



Б. И. КРАСАВЦЕВ

МОРЕХОДНАЯ АСТРОНОМИЯ

Б.И.КРАСАВЦЕВ

МОРЕХОДНАЯ АСТРОНОМИЯ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Утверждено
Главным управлением
по работе с моряками заграничного
кадров и учебных заведений Минморфлота
в качестве учебника для студентов
судоводительской специальности
высших инженерных
морских училищ



МОСКВА "ТРАНСПОРТ" 1986

Красавцев Б. И. Мореходная астрономия: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1986. — 255 с.

В учебнике, помимо теоретических вопросов астронавигации, предусмотренных программой, приведены примеры по многим практическим вопросам, а также указан порядок работы при основных наблюдениях, что позволяет использовать книгу в повседневной работе штурманов и при экспедиционных работах. Третье издание учебника переработано с учетом исключения устаревших вопросов, сокращения объема и введения более новых и актуальных тем (так, например, добавлено решение астронавигационных задач на ЭКВМ, расширены вопросы обеспечения надежности наблюдений, выявления промахов, упрощения наблюдений и др.). Второе издание учебника вышло в свет в 1978 г.

Книга предназначена для студентов судоводительской специальности высших морских учебных заведений.

Ил. 168, табл. 15, библиогр. 14 назв.

Рецензент В. И. Удалов

Заведующий редакцией Н. В. Глубокова

Редактор А. Г. Водолазов

Все науки, служащие целям судо-
вождения, имеют общую основную за-
дачу — обеспечение безопасного, быст-
рого и наиболее экономичного перехода
судна морем из одного пункта в другой.
Для выполнения этой задачи необходим
непрерывный контроль за счислением
пути судна, поправками, временем и др.
Навигация рассматривает способы конт-
роля счисления по наблюдениям земных
объектов, мореходная астрономия — по
наблюдениям небесных светил. Небес-
ные светила непрерывно перемещаются
и, чтобы определить их место в данный
момент, необходимо знать законы их
движения, изучаемые в астрономии. Это
же относится и к искусственным спут-
никам Земли. Результаты наблюдения
светил применяются для целей навига-
ции, поэтому мореходную астрономию
часто называют астронавигацией. Море-
ходная астрономия, кроме того, дает
сведения о службе времени, освещенно-
сти горизонта и различных явлениях,
происходящих на Земле и во Вселенной.
Эти сведения необходимы при несении
ходовой вахты. Кроме того, мореходная
астрономия является общеобразователь-
ной наукой, воспитывающей правиль-
ное материалистическое понимание Все-
ленной и ее закономерностей. Следова-
тельно, предметом мореходной астроно-
мии является приложение астрономиче-
ских знаний к нуждам судо-вождения.

Астрономия — наука о строении и
развитии Вселенной. Она подразделяет-
ся на ряд разделов (по существу, от-
дельных наук), имеющих свои задачи и
методы: астрометрия, небесная меха-
ника и теоретическая астрономия, астро-
физика, космогония, общая астрономия.
Из этих наук в мореходной астрономии
изучаются или используются астромет-

рия, теоретическая астрономия и общая
астрономия.

Астрометрия подразделяется на сфе-
рическую, обсерваторную и практиче-
скую астрономию. Сферическая астро-
номия рассматривает координатные си-
стемы на поверхности вспомогательной
сферы, их связь и изменения во време-
ни, а также принципы измерения вре-
мени. Практическая астрономия изуча-
ет методы и инструменты для опреде-
ления географических координат места,
истинных направлений (азимутов) и точ-
ного времени. Она подразделяется на:

геодезическую, или полевую астроно-
мию, в которой эти задачи решаются при
помощи переносных инструментов с вы-
сокой точностью, а обрабатываются в ка-
меральных условиях с помощью ЭВМ;
мореходную астрономию, в которой
эти задачи решаются ручными инстру-
ментами одним человеком, быстро, но
с меньшей точностью, или с помощью
астросистем — почти автоматически;

авиационную астрономию, в которой
те же задачи решаются с еще меньшей
точностью, но очень быстро, преимущест-
венно с помощью автоматических астро-
систем. Таким образом, мореходная ас-
трономия является частью практиче-
ской астрономии. В мореходной астро-
номии используется также теоретиче-
ская астрономия, которая изучает ме-
тоды определения орбит небесных тел
по их видимым положениям (вычисле-
ние орбит) и наоборот — видимых по-
ложений тел по известным элементам их
орбит (вычисление эфемерид).

В мореходной астрономии на базе
сферической и практической астрономии
разработаны собственные методы, по-
собия и инструменты, с помощью которых
решаются навигационные задачи в от-

крытом море. Астрономические обсервации, хотя и уступают радиотехническим по простоте и независимости от погоды, но имеют и ряд преимуществ: полную автономность, надежность, возможность применения их в любой точке Земли, как правило, большую точность, простые и дешевые приборы и пособия, а также скрытность определения. По этим причинам астрономические обсервации применяют сейчас наряду с радиотехническими. Особенно важны они как дублирующие, контрольные, а также аварийные, и их изучение обязательно для судоводителей в соответствии с современными международными требованиями.

Основными задачами, решаемыми мореходной астрономией, являются:

- определение места в море по наблюдениям светил;

- определение поправок приборов направления;

- обеспечение службы времени.

Вспомогательные задачи: определение освещенности, кульминаций светил, а также вычислительная и общая подготовка штурмана.

Настоящий курс мореходной астрономии состоит из трех частей:

- основы сферической и общей астрономии, где изучаются координаты светил, их изменения, измерение времени, эфемериды;

- морские астрономические инструменты, где изучаются секстан, хронометр, звездный глобус, наклонномер, работа с ними;

- астронавигация, где рассматриваются методы определения поправки компаса, определения места судна и анализ ошибок определения.

Для решения астрономических задач в море применяются следующие основные пособия: Морской астрономический ежегодник (МАЕ), мореходные таблицы (МТ—75), специальные таблицы ВАС—58, ТВА—57, а также ЭКВМ, специализированные и общие ЭВМ.

В практических вопросах автор придерживался следующей последовательности изложения: принцип способа, математическое обоснование, погрешности его, практическое выполнение и пример. Поэтому книга может служить и практическим пособием.

ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ И ОБЩЕЙ АСТРОНОМИИ

Глава 1. НЕБЕСНАЯ СФЕРА
И СФЕРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ СВЕТИЛ

§ 1. НЕБЕСНАЯ СФЕРА

Наблюдатель M , находящийся на поверхности Земли, участвует в ее суточном вращении и орбитальном обращении, вследствие чего направления на светила C_1 , C_2 (рис. 1, а) изменяются. Для упрощения решения астрономических задач и наглядности движений вводится вспомогательная сфера, получившая название небесной сферы. Можно представить сферу построенной около места наблюдателя M (см. рис. 1, а) или описанной около центра O Земли (рис. 1, б).

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

Основным направлением наблюдателя M является его *вертикаль*, или *отвесная линия*, zO_1 (см. рис. 1), положение которой в данной точке Земли постоянно и определяется направлением силы притяжения. Пересечение вертикали с поверхностью Земли представляет место M наблюдателя. Положение точки M на Земле определяется ее *географической широтой* φ (угол между отвесной линией и плоскостью экватора) и *долготой* λ (двугранный угол между меридианами — гринвичским $Гр$ и наблюдателя M , равный дуге q_0q). Введение небесной сферы позволяет построить аналогичные системы координат для светил.

При построении небесной сферы ее центр помещают в произвольной точке O (рис. 2) и через нее проводят линии, параллельные линиям наблюдателя M (см. рис. 1, б). Линия, параллельная вертикали zO_1 , называется отвесной линией zn , а точки пересечения ее со сферой —

зенитом z и *надиром* n . Линия, параллельная оси $p_n p_s$, Земли (см. рис. 1, а), представляет на сфере *ось мира* $P_N P_S$, вокруг которой вращается сфера. Точки пересечения ее со сферой называются *полюсами мира*: северным P_N и южным P_S (они соответствуют полюсам Земли).

Плоскость H истинного горизонта наблюдателя M (см. рис. 1, а), проведенная через центр сферы, дает в сечении со сферой *истинный горизонт* — большой круг $NESW$, перпендикулярный отвесной линии zn .

Плоскость экватора Земли, перенесенная к центру O сферы, дает в сечении со сферой *небесный экватор* — большой круг $QWQ'E$, плоскость которого перпендикулярна оси мира.

Плоскость $p_n M q p_s$ (см. рис. 1, а) — географического меридиана наблюдателя M , проведенная через центр сферы, дает в сечении с ней *меридиан наблюдателя* — большой круг $P_N z Q P_S Q'$. Ось мира $P_N P_S$ разделяет меридиан наблюдателя на полуденную часть $P_N z P_S$, включающую зенит, и полудночную $P_S n P_N$ (на рис. 2 волнистая линия). Эти части меридиана Солнце пересекает в полдень и в полночь, отсюда их названия.

Основные круги сферы делят ее на части: горизонт — на надгоризонтную и подгоризонтную (где светила не видны); небесный экватор — на северную (P_N) и южную (P_S); меридиан наблюдателя NzS — на восточную (E) и западную (W).

Истинный горизонт наблюдателя делится на направления. Пересечение плоскостей меридиана и горизонта дает *полуденную линию* $N-S$, а плоскостей экватора и горизонта — линию $E-W$.

Полюс мира, расположенный над горизонтом, называется *повышенным полюсом*. Его наименование совпадает с широтой наблюдателя: в северной широте — P_N , в южной — P_S . Возвышение полюса над горизонтом, т. е. дуга NP_N , равно широте, так же как дуга zQ (см. рис. 2).

Изображения сферы. Изображения одной и той же небесной сферы могут быть разными: для местного наблюдателя на плоскости его меридиана с центром в глазу наблюдателя (см. рис. 1 и 2) или для любого наблюдателя на Земле с центром в центре Земли (см. рис. 9) или в центре солнечной системы (см. рис. 23). Надо твердо усвоить, что все это — изображения одной вспомогательной сферы в различных видах и что из одного вида легко получить другой (сравнить рис. 1, б и 9). Для задач каждого типа удобно определенное изображение сферы, без лишних деталей.

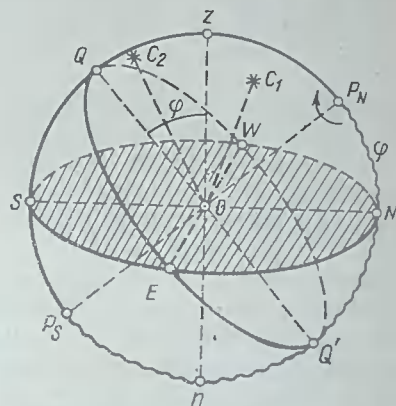


Рис. 2

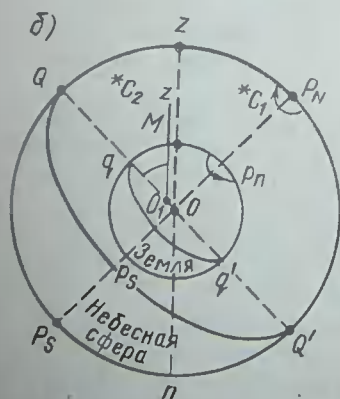


Рис. 1

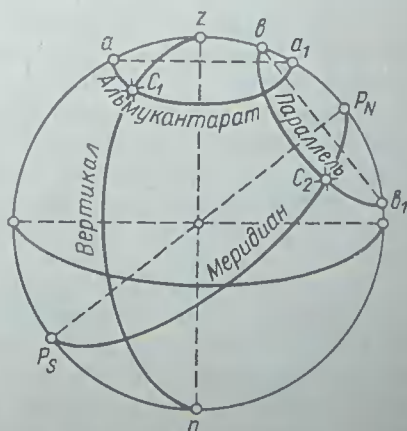


Рис. 3

мест вместе со сферой — от суточного вращения Земли и по сфере — от собственных движений и других причин.

Системы вспомогательных кругов. Для удобства построения сферических координат на сфере вводят системы взаимно перпендикулярных кругов. Круги, связанные с отвесной линией: *вертикалы* — большие круги, плоскости которых проходят через отвесную линию (перпендикулярные горизонту), например zC_1n на рис. 3; *альмуикантаты* — малые круги aa_1 , плоскости которых параллельны горизонту. Вертикал, проходящий через точки E , W , называется *первым вертикалом*.

Круги, связанные с осью мира: *небесные меридианы* (или круги склонений) — большие круги, плоскости которых проходят через ось мира (перпендикулярные экватору), например $P_N C_2 P_S$ на рис. 3; *параллели* — малые круги bb_1 , плоскости которых параллельны экватору. Эти круги аналогичны географическим меридианам и параллелям на Земле. Небесный меридиан $P_N z P_S$ лежит в плоскости географического меридиана наблюдателя M (см. рис. 1, б) и поэтому называется *меридианом наблюдателя* (иногда местным меридианом); одновременно он является и *вертикалом наблюдателя*.

§ 2. СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

Системы координат на небесной сфере строятся относительно двух взаимно перпендикулярных кругов сферы, подобно широтам и долготам на земном глобусе. В этом случае получаются сферические прямоугольные координаты. Применяются и сферические полярные координаты — по сферическому углу при какой-либо точке и расстоянию от нее. На сфере эти системы часто совпадают. Из известных в сферической астрономии пяти систем небесных координат в мореходной астрономии применяются: горизонтная, две экваториальные и, изредка, эклиптическая.

Горизонтная система координат. Основными кругами (осями координат) в этой системе являются истинный горизонт и меридиан наблюдателя; основным направлением — отвесная линия zn . Положение точки или светила на сфере определяется двумя координатами: высотой и азимутом (рис. 4; сфера на нем для φ_N повернута W -м к зрителю).

Высотой h светила называется дуга его вертикала от истинного горизонта до места светила. Угол при центре сферы, измеряемый этой дугой, также называют высотой. Этот угол измеряется при наблюдениях. Высоты считаются в пределах от 0 до $\pm 90^\circ$; с «+» над горизонтом, с «—» под горизонтом, например светило C_1 имеет $h = 46^\circ$, светило C'_1 имеет $h = -30^\circ$; высота зенита $+90^\circ$, надира -90° и т. п.

Азимут A светила называется дуга истинного горизонта между меридианом наблюдателя и вертикалом светила. Эта дуга измеряет плоский угол при центре сферы или сферический угол A при зените, которые поэтому также называют азимутами.

В мореходной астрономии применяют три системы счета азимутов: полукруговой, круговой и четвертной.

Полукруговой азимут считается в пределах $0-180^\circ$ от полуденной части меридиана наблюдателя в сторону E или W до вертикала светила, например $A = N100^\circ W$ (см. рис. 4). В северной широте начальной точкой счета является N , в южной — S , поэтому первая буква наименования азимута совпадает с

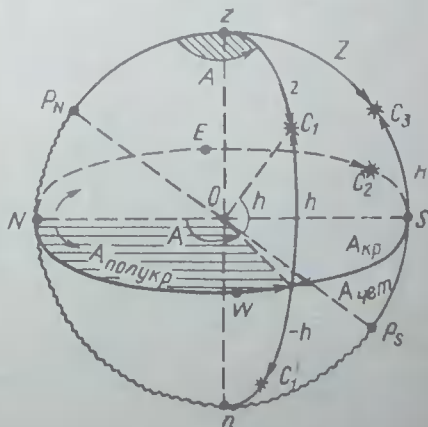


Рис. 4

широтой, вторая — с половиной сферы, где расположено светило. Этот счет азимутов применяют при решении сферических треугольников по формулам и по таблицам ВАС—58.

