

Небесная сфера. Основные понятия.

Небесной сферой называется вспомогательная сфера произвольного радиуса, к центру которой параллельно перенесены основные линии и плоскости наблюдателя и Земли, а так же направления на светила.

Положение светила на небесной сфере определяются при помощи системы координат.

Горизонтальная (горизонтная) система координат.

Привязана к наблюдателю, то есть является неподвижной относительно наблюдателя и перемещается вместе с ним (рис.1.).

Основное направление - *вертикаль* или *отвесная линия* $z-n$ определяется направлением силы тяжести в данной точке Земли.

Зенит z , *надир* n получаются при пересечении вертикали с небесной сферой.

Основные круги:

- *истинный горизонт* – большой круг на небесной сфере перпендикулярный отвесной линии, проходит через точки $NESW$;
- *меридиан наблюдателя* – проекция земного меридиана наблюдателя на небесную сферу. Проходит через точки z, n, N, S .

Координатная сетка:

- *вертикалы* – большие круги, проходящие через точки зенит и надир. Меридиан наблюдателя является так же и вертикалом;
- *альмукуантараты* – круги на небесной сфере перпендикулярные отвесной линии, то есть параллельные истинному горизонту.

Координаты:

- *Высота светила* h – дуга вертикала светила от истинного горизонта до места светила, измеряется от 0° до $\pm 90^\circ$, если высота меньше 0° она называется снижением $-h$.
- *Зенитное расстояние* z – дуга вертикала от зенита до места светила в пределах $0^\circ-180^\circ$, с высотой связана соотношением $z=90^\circ-h$.
- *Азимут* A – дуга истинного горизонта от меридиана наблюдателя до вертикала светила.

Применяют три системы счёта азимута:

- *Круговая* – считается в пределах $0^\circ-360^\circ$ от точки N в сторону точки E (O^{st}) до вертикала светила. Азимут совпадает с истинным пеленгом (ИП). $A = 46^\circ N$, $A = 354^\circ N$
- *Полукруговая* – считается в пределах $0^\circ-180^\circ$ от точки N в

северных широтах и S в южных в сторону E или W. Обычно используется в «ВАС-58», «МТ-75» (Азимут видимого восхода и захода Солнца), «МАЕ» (Азимут Полярной). $A = N 46^\circ E$, $A = N 154^\circ W$.

- *Четвертная* – считается в пределах 0° - 90° от ближайшей части меридиана наблюдателя до меридиана светила. Азимутальное кольцо звездного глобуса, «ТВА-57». $A = 46^\circ NE$, $A = 15^\circ NW$, $A = 66^\circ SE$, $A = N 87^\circ SW$.

Первая экваториальная система координат.

Основное направление – *ось мира* представляет собой линию параллельную земной оси проходящую через центр небесной сферы. Точки пересечения оси мира с небесной сферой называются полюсами мира P_N северным и P_S южным.

Основные круги:

- *Экватор* – большой круг перпендикулярный оси мира, проходит через точки QEQW.
- Меридиан наблюдателя.

Координатная сетка: *параллели и меридианы*.

Координаты:

- *Склонение δ* светила – дуга меридиана светила от небесного экватора до места светила. Считается 0° - 90° в сторону N или S.
- *Полярное расстояние Δ* – дуга меридиана светила от повышенного полюса до места светила, считаемая 0° - 90° . Со склонением связана соотношением $\Delta = 90^\circ - \delta$.
- *Часовой угол t* светила – дуга экватора от полуденной части меридиана наблюдателя до меридиана светила, считаемая в сторону точки W. В таком счёте угол называют вестовым или обыкновенным и наименование обычно не приписывают. Помимо этого применяют полукруговой счет часовых углов 0° - 180° в сторону к W или E (O^{st}). В «МАЕ» все углы вестовые.

$$t_m = t_{гр} \pm \lambda_{W}^E$$

Вторая экваториальная система координат.

Основное направление – *ось мира*.

Основные круги:

- Экватор.
- Меридиан точки Овна. *Точка Овна Υ* или точка весеннего равноденствия расположена в пересечении эклиптики с экватором.

Координатная сетка: *параллели и меридианы*.

Координаты:

- *Склонение δ светила.*
- *Полярное расстояние.*
- *Прямое восхождение α светила – дуга экватора Овна до меридиана светила, считаемая 0° - 360° в сторону обратную восточным часовым углам (против хода часовой стрелки).*
- *Звёздное дополнение τ светила - дуга экватора от т. Овна до меридиана светила, считаемая 0° - 360° в сторону восточных часовых углов. С прямым восхождением связана соотношением $\tau=360-\alpha$.*

Экваториальные координаты светил можно выбрать на любой момент из Морского Астрономического Ежегодника (МАЕ).

