. Вследствие покачивания секстана вокруг оси трубы изображение Солнца описывает дугу *аа* (рис. 5.8 *а* и *б*), симметричную относительно вертикала светила. В связи с тем, что высота Солнца непрерывно изменяется, линия *аа* представляется направлением сверху вниз.

Приведя нужный край светила как можно ближе к горизонту, отпускают рычаги зажима алидады и начинают вращать тангенциальный винт до тех пор, пока изображение края диска Солнца не соприкоснется с горизонтом. Как только край Солнца коснется горизонта, замечают время по хронометру и берут отсчет по лимбу и отсчетному барабану секстана.

Данный прием определения высоты используется при наблюдении Солнца вблизи меридиана или на меридиане, когда высота Солнца меняется очень медленно.

При наблюдениях Солнца в произвольных азимутах используют другой прием. Выставляют алидаду на глаз, и выжидают пока Солнце само придет на горизонт и коснется его соответствующим краем. В этом случае вращением барабана край Солнца надо предварительно «притопить» в воду, если высота измеряется до полудня, или поднять его над водой, если высота определяется после полудня. Затем, не трогая отсчетного барабана, слегка покачивают секстан вокруг оси и перемещают трубу по горизонту так, чтобы Солнце не выходило за пределы поля зрения, и как только Солнце коснется горизонта, замечают время по хронометру и берут отсчет по лимбу и отсчетному барабану секстана.

Измерение высот Луны производится так же, как и высот Солнца.

Измерение высот звезд и планет

Наблюдения звезд производятся в период вечерних и утренних навигационных сумерек, когда морской горизонт еще хорошо виден и на небе появляется значительное количество ярких звезд и планет.

При измерении высот звезд применяют следующие три приема приведения дважды отраженного изображения наблюдаемой звезды к видимому горизонту.

I. Устанавливают алидаду на нулевое деление лимба и наводят зрительную трубу на выбранную звезду. В поле зрения будут видны прямовидимое и дважды отраженное изображение звезды. Затем, отжав рычаги зажима алидады, медленно наклоняют трубу к горизонту и одновременно левой рукой перемещают алидаду так, чтобы отраженное изображение звезды все время находилось в поле зрения. Когда в поле зрения трубы появится горизонт, необходимо закрепить алидаду, а затем вращением отсчетного барабана добиться более точного совмещения изображения светила с горизонтом. Снимают отсчет высоты звезды с алидады и отсчетного барабана.

II. При помощи звездного глобуса заранее определяют высоту выбранной звезды и устанавливают алидаду на отсчет этой высоты. В назначенный момент наводят зрительную трубу на видимую часть горизонта, которая располагается под светилом. Перемещая секстан по горизонту и покачивая его в плоскости вертикала светила, ожидают пока в поле зрения трубы не появится дважды отраженное изображение звезды, после чего снимают отсчет с алидады и отсчетного барабана.

III. Устанавливают алидаду на приближенный отсчет высоты и берут секстан в левую руку, держа его лимбом вверх и зеркалами в правую сторону. Принимая звезду за прямовидимый предмет, а горизонт за дважды отраженный, наводят трубу на светило и движением алидады приводят дважды отраженное изображение горизонта в совмещение с прямовидимым изображением звезды. Точное совмещение и отсчет высоты звезды производят обычным способом, принимая горизонт за прямовидимый предмет.

Измерение углов между береговыми ориентирами

При плавании в пределах видимости береговых ориентиров можно определять место судна по двум углам или углу и пеленгу. Для измерения углов между береговыми предметами необходимо расположить секстан в плоскости измеряемого угла и навести зрительную трубу на левый предмет. Левой рукой освободить рычаги зажима алидады и плавно перемещать алидаду до тех пор, пока в поле зрения трубы не появится дважды отраженное изображение правого предмета. Далее, застопорив алидаду, вращением отсчетного барабана привести оба изображения предметов в точное совмещение и взять отсчет по лимбу и отсчетному барабану.