Круговой азимут считается от точки N в сторону E до вертикала светила в пределах $0—360^\circ$, т. е. совпадает с истинным пеленгом светила, например для светила C_1 $A = \text{ИП} = 260^\circ$. Этот счет применяют при определении ΔK и при прокладке.

Четвертый азимут считается по четвертям — от ближайшей части меридиана наблюдателя до вертикала светила в пределах $0—90^\circ$, например, светило C_1 имеет $A = 80^\circ \text{SW}$. Этот счет применяют в формуле синусов и ТВА—57.

Необходимо уметь свободно переходить от одной системы счета азимута к другой — это постоянно требуется на практике. Например, для светила C_2 (см. рис. 4) имеем: полукруговой $A = N150^\circ E$; круговой $A = 150^\circ$; четвертной $A = 30^\circ \text{SE}$. Положение светила C_1 в горизонтной системе запишется так: $A = 260^\circ$; $h = 46$. Одна горизонтная координата определяет на сфере положение одного круга: азимут — положение вертикала, высота — альмукантарата.

Полярные координаты. Положение точки на сфере может быть определено и без построения горизонта — непосредственно при зените. Зенит является полюсом, а меридиан наблюдателя — полярной осью координат A и z . Азимут в полярных координатах определяется как угол при зените в полукруговом счете (см. рис. 4).

Зенитным расстоянием z называется дуга вертикала от зенита до места светила в пределах $0—180^\circ$; так, на рис. 4 $z = 44^\circ$. Зенитное расстояние связано с высотой соотношением

$$z = 90^\circ - h. \quad (1)$$

Дуга z измеряет центральный угол z между отвесной линией и направлением на светило (этот угол измеряется береговыми инструментами). Полярные координаты применяются при решении сферических треугольников.

Меридиональная высота. Высота светила, расположенного на меридиане наблюдателя, называется меридиональной высотой H . Ей придается наименование той точки горизонта, над которой она измерена, например, для C_3 $H = 35^\circ S$. Наименование меридионального зенитного расстояния Z обратно H . Так, для светила C_3 $Z = 55^\circ N$.

Первая экваториальная система координат. Основным направлением в этой системе является ось мира $P_N P_S$, а основными кругами — экватор и меридиан наблюдателя. Положение точки на сфере определяется двумя координатами: склонением и часовым углом (рис. 5).

Склонением δ светила называется дуга меридиана светила от небесного экватора до места светила. Угол δ при центре сферы, равный этой дуге, также называют склонением (его измеряют в обсерваториях). Склонения считаются от 0 до 90° к N или S ; например, на рис. 5 для светил C_1 и C_2 имеем $\delta_1 = 33^\circ N$, $\delta_2 = 26^\circ S$.

Примечание. В мореходной астрономии принято склонению придавать знак «+», если оно одноименно с широтой, и знак «-», если разноименно. В обсерваторной и геодезической астрономии, а также в ЭВМ знак «+» придается северному склонению (и широте), знак «-» — южному.

Часовым углом t называется дуга экватора от полуденной части меридиана наблюдателя до меридиана светила, считаемая в сторону точки W от 0 до 360° . В таком счете часовой угол называют часовым, или обыкновенным, и наименования обычно не приписывают. Кроме этого, применяется полукруговой счет часовых углов: от 0 до 180° к W или E , который называют иногда практическим, так как он применяется при решении

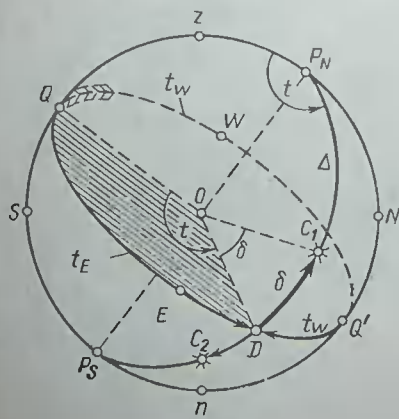


Рис. 5

треугольников и в таблицах, т. е. $t_E = 360^\circ - t_W$ при $t_W > 180^\circ$. Для светила C_1 (см. рис. 5) имеем $t = 245^\circ W$, или $t = 115^\circ E$. Дуга экватора QD измеряет центральный угол t или сферический угол при полюсе t , которые также называют часовыми углами.

Место светила C_1 на сфере запишется теперь так: $t = 245^\circ$; $\delta = 33^\circ N$. Одна экваториальная координата определяет на сфере положение одного круга: часовой угол — положение меридиана светила; склонение — параллели.

Полярные координаты. Положение точки можно определить при полюсе мира — в полярных координатах t и Δ . Часовой угол теперь определяется как угол при повышенном полюсе в полукруговом счете (на рис. 5 $t = 115^\circ E$).

Полярным расстоянием Δ называется дуга меридиана светила от повышенного полюса до места светила, считающаяся от 0 до 180° , например для светила C_1 $\Delta = 57^\circ$, C_2 $\Delta = 116^\circ$. Очевидно, что $\Delta = 90^\circ - \delta$.

По определению часовой угол отсчитывается от плоскости географического меридиана места, поэтому на рис. 5 и аналогичных всегда изображается местный часовой угол. Для других меридианов часовые углы другие.

Вторая экваториальная система координат. В этой системе основное направление — ось мира, а основными кругами являются небесный экватор и меридиан точки Овна (γ). Точка Овна, или точка весеннего равноденствия, расположена в пересечении экватора с эклипкой, т. е. связана с орбитой Земли. Положение светила в этой системе определяется склонением и прямым восхождением (рис. 6). Склонение δ в этой системе аналогично первой экваториальной системе.

Прямое восхождение α светила называется дуга экватора от точки Овна до меридиана светила, считающаяся в сторону, обратную W часовым углам (т. е. в сторону E) от 0 до 360° . Дуге α соответствуют при центре сферы и при полюсе углы α , также называемые прямым восхождением. Например, для светила C_1 $\alpha = 55^\circ$; $\delta = 35^\circ N$. Вместо α в морских пособиях применяется также звездное дополнение: $\tau = 360^\circ - \alpha$.

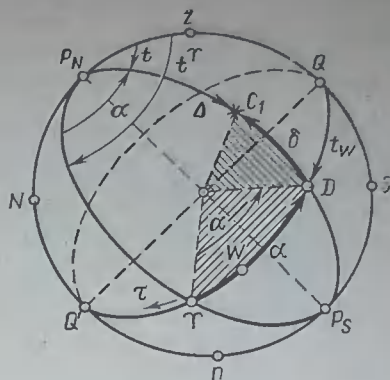


Рис. 6

Звездным дополнением τ называют дугу экватора от точки Овна до меридиана светила, но считающую в сторону W часовых углов, например для светила C_1 имеем $\tau = 305^\circ$. В отечественных пособиях τ применяется только для звезд, отсюда и его название. Направление счета прямого восхождения α совпадает с вращением Земли и ее обращением по орбите.

Полярные координаты. В этом случае прямое восхождение α (или τ) считается как угол при полюсе между меридианами точки Овна и светила, а полярное расстояние Δ — аналогично первой системе координат (см. рис. 6). Эта система координат аналогична географическим: α — с λ ; δ — с ϕ .

Первая и вторая экваториальные системы отличаются только положением начального меридиана: t считается от точки Q , а α — от точки Овна (γ), положение же точки Овна определяется ее часовым углом t^v , поэтому (см. рис. 6)

$$t^v = t + \alpha, \quad (2)$$

т. е. часовой угол точки Овна (звездное время) равен сумме часового угла и прямого восхождения светила. По этой формуле (в § 23 она названа основной формулой времени) можно перейти от одной системы к другой.

Эклиптическая система координат. В этой системе основным направлением является ось эклиптики, а основными кругами — эклиптика (плоскость орбиты Земли) и круг широты точки Овна (рис. 7). Эклиптика, как всякий большой круг, имеет ось, которая пересекает

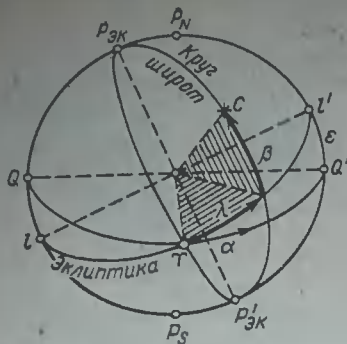


Рис. 7

сферу в полюсах эклиптики — северном $P_{\text{ЭК}}$ и южном $P'_{\text{ЭК}}$. Большие круги, проходящие через полюса эклиптики, называются кругами широты (см. рис. 7).

Эклиптической широтой β называется дуга круга широт от эклиптики до места светила в пределах $0-90^\circ$ со знаком «+» к северу, «-» — к югу.

Эклиптической долготой λ называется дуга эклиптики от точки Овна до круга широты светила — от 0 до 360° в сторону счета α . Для светила С имеем: $\beta = +40^\circ$, $\lambda = 60^\circ$. Эту систему применяют при предвычислении координат по формулам § 12, в частности на ЭВМ.

Единицы измерения сферических координат. Координаты на небесной сфере являются дугами больших кругов или сферическими углами, поэтому для их измерения применяют все единицы измерения углов (градусная мера, радианная) и специальную астрономическую часовую меру дуг и углов.

Часовая мера основана на исторически сложившемся разделении одного оборота сферы на 24 части (часа), каждого часа — на 60 мин и 1 мин — на 60 с. Между часовой и градусной мерой дуг (в дальнейшем — и времени) установлено соотношение: за $24^{\text{ч}}$ сфера поворачивается на 360° , поэтому $360^\circ = 24^{\text{ч}}$; $15^\circ = 1^{\text{ч}}$; $1^\circ = 4^{\text{м}}$; $1' = 4^{\text{с}}$; $0,25' = 1^{\text{с}}$. В мореходной астрономии координаты измеряются до $0,1'$ или до $0,5^{\text{с}}$, в практической части — до $1^{\text{с}}$. Таблицы перехода приведены в МТ-75 (табл. 39) и МАЕ (приложение 3). Переход от градусной меры к часовой осуществляют по схеме: делить на 15, остаток умножать на 4 и т. д. (см. пример 1).

Пример 1. $\lambda = 98^\circ 52,5' \text{ E}$ перевести в часовую меру.

Решение. $\lambda = \left(\frac{90^\circ}{15}\right)^{\text{ч}} + \left(8^\circ \cdot 4 + \frac{45'}{15}\right)^{\text{м}} + (7,5' \cdot 4)^{\text{с}} = 6^{\text{ч}} 35^{\text{м}} 30^{\text{с}}$.

§ 3. ГРАФИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ

При решении конкретных задач применяют более удобную для данного случая систему координат. Горизонтная система ориентирована в пространстве относительно отвесной линии наблюдателя, поэтому h и A светила зависят от положения наблюдателя на Земле, и по ним можно определить его место. Часовые углы измеряют угол поворота сферы, поэтому их удобно применять при измерении времени, и т. п. В задачах возникает необходимость перехода от одной системы координат к другим. Самым простым является графическое построение сферы, оно необходимо также при изучении систем координат. При построении сферы можно использовать различные ее изображения как пространственные, так и плоские. Для построения необходимо знать широту наблюдателя φ (иногда и λ).

Связь широты наблюдателя с координатами точек сферы. В этом вопросе удобнее применить плоское изображение сферы, для чего местная сфера (см. рис. 1, а и рис. 2) проектируется на плоскость меридиана наблюдателя (рис. 8).

Угол между отвесной линией zn и плоскостью небесного экватора QQ' равен географической широте по ее определению. Дуга Qz поэтому равна φ , но эта же дуга — склонение зенита, поэтому $\delta_z = \varphi$, т. е. склонение зенита равно широте места.

Из рис. 8 видно, что широте равны еще три дуги, остальные равны 90° — φ . Дуга NP_N , равная широте, вместе с тем — высота точки P_N , т. е. $h_p = \varphi$, или высота повышенного полюса равна широте места. Рис. 8 удобен для нанесения высот и склонений на

Геоцентрическое изображение сферы. Для различных наблюдателей на Земле удобнее общее изображение сферы (геоцентрическое). Если поместить центр сферы в центре Земли (см. рис. 1, б) и затем повернуть ось мира $P_N P_S$ вертикально, получим изображение сферы, справедливое для любого наблюдателя на Земле (рис. 9). Место наблюдателя M проектируется в точку z_M , а его меридиан — в меридиан наблюдателя $P_N z_M P_S$. Аналогично получаются зени-ты и меридианы других мест, например для Гринвича $z_{Гр}$ и $P_N z_{Гр} P_S$. Для наблюдателя M — полуденная точка экватора Q , от нее отсчитываются t_M светила C , как обычно, к W . Для Гринвича имеем точку Q_0 и часовой угол $t_{Гр}$. Эта же сфера часто изображается на плоскости экватора (см. рис. 43, 49), где экватор изображается окружностью, меридиан — прямой (волнистая — полуночная часть). Из рис. 9 видно, что долгота места равна разности часовых часов

На геоцентрическом изображении сферы нет горизонта, поэтому применяются полярные координаты при z_m , т. е. A и z (см. рис. 9). Помимо приведенных изображений сферы, применяют еще изображения ее на плоскости горизонта, первого вертикала (как плоские, так и пространственные); они рассматриваются при решении соответствующих задач.

с помощью моделей сферы: звездного глобуса, планетария, координатных кругов;

аналитическим решением сферических треугольников (с любой степенью точности).

Рассмотрим графическое решение задач. Построением сферы называется выполнение перспективного или плоского рисунка ее с нанесением основных линий, точек и координатных систем.

Меридиан наблюдателя проводят циркулем, остальные кривые наносят от руки. При построении сферы примем следующие условия:

все большие круги сферы, кроме меридиана наблюдателя, изображать эллипсами;

полуночную часть меридиана наблюдателя изображать волнистой линией; линии на видимой части сферы, т. е. той, где расположено светило, проводить сплошными, а внутри и позади сферы — пунктирными;

дуги, равные координатам (или их дополнениям), откладывая «на глаз», приблизительно в масштабе основной окружности с точностью до $\pm 5^\circ$, как правило, от центра чертежа к его краям.



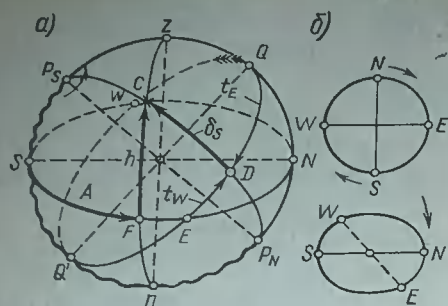


Рис. 10

Порядок построения сферы и преобразования координат рассмотрен в примере 2. Следует иметь в виду, что графическое решение задач на сфере не исчерпывается задачей преобразования координат. В дальнейшем будут введены движения светил, и графическое приближенное решение поможет понять особенности этих движений.

Пример 2. Построить сферу $\varphi = 40^\circ$ S, нанести светило по $t = 295^\circ$ и $\delta = 50^\circ$ S. Определить h и A .

Решение. Проводим окружность $R = 4$ см. Вертикальный диаметр ее изобразит отвесную линию z , горизонтальный — полуденную линию NS (рис. 10). Однако, прежде чем нанести точки N и S , следует определить, какой стороной к наблюдателю должна быть повернута сфера. Указанием служит часовой угол или рассматриваемое явление, например, заход светила — на W -е. На рис. 2 сфера повернута E -м к нам, на рис. 4 — W -м. В данном примере $t = 295^\circ$ или $t = 65^\circ$ E, т. е. светило расположено на E -й половине сферы, и она должна быть повернута к нам E -м. Мысленно представляя горизонт $NESE$ в виде картушки компаса (рис. 10, б), поворачиваем ее E к себе, при этом справа будет N , слева S . От точки S откладываем вверх дугу $\varphi = 40^\circ$ S, получаем повышенный полюс P_S , так как в южной широте над горизонтом будет P_S . Проводим ось мира $P_S P_N$ и получаем полуночную часть $P_S N P_N$. Перпендикулярно $P_S P_N$ проводим экватор QQ' , точка Q его расположена на полуденной части меридиана.