Связь между первой и второй экваториальными системами координат выражается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}t_m^Y &= t_m^* + \alpha^* \\t_m^* &= t_m^Y - \alpha^* \\t_m &= t_{гр} \pm \lambda_W^E\end{aligned}$$

Приближённое решение задач на небесной сфере.

Большинство задач мореходной астрономии связано с переходом от одной системы координат к другой, приближённо эти задачи проще всего решать при помощи построения небесной сферы (рис.1.).

Способы решения задач:

- графический – на рисунке сферы, точность 10° - 15° ;
- графический – на чертеже сферы, точность 1° - 2° ;
- механический – на модели сферы в виде звездного глобуса, точность $0,5^\circ$ - 1° ;
- аналитический – по формулам, точность по высоте $h - 0,1'$, по азимуту $A - 0,1^\circ$;
- табличный – с применением таблиц ТВА-57 и ВАС-58, точность по высоте $h - 0,1'$, по азимуту $A - 0,1^\circ$.

Построение проекции небесной сферы на меридиан наблюдателя.

Рисуем окружность меридиана наблюдателя.

Через центр окружности проводим вертикальную линию зенит-надир ($z-n$).

Через P_N, P_S и d проводим меридиан светила.

От точки d в сторону светила снимаем величину δ с наименованием.

Дано h и t , найти δ и A .

По небесному экватору от точки Q откладываем $t_{нк}$ в сторону своей части света, если t круговое, то в сторону W . Получаем т. d .

Через P_N, P_S и d проводим меридиан светила.

Относительно т. z проводим альмукантарат с радиусом $90^\circ - h$ при этом на пересечении с меридианом светила получим т. C – положение светила (при определенных условиях возможно две точки пересечения альмукантарата с меридианом), через которую проводим вертикал светила. В пересечении вертикала и истинного горизонта получим точку b от которой откладываем h .

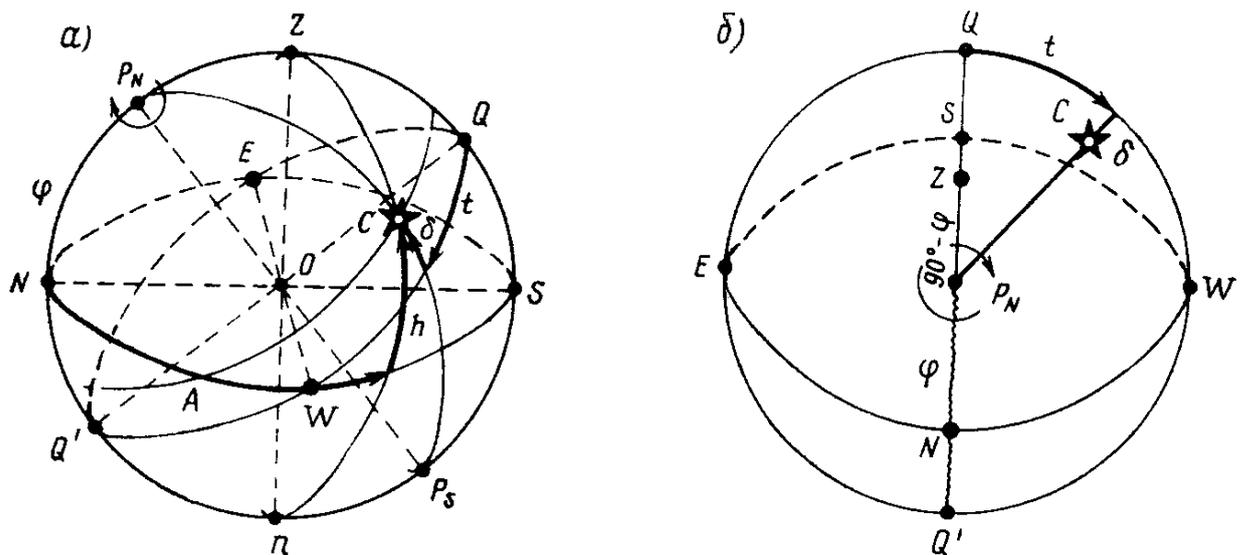
Вдоль линии истинного горизонта до вертикала светила снимаем A с наименованием.