Строим изображение горизонта и экватора в виде эллипсов, их малые полуоси наносим с помощью циркуля. В пересечении эллипсов получаем точки E и W . Линии «внутри» и «позади» сферы делаем пунктирными. На этом рисунок сферы закончен. В заключение следует показать стрелкой при полюсе направление вращения (с E на W). Координата t в практическом (полукруговом) счете откладывается по экватору от точки Q в данном случае к E . Для удобства отсчета от E откладываем дуга ED , равная $90^\circ - 65^\circ = 25^\circ$. Через полученную точку D проводится меридиан $P_S D P_N$. По нему от точки D к P_S откладываем $\delta = 50^\circ$ S, полученная точка C — место светила на сфере. Проводя через нее вертикал zC , отмечаем дуги FC и SC , которые равны высоте и азимуту светила. На глаз оцениваем эти координаты и записываем: $h = 45^\circ$; $A = 55^\circ$ SE; $A_{кр} = 125^\circ$.

Преобразование координат с помощью моделей сферы. Моделью сферы и некоторых систем координат является прибор, называемый звездным глобусом. На нем сфера представлена с точки зрения наблюдателя, смотрящего на нее снаружи. Звездный глобус может изображать как местную сферу, так и геоцентрическую, если его вынуть из ящика (см. § 39).

Глобус имеет координатные сетки, разделенные на градусы, поэтому преобразование координат осуществляется установкой глобуса и его координатных кругов на заданные значения и снятием искомых значений координат приблизительно до 1° . Рекомендуется решить пример 2 на звездном глобусе.

Другой имитацией сферы является проекционная установка, называемая планетарием. В нем сфера рассматривается изнутри так, как виден небесный свод в пещере. В связи с этим изображения созвездий на глобусе и в планетарии обратны. Планетарий облегчает изучение созвездий и координатных систем, а также позволяет приближенно преобразовывать их (до 3°).

Глава 2. ПАРАЛЛАКТИЧЕСКИЙ ТРЕУГОЛЬНИК СВЕТИЛА И ЕГО РЕШЕНИЕ

§ 4. ПАРАЛЛАКТИЧЕСКИЙ ТРЕУГОЛЬНИК И ЕГО РЕШЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЫСОТЫ И АЗИМУТА

Формулы, связывающие координатные системы между собой, проще всего получить путем решения сферических треугольников на небесной сфере.

Параллактический треугольник. Построив сферу для наблюдателя в данной широте и проведя меридиан и вертикал светила S , получим сферический треугольник $P_N z C$, в который входят координаты основных систем и географические координаты места (рис. 11).

Параллактическим треугольником светила называется сферический треугольник $P_N z C$, имеющий вершины в повышенном полюсе, зените и месте светила и связывающий между собой основные системы сферических координат. Напомним, что в северной широте полюс — P_N , в южной — P_S . Элементами этого треугольника, т. е. его сторонами и углами, являются: сторона $z P_N$ — дуга меридиана наблюдателя, равная $90^\circ - \varphi$; сторона $P_N C$ — дуга меридиана светила, равная $90^\circ - \delta$; сторона $z C$ — дуга вертикала светила, равная $90^\circ - h$; угол при зените, равный азимуту светила в полукруговом счете; угол при повышенном полюсе, равный часовому углу в практическом (полукруговом) счете; угол при светиле ψ — параллактический угол, также в полукруговом счете. Как видим, в треугольник входят полярные координаты, поэтому его иногда называют полярным треугольником светила.

Формулы, связывающие три данных элемента и один искомый элемент сферического треугольника, называются основными (см. приложение 1.2). В них углы и стороны должны быть меньше 180° ¹. В параллактическом треугольнике это достигается использованием полукругового счета t , A и q , стороны же всегда меньше 180° . Следовательно, параллактический треугольник можно ре-

шать по основным формулам сферической тригонометрии.

Особое значение параллактического треугольника, отличающее его от других, заключается в том, что он связывает сферические координаты светила с географическими координатами места наблюдателя. Широта входит в сторону $z P_N$, а долгота — в угол t ; это всегда местный часовой угол t_M , а по формуле (3) $t_M = t_{TP} - \lambda_W$. Поэтому, решая параллактический треугольник, по известным координатам светил можно определить координаты места.

Решение параллактического треугольника по основным формулам. Для решения или для построения треугольника $P_N z C$ должны быть известны три его элемента. Тогда по основным формулам можно определить остальные его элементы в общем виде, а затем с помощью таблиц функций или с ЭВМ вычислить эти элементы с нужной точностью.

Треугольник может быть косоугольным (при произвольном значении его элементов), прямоугольным (если один или несколько его углов прямые) или четвертным (при стороне, равной 90°). Во всех случаях будут справедливы основные формулы, хотя есть и частные формулы и правила для каждого случая. Рекомендуется применять четыре основные формулы сферической тригонометрии, которые следует знать наизусть (см. приложение 1.2); нужно выучить

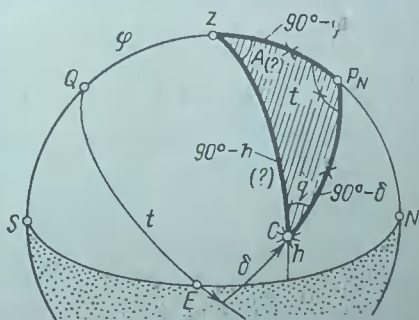


Рис. 11

¹ Возможны сферические треугольники с элементами от 0 до 360° (Мобиуса). В них при тех же формулах правила счета и знаков другие (см. [9, ст. 30]).

также формулу пяти элементов, применяемую при выводах.

Общий порядок решения параллактического треугольника следующий: сделать чертеж треугольника, поместить данные и искомые величины;

подобрать формулы для получения искомых величин, как правило, через данные и привести их к простейшему виду;

исследовать формулы на знаки функций (по тригонометрическим четвертям) при данных значениях аргументов; составить простейшие схемы вычислений;

произвести вычисления по таблицам логарифмов или натуральных значений тригонометрических функций;

приписать искомым наименования; произвести контроль вычислений.

Переход от экваториальных координат к горизонтным. Положим, что в треугольнике zP_XC (см. рис. 11) заданы φ , δ и t , требуется определить высоту и азимут. Отметим в параллактическом треугольнике заданные элементы крестиком ($\times$), а искомые — знаком вопроса (?).

Для получения h применим формулу, связывающую три стороны и угол треугольника, т. е. формулу косинуса стороны (см. приложение 1.2), к стороне zC :

$$\cos(90^\circ - h) = \cos(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) +$$

$$+ \sin(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t.$$

После упрощений получим

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t. \quad (4)$$

Для получения азимута через заданные величины φ , δ , t применим формулу для четырех рядом лежащих элементов, т. е. формулу котангенсов (см. приложение 1.2), к углу A :

$$\operatorname{ctg} A \sin t = \operatorname{ctg}(90^\circ - \delta) \times$$

$$\times \sin(90^\circ - \varphi) - \operatorname{ctg} t \cos(90^\circ - \varphi);$$

после упрощений и отделения неизвестного получим

$$\operatorname{ctg} A = \operatorname{tg} \delta \cos \varphi \operatorname{cosec} t - \sin \varphi \operatorname{ctg} t. \quad (5)$$

Из параллактического треугольника можно получить и другие элементы, например по данным A , t , φ , применяя формулу косинуса угла C , получим q :

$$\cos q = -\cos A \cos t + \sin A \sin t \sin \varphi. \quad (6)$$

Исследование формул на знаки. Исследование производится определением знака тригонометрической функции по данной величине и знаке координаты с последующим переименованием знаков. Исследование выполняется, чтобы определить: будет ли в правой части расчетной формулы сумма членов (т. е. $+I-II$, $-I-II$) или их разность (например, $-I-II$); знак искомой функции, а по нему тригонометрическую четверть или знак искомой координаты.

Правила исследования формул на знаки приведены ниже.

1. Широта всегда меньше 90° и считается положительной независимо от наименования (N или S), поэтому все ее функции имеют знак «+».

2. Склонение всегда меньше 90° , но может иметь знак «+» или «-», если оно одноименно с φ , и знак «-», если разноименно с φ (знак «-» означает четвертую тригонометрическую четверть). Если δ одноименно с φ , все функции δ имеют знак «+»; если же δ разноименно с φ , то $\cos \delta$ и $\sec \delta$ имеют знак «+», остальные функции — знак «-».

3. Высота всегда меньше 90° , но может иметь знак «+» или «-». Если знак высоты «-», то все ее функции положительны, если же знак «+», то $\cos h$ и $\sec h$ имеют знак «+», остальные функции — знак «-».

4. Часовой угол вводится в треугольник всегда меньшим 180° (E или W). Если $t < 90^\circ$, т. е. в первой тригонометрической четверти, то все его функции имеют знак «+». Если же $t > 90^\circ$, т. е. во второй четверти, то $\sin t$ и $\operatorname{cosec} t$ имеют знак «+», остальные функции — «-».

5. Азимут в треугольнике всегда в полукруговом счете, т. е. может быть в первой и второй четвертях. Поэтому независимо от его наименования, если $A < 90^\circ$, все его функции имеют знак «+»; если же $A > 90^\circ$, то $\sin A$ и $\operatorname{cosec} A$ имеют знак «+», остальные функции — «-».

6. Параллактический угол имеет величину от 0 до 180° , и знаки его функций определяются аналогично A и t .

Эти же правила применяются и при определении знака или величины искомой координаты.

Рассмотрим примеры исследования и решения по таблицам МТ—75.

Пример 3. Дано: $\varphi = 60^\circ S$; $\delta = 15^\circ S$; $h = -1^\circ$; заход Солнца. Определить t и исследовать формулу на знаки.

Решение. Применяя формулу косинуса к стороне zC (см. рис. 11), получим формулу (4), из которой определим

$$\cos t = \sin h \sec \varphi \sec \delta - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta, \quad (-I-II).$$

В соответствии с правилами функций φ имеют знаки «+», функции δ — также «+», а $\sin(-h)$ — знак «—». Результат исследования запишем в условном виде справа: —I член, —II член.

Так как оба члена имеют знак «—», то они складываются, а общий знак результата будет «—», т. е. $\cos t$ отрицателен. Это возможно, если t во второй четверти, т. е. $t > 90^\circ$. Из таблиц всегда выбирается угол меньше 90° , поэтому пишем $180^\circ - t = 60^\circ$ (из таблиц) или $t = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ W$.

Рассмотрим полное решение параллактического треугольника на примере 4.

Пример 4. Дано: $\varphi = 55^\circ 45,6' N$; $\delta = 10^\circ 13,4' S$; $t = 62^\circ 24,5' W$. Определить высоту и азимут светила.

Решение. Применяя к треугольнику $P_N z C$ формулу косинуса стороны и формулу котангенсов, получим формулы (4) и (5) для h и A :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (-I+II);$$

$$\operatorname{ctg} A = \operatorname{tg} \delta \cos \varphi \operatorname{cosec} t - \sin \varphi \operatorname{ctg} t \quad (-I-II).$$

Исследуем эти формулы на знаки. Все функции φ будут, как всегда, иметь знак «+». Так как δ_S разноименно с φ_N , то его знак будет «—» (что аналогично четвертой четверти), поэтому $\sin \delta$ и $\operatorname{tg} \delta$ имеют знак «—», а $\cos \delta$ — знак «+»; $t < 90^\circ$, поэтому все функции имеют знак «+». Результат перемножения знаков записывается справа; в первой формуле получим $(-I+II)$, во второй $(-I-II)$, т. е. в первой формуле будет разность (β), во второй — сумма (α).

Составляем схему и производим вычисления по табл. 5-а, 3-а, 3-б МТ—75.

$\varphi = 55^\circ 45,6'$	$\sin$	9,91734	$\cos$	9,75025	$\cos$	9,75025	$\sin$	9,91734
$\delta = 10^\circ 13,4'$	$\sin$	9,24916	$\cos$	9,99305	tg	9,25611	$\sin$	9,91734
$t = 62^\circ 24,5'$	—	—	$\cos$	9,66574	—	0,05244	ctg	9,71818
	$\uparrow -I$	9,16650	II	9,40904	$\uparrow -I$	9,05880	II	9,63552
	II	9,40904	β	9,63136	II	9,63552	α	0,10210
	АГ	0,24254	$\sin$	9,04040	АГ	0,57672	ctg	9,73762

$$h = 6^\circ 18,1';$$

$$180^\circ - A = 61^\circ 20,5';$$

$$A = N118^\circ 39,5' N;$$

$$A_{\text{кр}} = 241^\circ 20,5' \approx 241,3^\circ.$$

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ И АЗИМУТА ПО СИСТЕМАМ ФОРМУЛ

Иногда к формулам для решения треугольника предъявляют определенные требования относительно простоты, точности и применяемой функции. Один из путей упрощения решения — использование систем формул. Так, для совместного вычисления h и A можно применить три системы формул, в которых найденный элемент вводится в дальнейшие формулы, чем упрощаются вычисления или получается нужная функция.

Система формул $\sin h$ и $\sin A$. По данным φ , δ , t требуется получить простейшую систему формул для вычисления h и A . Из параллактического треугольника $P_N z C$ (см. рис. 11) по формуле косинуса стороны получается формула

для $\sin h$ для h . Формула для A получается проще, если h ввести как известную (это допустимо, так как точность вычисления h порядка $0,1'$, а азимут требуется до $0,1^\circ$). По формуле синусов получим:

$$\frac{\sin A}{\cos \delta} = \frac{\sin t}{\cos h}$$

или

$$\sin A = \sin t \cos \delta \sec h.$$

Следовательно, первая система формул для h и A имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } \sin h &= \sin \varphi \sin \delta + \\ &+ \cos \varphi \cos \delta \cos t; \\ \text{б) } \sin A &= \sin t \cos \delta \sec h. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

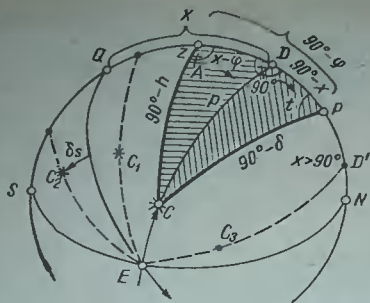


Рис. 12

Эта система при вычислении h по таблицам дает большую точность при $h < 30^\circ$, что имеет значение при четырехзначных таблицах. Эта система являлась основной на нашем флоте до появления таблиц ВАС—58. Пример и схема вычислений по логарифмам приведены в МТ—75, с. 17.

Система формул $\sin^2 \frac{z}{2}$ и $\sin A$. При $h > 30^\circ$ точность вычислений по формуле $\sin h$ снижается. Можно заменить функцию $\sin h = \cos z$ на более выгодную в этих условиях функцию $\sin^2 \frac{z}{2}$. Заменяя $\cos z = 1 - 2 \sin^2 \frac{z}{2}$ и аналогично заменяя $\cos t$ и $\cos(\varphi - \delta)$, после преобразований получим вторую систему формул:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } \sin^2 \frac{z}{2} &= \sin^2 \frac{\varphi - \delta}{2} + \\ &+ \cos \varphi \cos \delta \sin^2 \frac{t}{2}; \\ \text{б) } \sin A &= \sin t \cos \delta \operatorname{cosec} z, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\varphi - \delta$ образуется вычитанием при одинаковых φ и δ и сложением — при разноименных.

Формула 8а для z дает точные результаты при $h > 30^\circ$ и не требует исследования на знаки; она применялась в основном на зарубежных флотах. Пример и схема вычислений приведены в МТ—75, с. 16. Дальнейшим преобразованием формулы 8а можно привести к формуле, выгодной для применения на ЭВМ:

$$\sin^2 \frac{z}{2} = \sin^2 \frac{\varphi - \delta}{2} \cos^2 \frac{t}{2} + \sin^2 \frac{t}{2} \cos^2 \frac{\varphi + \delta}{2} \quad (9)$$

Система формул «тангенсов». Формулы 7а и 8а состоят из двух членов, т. е. они не логарифмируются, требуют специальных таблиц α и β и имеют ограничения. Можно получить систему формул, выгодных при любых углах и, кроме того, логарифмируемых. Такие формулы выводятся заменой переменных или, что более наглядно, разделением параллактического треугольника на два прямоугольных. Выведем формулы, в которых все искомые получаются через наиболее выгодную функцию $\operatorname{tg} \alpha$; они были получены Гауссом в начале XIX в.

Из места светила C (рис. 12) опускаем на меридиан наблюдателя QP сферический перпендикуляр CD , который как дуга большого круга проходит через точки E и W (они являются полюсами меридиана наблюдателя). Расстояние QD от экватора до основания перпендикуляра обозначим x , тогда $PD = 90^\circ - x$, а $zD = (90^\circ - \varphi) - (90^\circ - x) = x - \varphi$. Образовались два прямоугольных сферических треугольника PCD и DCz . Искомые получаются последовательным решением этих треугольников по формуле котангенсов (чтобы получить функцию тангенсов, причем найденные величины вводят в последующие формулы, получая логарифмируемые формулы. (Вместо формулы котангенсов можно применить правила Модью—Непера.)

Рассмотрим нахождение x из треугольника PDC , в котором известны δ , t и угол $D = 90^\circ$. Применяя формулу котангенсов к углу 90° в сторону стороны (см. рис. 12), получим

$$\operatorname{ctg} 90^\circ \sin t = \operatorname{ctg} (90^\circ - \delta) \times$$

$$\times \sin (90^\circ - x) = \cos (90^\circ - x) \cos t,$$

откуда

$$\sin x \cos t = \cos x \operatorname{tg} \delta,$$

а разделив на $\cos x$, получим

$$\operatorname{tg} x = \operatorname{tg} \delta \sec t. \quad (10)$$

Из треугольника PDC получают также вспомогательную величину p , применяя формулу котангенсов к углу t :

$$\operatorname{ctg} t \sin 90^\circ = \operatorname{ctg} p \sin (90^\circ - x) - \\ - \cos 90^\circ \cos (90^\circ - x),$$

откуда

$$\operatorname{tg} p = \operatorname{tg} t \cos x.$$

Из второго прямоугольного треугольника DzC , считая известными p , $x = \varphi$ и угол $D = 90^\circ$, по формуле котангенсов, примененной к углу A в сторону стрелки (см. рис. 12), после преобразований получим

$$\operatorname{tg} A = \frac{\operatorname{tg} t \cos x}{\sin (x - \varphi)}. \quad (11)$$

Считая теперь азимут известным, определим h , применяя формулу котангенсов к углу 90° , после преобразований

$$\operatorname{tg} h = \cos A \operatorname{ctg} (x - \varphi). \quad (12)$$

В формулах (10) и (12) в правой части получаются различные функции, что неудобно при составлении пособий, так как увеличивается количество таблиц и их объем. Поэтому для практического применения эти формулы были приведены к двум функциям: $\operatorname{tg} \alpha$ и $\sec \alpha$ путем следующих тригонометрических преобразований:

$$\begin{aligned} \sin (x - \varphi) &= \frac{1}{\operatorname{cosec} (x - \varphi)} = \\ &= \frac{1}{\sec [90^\circ - (x - \varphi)]} = \frac{1}{\sec [90^\circ + (\varphi - x)]} = \\ &= \frac{1}{\sec y} \end{aligned}$$

$$\operatorname{ctg} (x - \varphi) = \operatorname{tg} (90^\circ - (x - \varphi)) = \\ = \operatorname{tg} [90^\circ + (\varphi - x)] = \operatorname{tg} y,$$

где $y = 90^\circ + (\varphi - x)$ — алгебраическая формула, правило для отыскания $(\varphi - x)$ или в порядке записей по схеме (12 ~ 13) приведено ниже.

Подставляя эти выражения в формулы (11) и (12), получим «формулы тангенсов»:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} x &= \operatorname{tg} \delta \sec t; \\ \operatorname{tg} A &= \frac{\operatorname{tg} t \sec y}{\sec x}; \\ \operatorname{tg} h &= \frac{\operatorname{tg} y}{\sec A}; \\ y &= 90^\circ + (x - \varphi). \end{aligned} \quad (13)$$

Правила получения величин x и y . Чтобы решать задачи по формулам (13), надо знать величины и знак x и y . Как видно из рис. 12, величина x зависит от положения точки D и, следовательно, дуга x всегда одноименна с δ (N или S). Если $t > 90^\circ$, то $x > 90^\circ$.

В формуле для $y = 90^\circ + (x \sim \varphi)$ знак «тильда» ($\sim$) означает, что при x , одноименном с φ , из большего вычитается меньшее; при x и φ разноименных они складываются. При применении этих правил исследовать формулы на знаки не нужно.

Формулы (13) логарифмические, и искомые находят через более точную функцию тангенсов, что и составляет достоинство этих формул. Их недостаток в том, что точное искомое h определяется через A . Решение довольно трудоемко и имеет особенности при углах около 90° . По этим формулам составлены таблицы ТВА—57.

§ 6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И АЗИМУТА. УСТРОЙСТВО И ПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЦАМИ ТВА—57

Классификация специальных таблиц. Вычисление высоты и азимута можно упростить, если применить таблицы, специально предназначенные для этой цели. С конца прошлого века выпущено подобных таблиц более 50 типов. Известный советский ученый-навигатор проф. Н. Н. Матусевич (1879—1950) предложил разделить все специальные таблицы по принципу построения и работы на три типа: тригонометрические, искусственные, численные.

Тригонометрические таблицы — упрощенные таблицы логарифмов или натуральных значений нескольких тригонометрических функций. Таблицы приспособлены под определенную систему формул, полученных обычно разделением треугольника на два прямоугольных, например формулы тангенсов. Они, как правило, компактны и достаточно точны, но решение по трудоемкости близко к обычному решению по формулам и МТ. К таблицам этого типа относятся табли-

цы Фуэя (1901 г.), Аквино Эджегона, ГВА—57 и др.

Искусственные таблицы — таблицы видоизмененных тригонометрических функций, их логарифмов или приращений, составленные для искусственно преобразованных формул. Такие таблицы дают простейшие вычислительные операции, малы по объему, но точность их обычно недостаточна. В 20-е годы были распространены, например, таблицы Ахматова «Высота и азимут в три минуты».

Численные таблицы — таблицы готовых численных значений h и A , данных через определенный шаг аргументов φ , δ , t , а также поправок к ним, вычисленных как приращения. По таблицам этого типа h и A вычисляются проще, надежнее и обычно с достаточной точностью, но объем таблиц большой, например американские НО-214 занимают девять томов по 250 страниц. Численные таблицы азимутов вышли у нас в 1935 г. (таблицы Ющенко), высот и азимутов — в США в 1936 г., затем в Англии, Японии, а в 1958 г. и у нас (ВАС—58). Рассмотрим подробно отечественные таблицы ГВА—57 и ВАС—58.

Устройство и пользование таблицами ГВА—57. «Таблицы для вычисления высоты и азимута» (1957 г.) составлены

проф. А. П. Ющенко для вычисления по формулам тангенсов (13) и представленных таблицы видоизмененных $\lg \sec \alpha$ и $\lg \lg \alpha$, впервые опубликованы в табл. 27 в МТ—43.

Логарифмируя формулы (13), получим:

$$\left. \begin{aligned} \lg \lg x &= \lg \lg h - \lg \sec \alpha \\ \lg \lg A &= \lg \lg l - \lg \sec \alpha + \lg \sec \varphi \\ \lg \lg h &= \lg \lg p - \lg \sec A \end{aligned} \right\} (14)$$

С целью упрощения вычислений и повышения точности вводятся величины:

$$S(\alpha) = 2 \cdot 10^4 \lg \sec \alpha;$$

$$T(\alpha) = 2 \cdot 10^4 \lg \lg \alpha = 70725.$$

Здесь четырехзначные логарифмы умножены на 10^4 , чтобы избавиться от характеристик, например вместо 0,3544 получим 3544. При умножении на 2 уточняется округление, например $3544,3 \cdot 2 \approx 7089$. Число 70725 введено, чтобы в таблицах не приводить отрицательных величин, так как при $\alpha < 45^\circ$ характеристики $\lg \lg \alpha$ отрицательны. Принимая наименьший угол $\alpha = 1'$, для компенсации наибольшего отрицательного числа вводим $2 \cdot 10^4 \lg \frac{1}{\lg 1'} = 70725$ после добавления этого

		32°												
I	S	T										S		I
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9			
0	1432	66641	66641	66642	66642	66643	66644	66644	66645	66645	66646	1432	58	0
1	33	646	647	648	648	649	649	650	650	651	651	652	35	54
2	35	652	652	652	654	654	655	655	656	656	657	658	36	57
3	36	658	658	659	660	660	661	661	662	662	663	663	38	56
4	38	664	664	665	665	666	666	666	667	668	668	669	39	55
5	1439	66669	66669	66670	66670	66671	66672	66672	66673	66673	66674	66674	1441	54
6	41	674	675	676	676	677	678	678	679	679	680	680	42	53
7	43	680	681	681	682	682	683	684	684	685	685			
8	44	686	686	687	687	688	689		689	690	690			
9	46	691	692	692	693	694								
10							934	934	935	935	936			
53	17	937	937	938	938	939	939	940	940	941	942	1513	3	1
54	18	942	943	943	944	944	945	945	946	946	947	948	15	2
55	1520	66948	66948	66949	66949	66950	66950	66951	66952	66952	66953	66953	1512	4
56	22	953	954	954	955	955	956	956	957	958	958	959	26	3
57	23	959	959	960	960	961	962	962	963	964	964	965	28	2
58	25	964	965	965	966	966	967	968	968	969	969	970	27	1
59	27	970	970	971	971	972	973	973	974	974	975	975	28	0
S		T										S	I	
		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0			

147°

Рис 13

числа все величины T от $1'$ оказываются положительными (до $1'$ они отрицательны).

Вводя величины S и T в формулы (*) получим:

$$\left. \begin{aligned} T_x &= T_\delta + S_t; \\ T_A &= T_t - S_x + S_y; \\ T_h &= T_y - S_A. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

По этим рабочим формулам составлены схемы вычислений (см. пример 5), которые при решении заполняются значениями T и S из таблиц ТВА—57. Выдержка из таблиц ТВА—57 показана на рис. 13; величины S приведены через $1'$, поэтому их приходится интерполировать между строк, но при углах от 75° до 104° для S выделены отдельные страницы, где они даны через $0,1'$, т. е. не требуют интерполяции. Величины T да-

ются через $0,1'$ по всей таблице. Для углов от 0 до 90° вход в таблицы производится сверху и слева (см. рис. 13), а при углах от 90 до 180° — снизу и справа (величины S и T симметричны относительно 90°).

При работе с таблицами ТВА—57 следует придерживаться правил, примененных при получении формул тангенсов и приведенных в § 5. Эти же правила даны в самих таблицах на с. 8. Из них чаще допускается промах в правиле: если $t > 90^\circ$, то и $x > 90^\circ$ (выбирается снизу). Следует также помнить, что знаки в схеме чередуются — в первой колонке «+», затем «—», «+» и «—». Азимут выбирается всегда сверху таблицы, т. е. в четвертном счете, причем первая буква наименования разноименна с φ (кроме случая, когда $x > \varphi$ и одноименна), вторая буква одноименна с часовым углом.

Пример 5. Дано: $\varphi = 61^\circ 23,6' N$; $\delta = 6^\circ 45,7' S$; $t = 32^\circ 56,8' W$. Определить h и A по ТВА—57.

Решение.

$\delta = 6^\circ 45,7' S$	T	52 204			
$t = 32^\circ 56,8' W$	S	1 523	T	66 958 (см. рис. 13)	
$x = 8^\circ 02,5' S$	T_x	53 727	S	86	
$\varphi = 61^\circ 23,6' N$			T_p	66 872	
$y = 69^\circ 26,1' - 90^\circ = 159^\circ 26,1'$	S	572	T	62 210	
$A = 34^\circ 25,6' SW$	T_A	67 444	S	1 672	
$h = 17^\circ 11,8'$			T_h	60 538	

Примечание. Из двух значений угла, соответствующих $T = 67 444$, выбирается четное $0,6'$.

Особые приемы интерполирования. При t , x или A , близких к 90° (в пределах $\pm 2^\circ \div 3^\circ$), в таблицах обязательно применяются особые приемы интерполирования S_x или S_A . Так как T или S меняются здесь очень быстро, а их приращения примерно одинаковы, то S_x и S_A выбираются не на углы x или A , а по T_x или T_A (т. е. до $0,01'$). Для этого к значению S_x или S_A , выбранному на угол x или A , добавляются разности ΔT между полученными значениями T_x или T_A и их ближайшими зна-

чениями, приведенными в таблицах, т. е. получаем $S_x = S_t + \Delta T_x$ или $S_A = S_t + \Delta T_A$ с учетом знака ΔT . Если этого не делать, то в высоте возможны крупные ошибки.

Таблицы ТВА—57 не имеют ограничений по аргументам (можно обрабатывать любое светило в любой широте), достаточно точны, невелики по объему, однако решение по ним довольно трудоемко; они применяются в качестве дополнительных таблиц к основным таблицам ВАС—58.

Высота и азимут являются функциями трех независимых переменных φ , δ и t . Обозначим некоторые целые значения этих аргументов, задаваемые через определенный интервал (шаг), через φ_r , δ_r и t_r . Тогда значения $h_r = h(\varphi_r; \delta_r; t_r)$ и $A_r = A(\varphi_r; \delta_r; t_r)$ можно рассчитывать и поместить в таблицах через эти же интервалы аргументов; это и есть «численные» таблицы. Если приращения аргументов $\Delta\varphi$, $\Delta\delta$ и Δt относительно заданных не превышают определенной величины, то промежуточные — искомые — значения h_c и A_c можно получить по формуле Тейлора:

$$\begin{aligned}
 h_c = & h_\tau + \frac{\partial h}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial h}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial h}{\partial t} \Delta t + \\
 & + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 h}{\partial \varphi^2} \Delta \varphi^2 + \frac{\partial^2 h}{\partial \delta^2} \Delta \delta^2 + \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \Delta t^2 + \right. \\
 & + 2 \frac{\partial^2 h}{\partial \varphi \partial \delta} \Delta \varphi \Delta \delta + 2 \frac{\partial^2 h}{\partial \varphi \partial t} \Delta \varphi \Delta t + \\
 & \left. + 2 \frac{\partial^2 h}{\partial \delta \partial t} \Delta \delta \Delta t \right] + \dots \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$A_c = A_r + \frac{\partial A}{\partial \psi} \Delta \psi + \frac{\partial A}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial A}{\partial l} \Delta l, \quad (16)$$

где значения производных берутся при φ_T, δ_T, t_T .