От точки d в сторону светила снимаем величину δ с наименованием.

Изображение небесной сферы на плоскости меридиана наблюдателя и экватора. Графическое решение задач на сфере

Взаимное расположение основных кругов и точек на сфере, а также наблюдаемые особенности в движении светил зависят от географической широты наблюдателя. Для того чтобы получить наглядное представление об этих явлениях, принято строить изображение небесной сферы, соответствующее широте наблюдателя. Попутно практикуют приближенное решение задач на преобразование координат светил, т. е. переход от одной системы координат к другой. Построение небесной сферы выполняют от руки, откладывая и снимая координаты “на глаз” с точностью до 5° . Наиболее наглядным и удобным для преобразования координат является перспективное изображение сферы на плоскости меридиана наблюдателя.

Построение сферы начинают с проведения окружности радиусом 5 – 6 см, которую принимают за меридиан наблюдателя. Проведя вертикальный диаметр, изображающий отвесную линию, получают точки Z и n (рис. а).



Перпендикулярно отвесной линии проводят полуденную линию NS и большой круг, изображающий истинный горизонт. Перед тем как нанести точки N и S, следует по условию задачи определить, какой стороной, восточной или западной, должна быть повернута к нам сфера. Если из наименования практического часового угла или азимута светила следует, что светило находится в восточной половине сферы, то к нам должна быть обращена именно эта половина. В таком случае точку N ставят справа, а S слева. Если же светило расположено на западной половине сферы, то точку N помещают слева, а S – справа.

От точки N, если широта наблюдателя северная, или S, если широта южная, откладывают в сторону зенита дугу, равную широте φ . Отмечают повышенный полюс P_n или P_s , наименование которого одноименно с широтой наблюдателя. Через повышенный полюс и центр сферы проводят ось мира P_nP_s и отмечают пониженный полюс. Перпендикулярно оси мира проводят небесный экватор QQ' , в точках пересечения которого с истинным горизонтом получают точки E и W.

Построив сферу, наносят светила по заданным координатам и снимают искомые. Линии и дуги, расположенные внутри сферы или за плоскостью чертежа, изображают пунктиром.

Пример 3.1: Дано $\varphi = 50^\circ N$; $A = N 120^\circ W$; $h = 40^\circ$. Построить сферу и определить t и δ светила.

Решение: Строим небесную сферу (рис. 3.6,а). Точку N ставим слева, поскольку вторая буква наименования полукругового азимута W, и, следовательно, светило расположено в западной половине сферы. Повышенный полюс P_n располагаем под углом 50° над точкой N. Отложив по дуге горизонта заданный A , проводим вертикаль светила, откладываем по нему высоту h и наносим светило. Через место светила проводим меридиан и параллель. По экватору от точки Q до меридиана светила измеряем часовой

угол $t = 40^\circ W$, а по меридиану от экватора до места светила — склонение $\delta = 10^\circ N$.

При рассмотрении вопросов измерения времени применяют изображение сферы на плоскости экватора. Его можно получить, если смотреть на сферу со стороны повышенного полюса. Тогда полюс оказывается в центре чертежа, меридиан наблюдателя и меридианы светил изображают в виде прямых линий, а параллели — в виде концентрических окружностей.

Точку Z (рис. б) наносят на полуденную часть меридиана наблюдателя, отложив от повышенного полюса дугу, равную $90^\circ - \varphi$. Точки горизонта N и S наносят на меридиан наблюдателя, откладывая от повышенного полюса дуги, равные φ .

Через точки N, E, S, W может быть проведен истинный горизонт. Вертикалы и альмукантараты изображают кривыми линиями, их обычно на чертеж не наносят.