Ограничиваясь (при шаге аргументов не более 1°) для высоты членами второй степени, а для азимута — первой и обозначая приращения первой степени Δh_i и ΔA_i , а второй — Δh_{ii} , получим

$$h_c = h_T + \Delta h_{\varphi} + \Delta h_{\delta} + \Delta h_l + \Delta h_{\varphi\delta} +$$

$$+ \Delta h_{\delta\delta} + \Delta h_{ll} + \Delta h_{\delta l} + \Delta h_{\varphi\delta} + \Delta h_{\varphi l}, \quad (17)$$

$$A_c = A_r + \Delta A_{\theta} + \Delta A_{\delta} + \Delta A_l. \quad (18)$$

В численных таблицах приращения высоты получают по таблицам попра-

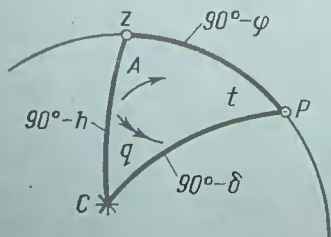


Рис. 14

вок, и если применять формулу (17), то их — девять. Приращения азимута частично получают по таблицам, частично — линейным интерполированием. Введем формулы частных производных и получим приращения.

Приращения высоты первой степени. Из параллактического треугольника zPC (рис. 14) запишем формулу косинуса стороны zC , т. е. формулу (4):

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t. \quad (*)$$

Отыскание $\frac{\partial h}{\partial \varphi}$. Продифференцируем формулу (*) по h и φ :

$$\cos h dh = (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t) d\varphi$$

ИЛИ

$$\frac{\partial h}{\partial \varphi} = \frac{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos I}{\cos h} \quad (**)$$

Применяя формулу пяти элементов (см. приложение 1.2) в направлении стрелки на рис. 14, получим

$$\sin(90^\circ - h) \cos A = \sin(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) - \\ - \cos(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t.$$

Правая ее часть после упрощения дает числитель формулы (**), поэтому после подстановки получим

$$\frac{\partial h}{\partial q} = \frac{\cos h \cos A}{\cos h} = \cos A. \quad (19)$$

Отыскание $\frac{dh}{d\delta}$. Дифференцируя формулу (4) по h и δ , производя аналогичные преобразования (с применением формулы пяти элементов в сторону двойной стрелки на рис. 14), получим

$$\frac{\partial h}{\partial \delta} = \cos q. \quad (20)$$

Отыскание $\frac{\partial h}{\partial t}$. Дифференцируя формулу (*) по h и t , получим

$$\cos h\partial h = -\cos \varphi \cos \delta \sin t \partial t$$

ИЛИ

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\cos \delta \sin t \cos \eta}{\cos h} \quad (***)$$

Применяя формулу синусов к углам z и P (см. рис. 14), имеем

$$\frac{\cos \delta}{\cos h} = \frac{\sin A}{\sin l} \quad (****)$$

Произведя замену в первом сомножителе формулы (***), получим

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{\sin A \cos \varphi \sin t}{\sin t} = -\cos \varphi \sin A. \quad (21)$$

Физический смысл этих производных — скорость изменения высоты по широте, склонению и часовому углу (времени).

Подставляя полученные производные в формулу (15), получим значения искомой высоты с учетом членов разложения первой степени:

$$h_c = h_T + \cos \varphi \Delta \varphi + \cos q \Delta \delta - \cos \varphi \sin A \Delta t. \quad (22)$$

Эта формула применена при составлении некоторых численных зарубежных таблиц, например НО—214.

Приращения азимута первой степени. Из параллактического треугольника zPC (см. рис. 14) по формуле котангенсов имеем

$$\operatorname{ctg} A \sin t = \operatorname{tg} \delta \cos \varphi - \cos t \sin \varphi. \quad (23)$$

Отыскание $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$. Дифференцируя формулу (23) по A и φ , получим

$$-\frac{\partial A}{\sin^2 A} \sin t = -(\operatorname{tg} \delta \sin \varphi + \cos t \cos \varphi) \partial \varphi$$

или

$$\frac{\partial A}{\partial \varphi} = \frac{\sin^2 A}{\sin t} (\operatorname{tg} \delta \sin \varphi + \cos t \cos \varphi) = \sin^2 A \left(\frac{\sin \delta \sin \varphi}{\cos \delta \sin t} + \frac{\cos t \cos \varphi \cos \delta}{\cos \delta \sin t} \right).$$

В числителе получена формула (4) для $\sin h$, поэтому

$$\frac{\partial A}{\partial \varphi} = \frac{\sin^2 A \sin h}{\cos \delta \sin t}$$

или, заменяя $\frac{\sin A}{\sin t}$ по формуле синусов, получим

$$\frac{\partial A}{\partial \varphi} = \frac{\sin A \cos \delta \sin h}{\cos \delta \cos h} = \sin A \operatorname{tg} h. \quad (24)$$

Отыскание $\frac{\partial A}{\partial \delta}$. Дифференцируя формулу (23) по A и δ , после аналогичных преобразований, применяя дважды формулу синусов, получим

$$\frac{\partial A}{\partial \delta} = -\sin q \sec h. \quad (25)$$

Отыскание $\frac{\partial A}{\partial t}$. Дифференцируя формулу (23) по A и t , производя замены по формуле $\cos q$ (6) и синусов (***), получим

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\cos \delta \cos q \sec h. \quad (26)$$

Физический смысл этих производных — скорость изменения азимута по широте, склонению и часовому углу. Подставляя полученные производные в формулу (16), получим значение искомого азимута с учетом приращений первой степени:

$$A_c = A_T + \sin A \operatorname{tg} h \Delta \varphi - \sin q \sec h \Delta \delta - \cos \delta \cos q \sec h \Delta t. \quad (27)$$

Приращения высоты второй степени. Для получения вторых членов разложения высоты в ряд Тейлора надо найти шесть вторых производных [см. формулу (15)]. Вторые частные производные получают дифференцированием первых производных по нужным аргументам, считая другие постоянными, но учитывая при этом зависимость некоторых аргументов друг от друга.

Дифференцируя формулу (19) по φ , учитывая зависимость азимута от φ и используя формулу (24) для $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$, получим

$$\frac{\partial^2 h}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial h}{\partial \varphi} \right) = -\sin A \frac{\partial A}{\partial \varphi} = -\sin^2 A \operatorname{tg} h. \quad (28)$$

Дифференцируя формулу (20) по δ и учитывая, что $\frac{\partial q}{\partial \delta} = \sin q \operatorname{tg} h$ (при φ и $t = \text{const}$), получим

$$\frac{\partial^2 h}{\partial \delta^2} = \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{\partial h}{\partial \delta} \right) = -\sin^2 q \operatorname{tg} h. \quad (29)$$

Дифференцируя формулу (21) по h и t и подставляя значение $\frac{\partial A}{\partial t}$ из формулы (26), получим

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) = -\cos \varphi \cos A \frac{\partial A}{\partial t} = \cos \varphi \cos A \cos \delta \cos q \sec h. \quad (30)$$

Аналогично получают и остальные вторые производные. Сведем полученные вторые приращения в табл. 1.

Приращения высоты	Приращения азимута
$\Delta h_{\varphi} = \cos A \Delta \varphi; \Delta h_{\delta} = \cos q \Delta \delta$	
$\Delta h_t = -\cos \varphi \sin A \Delta t$	
$\Delta h_{\varphi\varphi} = -\sin^2 A \operatorname{tg} h \frac{\Delta \varphi^2}{2}$	
$\Delta h_{\delta\delta} = -\sin^2 q \operatorname{tg} h \frac{\Delta \delta^2}{2}$	$\Delta A_{\varphi} = \sin A \operatorname{tg} h \Delta \varphi$
$\Delta h_{t t} = \cos q \cos \delta \sec h \Delta t \cos A \cos \varphi \frac{\Delta t}{2}$ -----(*)	$\Delta A_t = -\cos q \cos \delta \sec h \Delta t (*)$
$\Delta h_{\varphi t} = \cos q \cos \delta \sec h \Delta t \sin A \Delta \varphi$ -----(*)	
$\Delta h_{\delta t} = \sin q \sec h \Delta \delta \cos A \cos \varphi \Delta t$ -----(**)	$\Delta A_{\delta} = -\sin q \sec h \Delta \delta (**)$
$\Delta h_{\varphi \delta} = \sin q \sec h \Delta \delta \sin A \Delta \varphi$ -----(**)	

Примечание. Если приращения Δh_{ij} выражать в ('), то в правую часть их формул вводится множитель $\operatorname{arc} 1'$.

Из табл. 1 видно, что задача составления таблиц поправок не проста. При составлении численных таблиц учитывают, что шаг аргументов, объем таблиц, их точность и трудоемкость работы взаимосвязаны. При большом шаге аргумен-

тов объем таблиц уменьшается, но точность h_c понижается и необходимо учитывать вторые члены Δh_{ij} , при этом работа осложняется. При малом шаге объем таблиц возрастает. Каждая таблица разрешает этот вопрос по-своему.

§ 8. УСТРОЙСТВО И ПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЦАМИ ВАС—58. ИНОСТРАННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ ТАБЛИЦЫ

В таблицах «Высоты и азимуты светила» (1958 г.) (ВАС—58) для получения h_c и A_c по данным φ_c , δ , t_c применяют следующие рабочие формулы:

$$\left. \begin{aligned} h_c &= h_t + \Delta h_{\varphi} + \Delta h_{\delta} + \Delta h_t + \Delta h_{\text{доп}} \\ A_c &= A_t + \Delta A_{\varphi} + \Delta A_{\delta} + \Delta A_t \end{aligned} \right\} (31)$$

где h_t и A_t выбираются в готовом виде из основных таблиц; Δh_t и ΔA_t получают по табл. 1, 2, 3 поправок (кроме ΔA_t).

Устройство основных таблиц ВАС—58. Основные таблицы представляют «численные таблицы», т. е. таблицы готовых значений h_t , A_t и вспомогательной величины q_t , вычисленных для φ_t , δ_t , t_t через 1° с помощью ЭВМ. Пределы принятых широт от 0 до 80° (N и S), склонений — от 0 до 29° N и S (свыше 29° — выборочно для ярких звезд) и часовых углов — для видимого пути светила. Таблицы разделены на четыре тома по 20° широты: первый $0-19^\circ$, второй $20-39^\circ$, третий $40-59^\circ$ и четвертый $60-80^\circ$. Они пригодны и в южных широтах, так как имеют два входа: для одноименных φ и δ — сверху и разноименных — снизу.

Основные таблицы каждого тома делятся на секции через 1° широты, каждая секция — на колонки по склонениям и строки — по часовым углам. На рис. 15 показана секция широт 42° колонки склонений $16-23^\circ$. Такое разделение позволяет быстро отыскать ближайший φ , δ , t и получить h_t и A_t .

Вход в основные таблицы по δ производится сверху — при φ и δ одноименных (t выбирается слева) и снизу — при φ и δ разноименных (t — справа). На рис. 15 показан вход с $\varphi_t = 42^\circ N$, $\delta = 22^\circ S$ и $t = 59^\circ W$. Граница между «входом сверху» и «входом снизу» отмечена чертой, на ней $h = 0$; при переходе через черту получаются отрицательные значения высот. Значения h_t приведены до $0,1'$; A_t — до $0,1^\circ$; q — до 1° . По основным таблицам определяется также поправка ΔA_t (линейным интерполированием) и знак ΔA_{δ} . В каждом томе имеются три таблицы поправок и различные вспомогательные таблицы.

Теория таблиц поправок в ВАС—58. Таблицы поправок составлены по формулам приращений Δh и ΔA . Прираще-

СКЛОНЕНИЕ ОДНОИМЕННО С ШИРОТОЙ

$\varphi = 42^\circ$

δ	16°			17°			18°			19°			20°			21°			22°			23°		
	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q
90°	10°37'	78°	49°	11°16'	77°	49°	11°56'	76°	49°	12°35'	75°	50°	13°13'	74°	50°	13°52'	74°	50°	14°31'	73°	50°	15°09'	72°	50°
1	9°54'	77°	48°	10°33'	76°	49°	11°12'	75°	49°	11°51'	75°	49°	12°30'	74°	50°	13°09'	73°	50°	13°48'	72°	50°	14°26'	71°	50°
2	9°10'	76°	49°	9°50'	75°	49°	10°29'	75°	49°	11°08'	74°	49°	11°48'	73°	49°	12°27°	72°	50°	13°05'	71°	50°	13°44'	71°	50°
3	8°27'	76°			75°	49°	9°45'	74°		10°25'	73°								12°23'	71°				
4																								
110																								
1	4°06'	115°	136	3°23'	116°	136	2°00'	116°	136	1°17'	117°	136	0°34'	118°	136	0°08'	61°	44	1°305	61°	45	2°132	60°	45
112	4°46'	116°	136	4°02'	117°	136	3°19'	118°	136	2°36'	118°	136	1°52'	119°	136	1°09'	120°	136	0°25'	120°	136	0°179	58°	44
	5°26'	117°	137	4°42'	118°	137	3°58'	118°	137	3°15'	119°	137	2°31'	120°	137	1°47'	120°	137	1°03'	121°	137	0°20'	122°	137
	6°05'	118°	137	5°21'	118°	137	4°37'	119°	137	3°53'	120°	137	3°09'	120°	137	2°25'	121°	137	1°41'	122°	137	0°57'	122°	137
	6°44'	118°	137	6°00'	119°	137	5°16'	120°	137	4°32'	120°	137	3°48'	121°	138	3°03'	122°	138	2°19'	122°	138	1°35'	123°	138
	7°23'	119°	138	6°39'	120°	138	5°54'	120°	138	5°10'	121°	138	4°25'	121°	138	3°41'	122°	138	2°56'	123°	138	2°12'	124°	138
	8°02'	120°	138	7°17'	120°	138	6°33'	121°	138	5°48'	121°	138	5°03'	122°	138	4°18'	123°	138	3°33'	124°	138	2°48'	124°	138
	8°40'	120°	138	7°55'	121°	139	7°11'	122°	139	6°25'	122°	139	5°40'	123°	139	4°55'	124°	139	4°10'	124°	138	3°25'	125°	139
	9°19'	121°	139	8°33'	122°	139	7°48'	122°	139	7°03'	123°	139	6°17'	124°	139	5°32'	124°	139	4°47'	125°	139	4°01'	126°	139
	9°58'	122°	139	9°11'	123°	139	8°25'	123°	139	7°40'	124°	140	6°54'	124°	140	6°08'	125°	140	5°23'	126°	140	4°37'	126°	140
	10°34'	123°	140	9°48'	123°	140	9°02'	124°	140	8°16'	125°	140	7°31'	125°	140	6°45'	126°	140	5°58'	127°	140	5°12'	127°	140
	11°11'	123°	140	10°25'	124°	140	9°39'	125°	140	8°53'	125°	140	8°07'	126°	140	7°20'	127°	141	6°34'	127°	141	5°48'	128°	141
	11°48'	124°	140	11°02'	125°	141	10°15'	125°	141	9°29'	126°	141	8°42'	127°	141	7°56'	127°	141	7°09'	128°	141	6°22'	129°	141
													9°18'						7°44°			6°57°		

δ	16°			17°			18°			19°			20°			21°			22°			23°		
	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q	h	A	q
31	49°	174°	178	30°49'	174°	178	17°45'	175°	177	28°53'	175°	177	27°53'	175°	177	26°49'	175°	177	25°53'	175°	177	24°50'	175°	177
32	50°	175°	178	30°53'	175°	177	29°52'	175°	177	28°53'	175°	177	27°53'	175°	177	26°53'	175°	177	25°53'	175°	177	24°53'	175°	177
33	51°	176°	177	30°56'	176°	177	29°56'	176°	177	28°56'	176°	177	27°56'	176°	177	26°56'	176°	177	25°56'	176°	177	24°56'	176°	177
34	52°	177°	178	30°58'	177°	178	29°58'	177°	178	28°58'	177°	178	27°58'	177°	178	26°58'	177°	178	25°58'	177°	178	24°58'	177°	178
35	53°	178°	179	30°59'	178°	179	29°59'	178°	179	28°59'	178°	179	27°59'	178°	179	26°59'	178°	179	25°59'	178°	179	24°59'	178°	179
36	54°	179°	180	31°00'	180°	180	30°00'	180°	180	29°00'	180°	180	28°00'	180°	180	27°00'	180°	180	26°00'	180°	180	25°00'	180°	180
37																								
38																								
39																								
40																								
41																								
42																								
43																								
44																								
45																								
46																								
47																								
48																								
49																								
50																								

СКЛОНЕНИЕ РАЗНОИМЕННО С ШИРОТОЙ

$\varphi = 42^\circ$

Рис. 15

ния получены в § 7 разложением h и A в ряд Тейлора и сведены в табл. 1. В ВАС—58 учитываются все приращения высоты первой и второй степеней, но после упрощений. Запишем общую формулу для Δh , которая разделяется затем на три части. Рассматривая таблицу приращений, видим, что Δh_φ и $\Delta h_{\varphi\varphi}$, а также Δh_δ и $\Delta h_{\delta\delta}$ имеют одинаковые по структуре формулы и их можно объединить. Подчеркнутые пунктиром в табл. 1 сомножители членов Δh_{ij} с (*) можно заменить на ΔA_t , а с (**) — на ΔA_δ . Объединяя все члены формулы (17) в три группы и производя указанные замены, получим

$$\begin{aligned} \Delta h = & (\Delta h_\varphi + \Delta h_{\varphi\varphi}) + (\Delta h_\delta + \Delta h_{\delta\delta}) + \\ & + [\Delta h_t + \Delta h_{tt} + \Delta h_{\varphi t} + \Delta h_{\delta t}] + \{\Delta h_{\varphi\delta}\} = \\ = & \left(\cos A \Delta\varphi - \sin^2 A \operatorname{tg} h \frac{\Delta\varphi^2}{2} \operatorname{arc} 1' \right) + \\ & + \left(\cos q \Delta\delta - \sin^2 q \operatorname{tg} h \frac{\Delta\delta^2}{2} \operatorname{arc} 1' \right) + \\ & + \left[\cos \varphi \sin A \Delta t + \left(\Delta A_t \cos A \cos \varphi - \frac{\Delta t}{2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \Delta A_t \sin A \Delta\varphi + \Delta A_\delta \cos A \cos \varphi \Delta t \right) \operatorname{arc} 1' \right] - \\ & - \{ \Delta A_\delta \sin A \Delta\varphi \operatorname{arc} 1' \} \quad (32) \end{aligned}$$

или

$$\Delta h = \Delta h'_\varphi + \Delta h'_\delta + \Delta h'_t + \Delta h_{\text{доп.}}$$

В этой общей формуле поправок член в квадратных скобках еще значительно упрощается, остальные представляют рабочие формулы.

Устройство табл. 1 поправок. Первые два члена формулы (32), заключенные в круглые скобки, одинаковы, но с разными аргументами: в первой скобке — A и $\Delta\varphi$; во второй — q и $\Delta\delta$. Поэтому для них составлена одна общая табл. 1 поправок. Высота h входит во второй (малый) член этих формул, поэтому таблица составлена по зонам высот: $0-22^\circ$; $22-39^\circ$; ...; $71-73^\circ$. Свыше 73° табл. 1 неприменима. Для получения поправки $\Delta h'_\varphi$, объединяющей два члена разложения [см. формулу (32)]; в табл. 1 входят h , A и $\Delta\varphi$, а для получения поправки $\Delta h'_\delta$ — h , q и $\Delta\delta$. При положительных $\Delta\varphi$ ($\Delta\delta$) вход производится сверху и слева, при отрицательных — снизу и справа. Знаки по-

правок даны сверху и внизу колонок, но для контроля рекомендуется самому определить знаки поправок, исследуя первые члены рядов:

$$\Delta h_\varphi = \cos A \Delta\varphi \quad \text{и} \quad \Delta h_\delta = \cos q \Delta\delta.$$

При A (q) в первой четверти знаки поправок Δh одинаковы с $\Delta\varphi$ ($\Delta\delta$), во второй — обратны. Исключения возможны при A (q), равных 90° , когда действует второй член.

Кроме Δh , в табл. 1 помещены две колонки ΔA : одна для поправки $\Delta A_\varphi = \sin A \operatorname{tg} h \Delta\varphi$, имеющей те же аргументы, что и Δh_φ ; вторая — для ΔA_δ , имеющей общие аргументы с Δh_δ . Поэтому при выборке $\Delta h'_\varphi$ одновременно рядом выбирается ΔA_φ , знак ее одинаков с $\Delta\varphi$; аналогично при выборке $\Delta h'_\delta$ одновременно, но через колонку, выбирается ΔA_δ . Таким образом из одной табл. 1 выбирают четыре поправки.

Устройство табл. 2 поправок. Члены формулы (32), заключенные в квадратные скобки, после преобразований, допущений и сокращений, выполненных составителем таблиц В. И. Губановым, приведены к виду:

$$\Delta h'_t = -\Delta t \cos \left(\varphi_t + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \sin \left(A_c - \frac{\Delta A_t}{2} \right), \quad (33)$$

где через $\frac{\Delta\varphi}{2}$ и $-\frac{\Delta A_t}{2}$ учитываются вторые члены в квадратных скобках.

По формуле (33) вычислена табл. 2 — «Поправки высоты за часовой угол», составленная по зонам широт и помещенная в конце тома ВАС—58. В табл. 2 входят после получения A_c с аргументами: широта — средняя между φ_c и φ_t (практически ближайшая к $15'$ или $45'$); азимут счислимый и Δt . Иногда в соответствии с формулой (33) A_c подправляется на $-\frac{\Delta A_t}{2}$, что позволяет уточнить ближайшую строку по A табл. 2; это желательно выполнить при $\Delta A_t \geq 0,4^\circ$. Знак полученной поправки $\Delta h'_t$ обратен знаку Δt , как это видно из формулы (33).

Устройство табл. 3 «Дополнительная поправка высоты». Последний член формулы (32), заключенный в фигурные скобки, представляет член второй степени $\Delta h_{\varphi\delta}$, зависящий от ΔA_δ , A и $\Delta\varphi$. По этой формуле составлена

табл. 3, куда надо входить при $\Delta A_\delta > 0,2$ (практически при $\Delta A_\delta < 0,3^\circ$ ею пренебрегают). При ΔA_δ положительной вход в табл. 3 сверху и слева; при отрицательной — вход снизу и справа.

Вычисление высоты и азимута по таблицам ВАС—58. Подробный порядок расчета h_c и A_c приведен в инструкциях к таблицам ВАС—58, поэтому ограничимся разбором двух примеров с краткими замечаниями. Вычисления можно

производить по полной схеме, как в инструкциях ВАС—58 (пример 6), по сокращенной (пример 7), принятой на практике, и по схеме для перемещенного места, рассмотренной в практической части (§ 80).

Пример 6. Дано: $\varphi_c = 42^\circ 19,7' N$; $\delta = 21^\circ 36,2' S$; $t = 59^\circ 27,5' W$. Определить h_c и A_c .

Решение. Данные и табличные величины записываются в схему (на бланке или в тетради):

Данные	Табл.	Д — Г	h_T	$5^\circ 58,9'$	A_T	$127,0^\circ$	
$\varphi = 42^\circ 19,7' N$	42	+19,7'	$\Delta h'_\varphi$	—11,8'	ΔA_φ	+0,1°	$q_T = 140^\circ$ $A_{вх} = 126,6^\circ$
$\delta = 21^\circ 36,2' S$	22	—23,8	$\Delta h'_\delta$	+18,2	ΔA_δ	—0,3	
$t = 59^\circ 27,5' W$	59	+27,5	$\Delta h'_t$	—16,3	ΔA_t	—0,4	
			$\Delta h_{доп}$				
Разноименные φ и δ			h_c	$5^\circ 49,1'$	A_c	$126,4^\circ NW$	

Примечания. 1. Во вторую колонку вписываются ближайшие — до $30'$ — табличные значения аргументов, по которым из основных таблиц выбираются пять значений: h_T , A_T , q_T , знак ΔA_δ и ΔA_t (см. рис. 15 и схему). Интерполирование ΔA_t производится от $t = 59^\circ$ к $t = 60^\circ$; разность азимутов равна $-0,8^\circ$; $\Delta t = 27,5' \approx 0,5^\circ$, поэтому $\Delta A_t = \frac{-0,8^\circ}{10} 5 = -0,4^\circ$. Знак ΔA_δ получается сравнением A_T с колонкой 21° .

2. Поправка Δh_φ выбирается в первом диапазоне высот ($0-22^\circ$) входом сверху и слева (на правой странице), а поправка Δh_δ — снизу и справа (на левой странице), десятые доли — из таблиц (справа на полях). Для контроля правильности знаков Δh применяют приведенные выше правила. В данном случае A и q — во второй четверти, поэтому знаки Δh обратны $\Delta \varphi$ и $\Delta \delta$.

3. После выборок из табл. 1 вычисляется A_c и азимут входа $(A_{вх}) = A_c - \frac{\Delta A_t}{2} = 126,4^\circ - \frac{-0,4^\circ}{2} = 126,6^\circ$.

4. В табл. 2 входят с $\varphi_T + \frac{\Delta \varphi}{2} \approx 42^\circ 15'$; $A_{вх} = 126,6^\circ$ (между строк) и $27'$. Получаем $\Delta h_t = 16,0'$ и на полях $0,3'$, всего $16,3'$.

5. В табл. 3 входим снизу ($-0,3^\circ$) и справа (127°) и $\Delta \varphi = +19'$; получаем $\Delta h_{доп} = +0,1'$.

При вычислении в тетради (без бланков) удобнее применять сокращенную схему, в которой опущены первая колонка и обозначения. В дальнейшем будет применяться сокращенная схема (пример 7).

Пример 7. Дано: $\varphi = 40^\circ 32,5' S$; $\delta = 22^\circ 24,8' S$; $t = 11^\circ 38,4' W$. Определить h_c и A_c .

Решение.

	$68^\circ 28,2'$	$148,3^\circ$	
$\varphi = 41^\circ - 27,5' S$	+23,3'	—0,6°	$q = 25^\circ$ (147,6°)
$\delta = 22^\circ + 24,8 S$	+22,4	—0,5	
$t = 12^\circ - 21,6 W$	+8,7	+0,8	
	—0,1		
Одноименны	$h_c = 69^\circ 22,5'$	$A_c = 148,0^\circ SW$	

По таблицам ВАС—58 можно решать и ряд других задач, например отыскание элементов дуги большого круга, а также получать скорости изменения высот, азимутов и т. п.

Достоинствами табл. ВАС—58 являются: экономия вычислительного труда при обработке большого числа линий; возможности сокращения вычислений путем перемещения места; достаточная точность при высотах до 73° ; возможность приближенного контроля на промахи в начале решения; возможность получения дополнительной информации. Можно считать, что таблицы ВАС—58 — лучшие из современных таблиц, поэтому они и приняты за основные. Вместе с тем им свойственны ограничения и недостатки, которые надо знать. Это: сложность таблиц поправок, что требует значительной тренировки при освоении и после перерыва; отсутствие некоторых диапазонов склонения, например 30° , вследствие чего надо применять двойной вход в табл. I (с $\Delta\delta_1 = 30'$ и $\Delta\delta_2$, равным остатку) или прием замены переменных, большой объем таблиц, сложность применения при высотах, больших 73° , вследствие чего в этих случаях рекомендуются таблицы ТВА—57.

Иностранные численные таблицы. Таблицы счислимых высот и азимутов: американские НО-214, английские НД-468 и др. Таблицы НО-214 изданы гидрографией США в девяти томах по зонам широт в 10° . Основные таблицы сходны с ВАС—58, но шаг склонений равен $30'$, а для разноименных φ и δ отведена правая страница, поэтому объем их в два раза больше ВАС—58.

Поправки высот учитывают только первые степени Δh в соответствии с формулой (22). Для азимута поправки вообще не предусмотрены, хотя и могут получаться линейным интерполированием. Поправки высот добавляются к h_T , т. е.

$$h_c = h_T + \Delta h_\delta + \Delta h_t + \Delta h_\varphi = h_T + \Delta\delta \overline{\Delta d} + \Delta t \overline{\Delta t} + \Delta\varphi \cos A, \quad (34)$$

где $\overline{\Delta d}$ и $\overline{\Delta t}$ — выбираются из основных таблиц вместе с h_T и A_T и перемножаются с $\Delta\delta = \delta - \delta_T$ и Δt по таблице на последней странице книги.

Величина $\Delta h_\varphi = \Delta\varphi \cos A$ определяется по соседней таблице в конце книги. Там же приведено правило знаков. Знаки поправок Δh_δ и Δh_t определяются из основных таблиц сравнением h_T с соседними значениями.

Таблицы НО-214 и аналогичные им английские НД-486, самые распространенные за рубежом, позволяют очень быстро определить h_c и A_c , но точность их несколько ниже, чем ВАС—58, особенно при $h > 50^\circ$.

Пример 8. Дано: $\varphi = 35^\circ 34.8' S$; $\delta = 16^\circ 26.8' N$; $t = 44^\circ 38.6' E$. Определить h_c и A_c по табл. НО-214.

Решение.

	h_T	$22^\circ 25.8'$	
$\varphi = 36^\circ - 25.2'$		$+17.2'$	$\overline{\Delta d} = 78$ } Из основных таблиц: $\overline{\Delta t} = 60$ } тем же и знаки поправок
$\delta = 16^\circ 30' - 3.2'$		$+2.5'$	
$t = 45^\circ - 21.4'$		$+12.8'$	
Разноименные	h_c	$22^\circ 58.3'$	$A_T = A_c = S \ 132.9^\circ E = 47.1^\circ$

Примечание. По ВАС—58 имеем $h_c = 22^\circ 58.2'$, $A_c = 47^\circ 0'$. Авиационные таблицы НО-249 рассмотрены в § 82.

О точности вычисления высот и азимутов. Ошибки в счислимой высоте складываются из ошибок в аргументах, ошибок расчетной формулы и таблицы или прибора и ошибок вычислений при работе с ними.

Ошибки в аргументах вызывают ошибку в высоте в среднем порядка $\pm 0.05'$. Ошибки расчетных формул могут быть охарактеризованы следующей

таблицей теоретических средних квадратичных ошибок в вычисленных высотах (табл. 2).

Экспериментальная проверка подтверждает эти величины для ТВА и ВАС, но для первых двух формул дает несколько большие ошибки. Точность вычисления азимута по ВАС—58 около $\pm 0.1^\circ$, а по всем остальным таблицам — около $\pm 0.1'$.