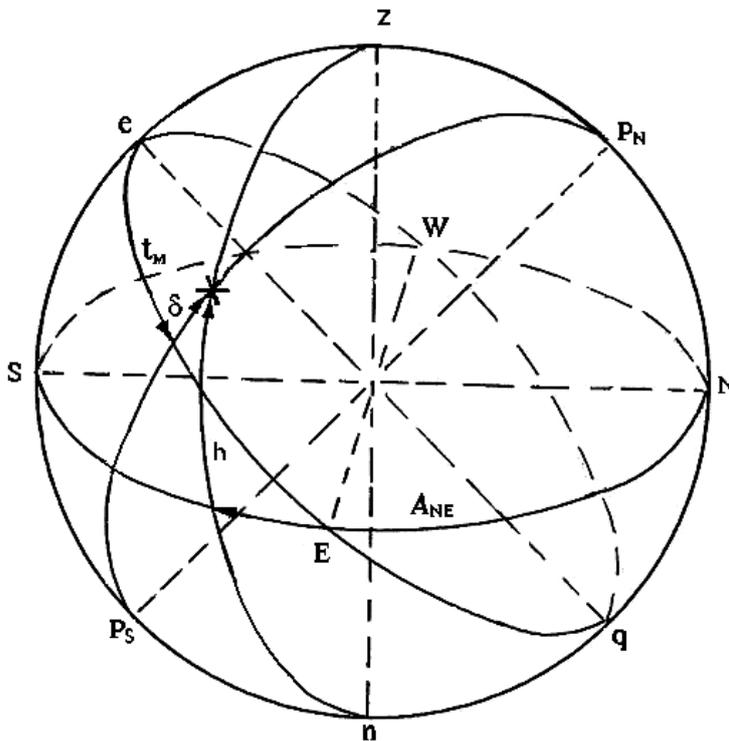
На рис. б показана сфера, построенная на плоскости экватора по условиям примера 3.1. Светило нанесено по его экваториальным координатам $t = 40^\circ W$ и $\delta = 10^\circ N$.

Построение небесной сферы на плоскости меридиана наблюдателя и графическое определение координат светил

Обязательными требованиями при выполнении рисунка небесной сферы являются аккуратность, чистота и наглядность. Эти качества крайне необходимы во всех практических задачах мореходной астрономии. Чтобы изображение передавало выпуклость сферы, надо стремиться соблюдать относительную величину дуг и углов с учетом перспективы чертежа. Линии, расположенные внутри сферы или на ее обратной стороне, изображаются пунктиром, большие и малые круги, плоскости которых пересекают сферу, выглядят как эллипсы. Чертеж небесной сферы рассматривается либо с востока, либо с запада, поэтому он строится так, чтобы светило находилось на выпуклой, обращенной к нам половине сферы (рис.).

Порядок построения сферы на плоскости меридиана наблюдателя следующий:

1. Рассчитать местный часовой угол светила t_m в практическом счете (см. пример).
2. Начертить круг произвольного радиуса (≈ 50 мм), принять его за меридиан наблюдателя.
3. Через центр круга провести пунктиром отвесную линию $z-n$ и отметить точки z и n на меридиане наблюдателя.



4. Перпендикулярно отвесной линии $z-n$ через центр круга провести пунктиром полуденную линию наблюдателя и большой круг – истинный горизонт.

5. По наименованию часового угла светила в практическом счете t_m определить, какой половиной – восточной или западной должна быть обращена к нам сфера. Помня, что видимое вращение небесной сферы происходит по часовой стрелке, с востока на запад

(если смотреть со стороны северного полюса мира P_n), выбрать направление оси мира и провести ее под углом к полуденной линии наблюдателя.

6. Провести пунктиром линию, перпендикулярную оси мира, и построить большой круг – небесный экватор. Отметить на меридиане наблюдателя точки полюсов мира P_n и P_s , e и q на полуденной и полуночной частях меридиана наблюдателя, соответственно, и точки N и S на полуденной линии. Провести пунктиром линию пересечения плоскостей экватора и горизонта, отметить на ней в соответствии с данными п. 1 и п. 5 точки востока E и W – запада.

7. По данным координатам t_m и δ нанести светило на сферу и снять искомые высоту h и A – азимут светила.

Пример. Дано $\varphi = 44^\circ 45,0' N$; $\lambda = 136^\circ 32,0' E$, гринвичский часовой угол точки Овна $\Upsilon t_{gp}^r = 123^\circ 15,0'$, экваториальные координаты светила $\alpha = 297^\circ 25,0'$ и $\delta = 8^\circ 48,0' N$.

Построить небесную сферу, нанести светило и определить его горизонтальные координаты h и A .

Решение.

1. Рассчитываем местный часовой угол светила в практическом счете по следующей схеме:

t_{gp}^r	$123^\circ 15,0'$
+	λ
	$136^\circ 32,0' E$
	t_m^r
	$259^\circ 47,0'$
-	α
	$297^\circ 25,0'$
	t_m^*
	$322^\circ 22' W$
	t_m^*
	$37^\circ 38' E$

2. Чертим круг и принимаем его за меридиан наблюдателя.

3. Через центр круга проводим отвесную линию и отмечаем на ней точки z и n .

4. Перпендикулярно линии $z-n$ через центр круга проводим полуденную линию и большой круг – истинный горизонт.