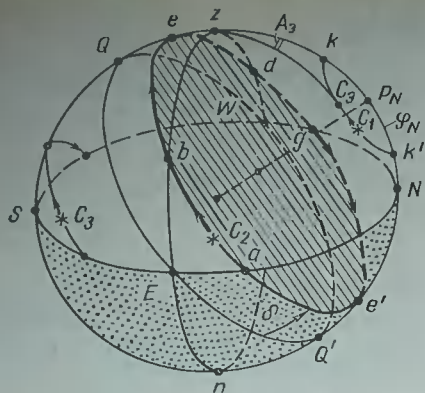


Рис. 17

вектор ω для данного наблюдателя M на две составляющие:

$\omega_1 = \omega \cos \varphi$ — горизонтальная составляющая земного вращения — дает наклон плоскости горизонта;

$\omega_2 = \omega \sin \varphi$ — вертикальная составляющая земного вращения — дает поворот горизонта вокруг отвесной линии.

Эти формулы применяются в гиро-скопии. Они, в частности, позволяют анализировать движение горизонта, например: в $\varphi = 0^\circ$ $\omega_1 = \omega$; $\omega_2 = 0$; в $\varphi = 90^\circ$ $\omega_1 = 0$; $\omega_2 = \omega$.

Видимое суточное движение светил. Построим около центра Земли O вспомогательную небесную сферу (см. рис. 16) и нанесем на нее линии и точки наблюдателя M и места светил C_1 , C_2 . Если принять, что Земля и наблюдатель M неподвижны, а небесная сфера вращается в обратном направлении с E на W , то получим ту же картину движения светил, которую видит наблюдатель M в действительности (ему кажется, что Земля и он неподвижны, а светила движутся).

Движение светил представляем теперь как следствие суточного вращения сферы и называем *суточным движением светил*. Это лишь кажущееся видимое движение светил вследствие вращения Земли, но такое представление удобнее для решения задач.

При суточном вращении сферы отвесная линия, горизонт и меридиан наблюдателя M остаются неподвижными, светила же вместе со сферой движутся. Так как суточное вращение сферы происходит вокруг оси мира $P_N P_S$ с E на

W , то все светила будут описывать малые круги — параллели, плоскости которых перпендикулярны оси мира: они называются *суточными параллелями светил*. Например, светило C_2 (рис. 17) описывает параллель $e'e$, светило C_1 — параллель $k'k$ и т. п. Положение же параллели, как известно, определяется величиной и знаком склонения светила.

Светило в суточном движении занимает ряд характерных положений, например для светила C_2 имеем a , b , e , d , g , e' , которым присвоены названия.

Истинным восходом и заходом светила называются точки пересечения светил E и W частей истинного горизонта, например точки параллели a и g .

Положением светила на первом вертикале называется пересечение его центром E или W частей первого вертикала, например в точках параллели b и d .

Кульминацией светила называется пересечение центром светила меридиана наблюдателя. Кульминация называется *верхней*, если светило пересекает полуденную часть меридиана (наивысшая точка e параллели светила), и *нижней*, если светило пересекает полуночную часть меридиана (низшая точка e' параллели).

Светило может не пересекать первый вертикал (например, светило C_1 на рис. 17), тогда оно дальше всего отходит от меридиана в элонгации.

Элонгацией светила называется такое положение светила, в котором удаление центра его от меридиана наибольшее. Например, проведя вертикал, касательный к параллели $k'k$, получим точку S , восточной элонгации, в которой азимут светила наибольший (A_3). Кульминации такого светила (верхняя и нижняя) происходят в одном азимуте N или S .

Примечание. Кроме рассмотренной элонгации по азимуту, термин элонгация применяется также к наибольшему удалению на сфере нижней планеты от Солнца, например восточная или западная элонгация Венеры.

Для наблюдателя, находящегося в южной широте, суточное движение происходит аналогично рассмотренному — с E на W , но полуденная часть меридиана — северная, и движение светил в надгоризонтной части происходит против часовой стрелки (см. рис. 19).

Условия прохождения светилом характерных точек. Изобразим сферу для наблюдателя в φ_N на плоскости меридиана наблюдателя и напечатаем суточные параллели светил C_1-C_7 (рис. 18) с различными склонениями.

Часть параллелей пересекает горизонт — эти светила восходят и заходят; другие параллели пересекают первый вертикал или проходят через точки z , N , S и др. Из рис. 18 видно, что положение параллели относительно горизонта определяется соотношением δ и φ .

Условие восхода или захода светила. Чтобы светило пересекало истинный горизонт, его склонение должно быть меньше $\angle Q'N$ или $\angle QS$. Так, для светила C_4 имеем $\delta < Q'N$, для C_5 — $\delta < QS$. Но $Q'N = QS = 90^\circ - \varphi$.

Следовательно, условием восхода и захода светила в данной широте независимо от наименования δ и φ является неравенство

$$|\delta| < 90^\circ - \varphi. \quad (35)$$

На рис. 18 светила C_3 и C_6 лишь касаются горизонта в точках N и S . Их параллели являются как бы пограничными: для них $\delta = 90^\circ - \varphi$. Условием прохождения светила через точку N является $\delta_N = 90^\circ - \varphi$; через точку S — $\delta_S = 90^\circ - \varphi$.

К северу от параллели C_3 расположатся светила, не заходящие в данной широте, для них $\delta > 90^\circ - \varphi$ и одноименно с φ . К югу от параллели C_6 расположатся светила, не восходящие в данной широте, т. е. невидимые наблюдателю; для них $\delta > 90^\circ - \varphi$ и разноименно с φ . Например, для Ленинграда $\varphi = 60^\circ N$ и все светила с $\delta < 90^\circ - \varphi = 30^\circ$ восходят и заходят; светила с $\delta_N > 30^\circ$, например созвездие Б. Медведицы, находятся всегда над горизонтом (незаходящие); светила с $\delta_S > 30^\circ$, например звезда Канопус ($\delta = 52^\circ 41' S$) находятся всегда под горизонтом; звезда α Южной Рыбы с $\delta \approx 30^\circ S$ проходит почти через точку S и т. д.

Условия пересечения светилом надгоризонтальной части первого вертикала. Из рис. 18 видно, что первый вертикал, который совпадает с линией zn , пересекают те светила, у которых

склонение меньше дуги Qz , равной широте, например светило C_4 , у которого $\delta < Qz$. Светило C_6 также пересекает первый вертикал, так как $\delta < \varphi$, но в подгоризонтной части. Следовательно, условием пересечения надгоризонтной части первого вертикала является неравенство

$$\delta < \varphi \text{ и одноименно с } \varphi. \quad (36)$$

Светило же C_1 , для которого $\delta > \varphi$, не пересекает первый вертикал.

Условие прохождения светила через зенит. На рис. 18 через зенит проходит параллель светила C_2 , его склонение $\delta = Qz = \varphi_N$, наименование δ одноименно с широтой, следовательно, условием прохождения светила через зенит является равенство

$$\delta = \varphi \text{ и одноименно с } \varphi. \quad (37)$$

Через надир светило проходит при $\delta = \varphi$ и разноименных.

Самая южная точка СССР расположена у г. Кушка ($\varphi \approx 35^\circ 10' N$), самая северная точка материка — на м. Челюскин ($\varphi \approx 77^\circ 30' N$), следовательно, Солнце, а также Луна у нас через зенит проходить не могут, так как наибольшее $\delta_{\odot} = 23,5^\circ N$, а $\delta_{\text{л}} = 28,7^\circ N$; через зенит у нас проходят только звезды с $\delta = \varphi_N$.

Последовательность прохождения видимыми светилами частей горизонта. Восход светила всегда происходит на E половине сферы, но часть горизонта, где это произойдет, зависит от склонения

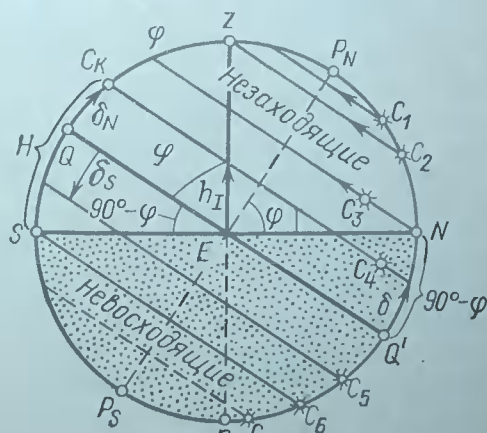


Рис. 18

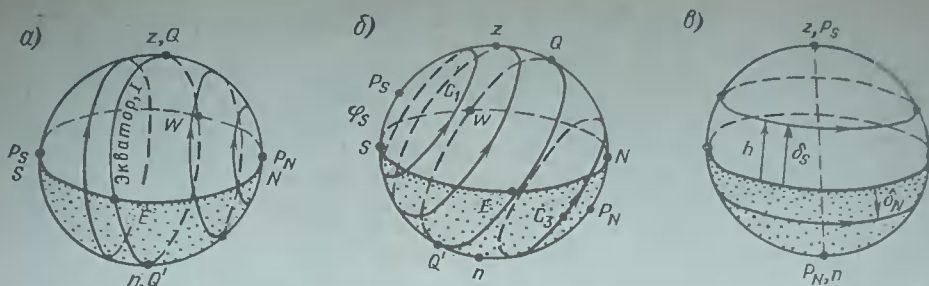


Рис. 19

светила. Рассматривая движение по азимуту, светила можно разделить на три группы:

со склонениями одноименными и большими, чем широта (C_1 на рис. 17, 18); они движутся только в двух четвертях (NE, NW — на рис. 17; SE, SW — на рис. 19, б);

со склонениями одноименными, но меньшими, чем широта (C_2 на рис. 17); они движутся во всех четырех четвертях: NE, SE, SW, NW;

со склонениями разноименными, но меньшими $90^\circ - \varphi$ (C_3 на рис. 17); они движутся над горизонтом в двух четвертях (на рис. 17 SE, SW; на рис. 19 NE, NW).

На этом разделении построено правило наименования четвертного азимута, приведенное в МТ-75 (с. 17), применительно к первой и второй системам формул для расчета h и A .

Суточное движение в разных широтах. Положение суточной параллели светила меняется с изменением широты места. На рис. 19 видно, как при перемещении наблюдателя с экватора в среднюю (южную) широту и на южный полюс постепенно уменьшается наклон параллелей к горизонту. В $\varphi = 0^\circ$ (рис. 19, а) параллели перпендикулярны горизонту и делятся им пополам: все светила восходят и заходят, так как $\delta < 90^\circ$, но ни одно не пересекает первого вертикала, только светило $\delta = 0^\circ$ движется по первому вертикалу, который совпадает с экватором. В промежуточной широте (см. рис. 19, б; $\varphi = 30^\circ S$) параллели наклонены к горизонту на угол $90^\circ - \varphi$: часть светил восходит и заходит ($\delta < 90^\circ - \varphi$), есть незаходящие и невосходящие светила, часть све-

тил пересекает первый вертикал, одно проходит через зенит ($\delta = \varphi$).

На южном полюсе в $\varphi = 90^\circ S$ (рис. 19, в) повышенный полюс совпадает с зенитом, горизонт — с экватором, параллели — с альмукантатами, светила движутся параллельно горизонту, высота h всегда равна δ ; светила с δ_N невидимы, остальные не заходят. Для наблюдателя на полюсе характерно отсутствие меридиана, первого вертикала и точек N, E, S, W горизонта. Все направления для P_S будут на N , а для P_N — на S .

Преобразование координат в частных положениях светил. Вследствие суточного движения положение светила относительно горизонта и меридиана наблюдателя непрерывно изменяется. Светило проходит ряд частных положений (см. рис. 17), в которых одна из его координат становится известной. Например, в верхней кульминации (e) часовой угол светил равен нулю, в нижней (e') — 180° , на первом вертикале $A = 90^\circ$, при истинном восходе $h = 0^\circ$ и т. д. Для частных случаев решение задач на преобразование координат упрощается.

Кульминация светила. В момент верхней кульминации светило находится на меридиане наблюдателя, поэтому его $t = 0^\circ$; $A = 180^\circ$ (0°) и $q = 0^\circ$ (180°).

Светило C_1 (см. рис. 18) в верхней кульминации (C_N) имеет меридиональную высоту H , склонение его δ_N , а дуга QS равна $90^\circ - \varphi$, поэтому формула для меридиональной высоты имеет вид:

$$H = 90^\circ - \varphi + \delta. \quad (32)$$

Решая эту формулу относительно φ , получим также формулу для определения широты

$$\varphi = Z + \delta, \quad (39)$$

где Z и δ приписываются их наименования; если они одноименны, то величины складываются, если разноименны — вычитаются.

§ 11. ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ СВЕТИЛ ВСЛЕДСТВИЕ ВИДИМОГО СУТОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ

Примем, что суточное вращение сферы происходит равномерно (о неравномерностях вращения Земли упоминалось в § 9, учет их показан в § 27), и выясним, какие из координат светил изменяются вследствие суточного движения. Вращение сферы оценивается по смещению какой-либо точки или светила от неподвижного меридиана наблюдателя, т. е. востовым часовым углом (рис. 20). Поэтому при равномерном вращении сферы часовые углы светил также изменяются равномерно, пропорционально повороту сферы или — приближенно — пропорционально времени¹. Склонение светила отсчитывается от экватора до параллели, которая является суточным путем светила, поэтому в суточном движении δ не меняется. Прямое восхождение светила отсчитывается по экватору от точки Овна, но она связана со сферой и участвует в ее суточном вращении, поэтому α не меняется. Следовательно, в суточном движении из экваториальных координат меняются только часовые углы; δ и α не меняются; этим объясняется их удобство для составления звездных карт. Высота и азимут светила при его движении по параллели aa_1 (см. рис. 20) изменяются. Вследствие того, что часовой угол светила меняется равномерно, примем t за независимую переменную и найдем приращения горизонтальных координат Δh и ΔA в функции от приращения Δt часового угла. Светило S в суточном движении перемещается по параллели aa_1 и занимает положения $C, C_1, \dots$. Проводя меридианы PC и PC_1 , видим, что t в полукруговом счете изменился на вели-

Пример 9. Измерена $H_{\odot} = 37^{\circ}28,4' S$; $\delta = 12^{\circ}13,8' S$. Определить широту места φ .
Решение. $Z = 90^{\circ} - H = 52^{\circ}31,6' N$ (привела наименования H и Z см. в § 2); $\varphi = Z + \delta = 52^{\circ}31,6' N - 12^{\circ}13,8' S = 40^{\circ}17,8' N$.

чину $+\Delta t$. Построив вертикалы zC и zC_1 , видим, что высота изменилась от h до h_1 на величину $-\Delta h$, а азимут в полукруговом счете — на величину $-\Delta A$.

Графический вывод формул изменения высоты и азимута. Изменение высоты. Проведя альмукантарат CD на рис. 20, получим на сфере малый ΔCDC_1 , в котором $C_1D = -\Delta h$, угол C равен q ; гипотенуза CC_1 и катет DC_1 являются дугами малых кругов, которые меньше соответствующих дуг больших кругов в $\cos \delta$ и $\cos h$ раз (см. приложение 1.1). На этом основании имеем:

$$CC_1 = \Delta t \cos \delta \quad (*)$$

и

$$CD = -\Delta A \cos h. \quad (**)$$

Принимая ΔCDC_1 за плоский, найдем C_1D :

$$C_1D = CC_1 \sin q$$

или, подставляя вместо CC_1 формулу (*), получим

$$-\Delta h = \Delta t \cos \delta \sin q. \quad (40)$$

Заменим δ и q более удобными для анализа координатами, для чего к парал-

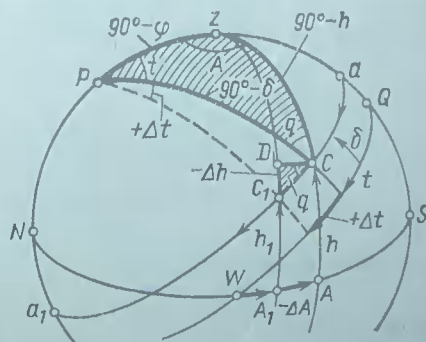


Рис. 20

¹ Изменение часового угла во времени включает еще учет собственного движения светила и движения наблюдателя на Земле (см. § 85). Вследствие этого изменение можно считать пропорциональным времени только за малый промежуток времени.