5. Принимаем обращенную к нам часть сферы за восточную, т. к. рассчитанный в п. 1 местный часовой угол светила имеет восточное наименование. Выбираем направление оси мира и проводим ее под углом $\varphi = 44^\circ 45,0'$ к полуденной линии с учетом того, что вращение небесной сферы всегда происходит по часовой стрелке, с востока на запад, если смотреть со стороны северного полюса мира.

6. Через центр круга проводим линию, перпендикулярную оси мира, и большой круг – небесный экватор. Отмечаем на меридиане наблюдателя точки Pn, Ps, N, S, e, q, а на круге горизонта точки E и W.

7. Учитывая выпуклость сферы, от точки E вдоль экватора к востоку откладываем «на глаз» $t_m = 35^\circ 38,0'$ E. Через конец этой дуги и точки Pn и Ps проводим меридиан светила. Вдоль меридиана, от небесного экватора к Pn откладываем «на глаз» дугу, равную склонению светила $\delta = 8^\circ 48,0'$ N. Конец этой дуги отмечаем как место светила. Далее через светило, точки z и n проводим дугу его вертикала. «На глаз» снимаем искомые горизонтные координаты: высоту светила $h = 43^\circ$, как часть дуги его вертикала от горизонта до места светила и $A = N 130^\circ E$ – часть дуги горизонта от точки N до вертикала светила.

Построение небесной сферы «на глаз» проводится с точностью $5^\circ - 7^\circ$.

Построение проекции небесной сферы

Данный способ обеспечивает получение искомым горизонтальных координат светила с точностью $1^\circ - 2^\circ$. Порядок построения проекции небесной сферы на меридиан наблюдателя, небесный экватор и горизонт следующий:

Чертеж на плоскости меридиана наблюдателя.

Пример. Дано: $\varphi = 40^\circ 42,0' S$

$\lambda = 146^\circ 10,0' E$

$t_{zp}^Y = 189^\circ 24,7'$

$\alpha = 24^\circ 20,3'$

$\delta = 57^\circ 17,6' S$

Определить: h, A, t_m^* , название звезды.

Решение.

1. Необходимо рассчитать t_m^* , порядок его расчета следующий:

2. Начертить круг произвольного радиуса ($R \approx 50\text{мм}$). В центре круга поставить E или W, в зависимости от наименования часового угла звезды (в практическом счете) через точки E (W) провести отвесную линию и линию истинного горизонта.

	t_{zp}^Y	189° 24,7'
+	λ	146° 10,0' E
	t_m^Y	335° 34,7'
-	α	24° 20,3'
	t_m^*	311° 14,4' W
	t_m^*	48° 45,6' E

3. Выбрать направление оси мира и нанести ее. Высота повышенного полюса равна широте места ($h_p = \varphi$). При этом надо учесть, что в северной широте P_n располагается над т. N горизонта, в южной широте P_s над т. S.

4. Перпендикулярно оси мира нанести небесный экватор. Отметить точки z, n на отвесной линии, P_n и P_s на оси мира, полуденную e и полуночную q точки на экваторе, N и S на линии горизонта.

Смотрим на небесный экватор со стороны повышенного полюса мира.

5. От полуденной точки e отложить t_m^* светила, отметить точку t , спроектировать ее на экватор и обозначить t' . Через точки P_n, P_s и t' провести окружность, которая будет меридианом светила. Меридиан изобразится эллипсом.

6. Нанести параллель светила. Для этого от точки e (или q) по окружности меридиана наблюдателя в сторону соответствующего полюса отложить δ (склонение светила) и провести через конец дуги δ линию, параллельную экватору.

7. В точке пересечения меридиана и параллели светила обозначить его место. Провести через светило прямую линию, параллельную полуденной линии N – S (альмукуантарат светила).

Измерить дугу меридиана наблюдателя от точки N или S до пересечения с альмукуантаратом, получим h – искомую высоту светила.

Смотрим на истинный горизонт с точки z .

8. Провести через точки z, n и светило, вертикал – дугу окружности. Пересечение вертикала с полуденной линией даст точку A' .

9. Спроектировать точку A' на меридиан наблюдателя (параллельно отвесной линии), получить точку A . Измерить дугу от вертикала повышенного полюса (т. N или S) до точки A – это будет искомый азимут A светила в полукруговом счете. Перевести его в круговой счет, записать результаты.

В соответствии с рассмотренным выше порядком строим проекции небесной сферы:

С чертежа снимаем:

$h = 55$

$A = S 45 E$