лактическому ΔPzC применим формулу синусов:

$$\frac{\sin q}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \frac{\sin A}{\sin(90^\circ - \delta)}$$

или

$$\sin q \cos \delta = \sin A \cos \varphi.$$

Подставляя это выражение в формулу (40), получим окончательно

$$\Delta h = -\sin A \cos \varphi \Delta t. \quad (41)$$

Вследствие сделанных допущений эта формула справедлива только при достаточно малых Δt ; более точную формулу получим ниже с помощью рядов.

Примечание. При круговом счете азимутов и часовых углов формула (41) имеет вид

$$\Delta h = \sin A \cos \varphi \Delta t,$$

где величину $\sin A$ надо исследовать на знаки, а Δt всегда положительно.

Изменение азимута. Из малого ΔCDC_1 имеем

$$CD = CC_1 \cos q.$$

Заменяя CD и CC_1 выражениями (**) и (*), получим:

$$-\Delta A \cos h = \Delta t \cos \delta \cos q$$

или

$$\Delta A = -\cos \delta \cos q \sec h \Delta t. \quad (42)$$

Заменим координаты δ и q на горизонтные, для чего в параллактическом ΔPzC (см. рис. 20) применим формулу пяти элементов к углу q :

$$\cos q \sin(90^\circ - \delta) = \sin(90^\circ - h) \cos(90^\circ - \varphi) - \cos(90^\circ - h) \sin(90^\circ - \varphi) \cos A.$$

После упрощений получим

$$\begin{aligned} \cos q \cos \delta &= \cos h \sin \varphi \\ -\sin h \cos \varphi \cos A & \end{aligned} \quad (43)$$

Подставляя в выражение (42) вместо $\cos q \cos \delta$ правую часть формулы (43), имеем

$$\Delta A = -\frac{\cos h \sin \varphi - \sin h \cos \varphi \cos A}{\cos h} \Delta t;$$

после деления на $\cos h$ получим окончательно

$$\Delta A = -(\sin \varphi - \operatorname{tg} h \cos A \cos \varphi) \Delta t. \quad (44)$$

Эта формула справедлива лишь при достаточно малых Δt .

Примечание. При круговом счете азимутов и t формула (44) имеет знак «+» в северной широте и «-» в южной.

Вывод формул Δh и ΔA с помощью рядов Тейлора. Применим ряд Тейлора для отыскания приращений Δh и ΔA в функции часового угла

$$\left. \begin{aligned} \Delta h &= \frac{\partial h}{\partial t} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \Delta t^2 + \dots \\ \Delta A &= \frac{\partial A}{\partial t} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \Delta t^2 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Эти ряды представляют частный случай формул (15), (16) из § 7, причем для ΔA обычно ограничиваются первым членом. Производные $\frac{\partial h}{\partial t}$, $\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}$ и $\frac{\partial A}{\partial t}$ получены в том же § 7 [формулы (21), (30), (26)]. Здесь первые производные представляют скорости изменения высоты и азимута в суточном движении (ω_h и ω_A), а вторые — ускорения. Подставляя их значения в ряды (45), получим

$$\begin{aligned} \Delta h &= -\cos \varphi \sin A \Delta t + \\ &+ \cos \varphi \cos A \cos \delta \cos q \operatorname{sech} \frac{\Delta t^2}{2} \end{aligned} \quad (46)$$

и

$$\Delta A = -\cos q \cos \delta \sec h \Delta t,$$

или, с учетом формулы (43).

$$\Delta A = -(\sin \varphi - \operatorname{tg} h \cos A \cos \varphi) \Delta t. \quad (47)$$

Очевидно, формула (46) представляет уточненную формулу (41), а формула (47) та же, что (44). Ошибки формул обычно оцениваются величиной отброшенных членов ряда (45).

Исследование формулы (46) изменения высоты. 1. Приращение высоты зависит от положения светила по азимуту. Выясним, при каких A высота светила изменяется быстрее. На первом вертикале ($A = 90^\circ$ или 270°) $\cos A = 0$, т. е. ускорение $\omega_h' = 0$ и второй член формулы также равен нулю, а скорость $\omega_h = \pm \cos \varphi$ — наибольшая и $\Delta h = \pm \cos \varphi \Delta t$. На меридиане $A = 0$; 180° скорость $\omega_h = 0$, $\Delta h_1 = 0$, а ускорение — наибольшее и $\Delta h_{II} = \pm \cos \varphi \times \cos \delta \sec H \frac{\Delta t^2}{2}$.

Следовательно, на первом вертикале высота изменяется быстро и равномерно, в самой кульминации — не меняется, а около — меняется медленно и неравномерно. Практически это означает, что около первого вертикала можно ос-

реднять серии высот за большой Δt , а около меридиана — за малый Δt .

2. Приращение высоты зависит от широты места. При $\varphi = 90^\circ$ имеем $\Delta h = 0$, т. е. на полюсах высоты не меняются. При $\varphi = 0^\circ$ Δh может иметь наибольшее значение (при $A = 90^\circ$), равное изменению часового угла, т. е. $\Delta h = -\Delta t$. Следовательно, приращение высоты меняется от 0 до $\pm \Delta t$.

Практическое применение формулы изменения высоты. Выразим в первом члене формулы (46) Δh в угловых минутах ($'$), а Δt — во временных секундах (c). Учитывая, что $1' = 4^c$, получим практическую формулу:

$$\Delta h_i' = 0,25 \cos \varphi \sin A \Delta t^c. \quad (48)$$

По этой формуле, умноженной на 10, составлена табл. 17 МТ—75. Эти таблицы применяются при контроле серии наблюдений по разностям и при приведении высот к одному моменту. Формула (46) применена также в табл. 2 ВАС—58.

Пример 10. $\varphi = 43^\circ 50' N$; $A = 30,5^\circ SE$; $\Delta t = 1^m 21^c = 81^c E$ (с «—»). Определить Δh .

Решение. Из табл. 17 МТ—75 имеем Δh за $10^c = 0,90'/c$; $\Delta h' = (-0,90)(-8,1) = +7,3'$.

Исследование формул изменения азимута. Установим, на каких участках суточного пути азимут изменяется быстрее. При $A = 180^\circ$ в формуле (47)

внутри скобок получится «+», а при $A = 90^\circ$ второй член равен нулю. Следовательно, азимут меняется быстрее около верхней кульминации. Отсюда вытекает следствие — для получения наибольшей разности азимутов, например Солнца, его надо наблюдать до и после кульминации (т. е. в φ от SE до SW). Медленнее всего азимут изменяется от восхода до первого вертикала, а в элонгации — не меняется.

Установим, как влияет на ΔA широта места. При $\varphi = 90^\circ$ $\Delta A = -\Delta t$, а при $\varphi = 0^\circ$ $\Delta A = \operatorname{tg} h \cos A \Delta t$ (при $A = 180^\circ$ $\Delta A = \operatorname{tg} H \Delta t$). Следовательно, на экваторе и в тропиках азимут меняется крайне неравномерно — от 0 до мгновенного изменения на 180° (при $H = 90^\circ$), а на полюсе — равномерно, так же, как Δt .

Практическое применение формулы ΔA . В МТ—75 приведена табл. 18 для изменения азимута за 10^c времени, рассчитанная по формуле

$$\Delta A_i' = -0,25 (\sin \varphi - \operatorname{tg} h \cos A \cos \varphi) \Delta t^c, \quad (49)$$

умноженной на 10. По этой таблице можно получить скорость изменения азимута ω_A в данный момент. В МТ—63 табл. 15-г дает $\Delta A'$ за 1^m .

Примечание. Практически удобнее для наших задач ω_A получать по таблицам ВАС—58.

Глава 4. ОБРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ВОКРУГ СОЛНЦА. ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА

§ 12. ПОНЯТИЕ О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ СВЕТИЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Основные кинематические особенности движения планет были впервые отмечены в законах Кеплера (1571—1630) и затем получили динамическое объяснение и были дополнены Ньютоном (1643—1727) на основе законов механики и закона всемирного тяготения.

Закон всемирного тяготения формулируется так: две материальные частицы взаимно притягиваются с силой F , прямо пропорциональной произведению их масс M и m и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними, т. е.

$$F = f \frac{Mm}{r^2} = k^2 \frac{Mm}{r^2}, \quad (50)$$

где f — постоянная тяготения;
 k — Гауссова гравитационная постоянная (0,01720...), при которой массы выражаются в долях массы Солнца, а расстояния — в астрономических единицах (1 а. е. — среднее расстояние от Солнца до Земли — 149,6 млн. км).

Космические тела в поле тяготения центрального тела, например Солнца, движутся по траекториям, называемым орбитами.

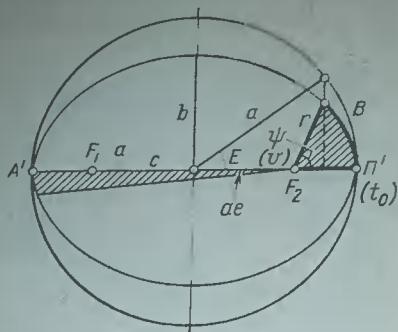


Рис. 21

Законы Кеплера. 1. Орбиты планет есть эллипсы, в одном из фокусов которых находится Солнце. Радиус-вектор точки эллипса (рис. 21) выражается формулой:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \psi}, \quad (51)$$

где p — параметр эллипса, равный $\frac{b^2}{a}$;

e — эксцентриситет, равный $\frac{b}{a} =$

$$= \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}.$$

2. Площади, описываемые радиусом-вектором планеты в равные промежутки времени, равны (см. рис. 21)

$$r^2 \frac{d\psi}{dt} = c, \quad (52)$$

где c — момент количества движения точки единичной массы.

Этот закон учитывает неравномерность движения данной планеты по ее

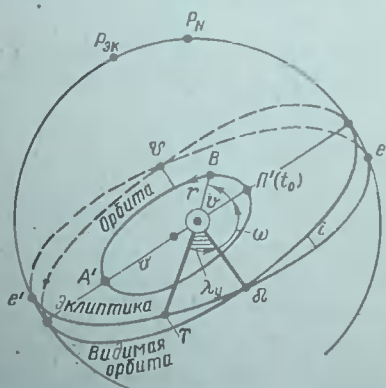


Рис. 22

орбите: ближе к Солнцу планеты движутся быстрее, дальше — медленнее.

3. Квадраты звездных периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит. Этот закон показывает, что более близкие к Солнцу планеты имеют большие средние орбитальные скорости, чем более удаленные; например Меркурий имеет $v = 48$ км/с, Венера — 35 км/с, а Плутон — около 5 км/с.

Ньютон показал, что законы Кеплера в общем виде относятся ко всем космическим телам и действуют в любом поле тяготения и что эти законы должны учитывать массы и скорости тел. Формула (51) для радиуса-вектора была выведена Ньютоном из закона всемирного тяготения в общем виде (как уравнение конического сечения с e от 0 до ∞). Из нее следовало, что в центральном поле тяготения орбитами космических тел являются конические сечения: в зависимости от скорости движения тело может описывать эллипс, параболу или гиперболу. Орбитальные скорости определяются из интеграла энергии:

$$v^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right), \quad (53)$$

где $\mu = G(M + m)$.

Анализ этой формулы показывает, что:

при $v^2 < \frac{2\mu}{r}$ орбита тела — эллипс ($e < 1$);

при $v^2 = \frac{2\mu}{r}$ орбита тела — парабола ($e = 1$);

при $v^2 > \frac{2\mu}{r}$ орбита тела — гипербола ($e > 1$);

при $a = r$, $e = 0$; $v_r = k \sqrt{\frac{M + m}{r}}$ орбита тела — круговая.

Эти закономерности распространяются и на движение искусственных спутников, для которых разделение орбит показано на рис. 40, § 21.

Понятие об определении положения планеты на орбите и ее координатах.

Элементы орбиты. Положение планеты и особенности ее эллиптической орбиты (которая для упрощения заменяется ее проекцией на небесную сферу — видимой орбитой) определяют шесть элементов орбиты (рис. 22): i — наклонение плоскости орбиты к эклиптике;

λ_H — долгота (гелиоцентрическая) восходящего узла орбиты;
 ω — угловое расстояние перигелия от узла;
 a — большая полуось орбиты (определяет период обращения T);
 e — эксцентриситет орбиты [см. рис. 21 и формулу (51)];
 t_0 — момент прохождения через перигелий P' .

Эти величины меняются, поэтому их значения принимаются на эпоху t_0 .

Положение планеты на орбите. Пропирировав уравнение (52), после преобразования получим уравнение Кеплера:

$$E = M + e \sin E, \quad (54)$$

где M — средняя аномалия, равная $n(t - t_0)$, причем $n = \frac{2\pi}{T}$ — суточное перемещение светила, а T — период обращения; t — данный момент; E — эксцентрическая аномалия (см. рис. 21), которая вычисляется последовательными приближениями. Далее, из формулы (51) получается выражение для радиуса-вектора:

$$r = a(1 - e \cos E). \quad (55)$$

Наконец, из рис. 21, где угол φ надо заменить на v , получается истинная аномалия:

$$\cos v = \frac{a(\cos E - e)}{r}; \quad \sin v = \frac{a\sqrt{1-e^2} \sin E}{r} \quad (56)$$

Положение тела B на орбите относительно перигелия P' определяется величинами v и r .

Понятие о получении координат планеты. По элементам орбиты v , r вычисляются гелиоцентрические прямоугольные координаты x , y , z . Складывая их с такими же координатами Земли (они представляются как геоцентрические координаты Солнца и приводятся в астрономическом ежегоднике или вычисляются), получим координаты X' , Y' , Z' планеты относительно Земли; по ним получаются эклиптические координаты λ и β и экваториальные координаты α и δ планеты. Возмущения от больших планет учитываются поправками к λ и β , а нутация и абберрация — поправками к α и δ . Эти вычисления производятся теперь на судовых ЭВМ, поэтому надо знать их общий порядок и терминологию.

§ 13. ОБРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ И ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА

Помимо вращения вокруг оси, Земля, как и все планеты, обращается по эллиптической ($e = 0,0167$) орбите вокруг Солнца (рис. 23) в направлении суточного вращения, причем ее ось $p_n p_s$ наклонена к плоскости орбиты на угол $66^\circ 33'$, сохраняющийся в процессе обращения (без учета возмущений). Движение Земли по орбите происходит неравномерно, что отражено во втором законе Кеплера (см. § 12). Быстрее всего Земля движется в перигелии (точка P' на рис. 23), где $v = 30,3$ км/с, который она проходит около 4 января; медленнее всего — в афелии (точка A' на рис. 23), где $v = 29,2$ км/с, который она проходит около 4 июля. Вследствие этого участки орбиты $III-IV-I$ Земля проходит быстрее, а участки $I-II-III$ — медленнее. Средняя орбитальная скорость 29,76 км/с у Земли бывает около равенств I и III). Орбитальное движение вызывает изменение направлений на светила для наблюдателя, находящегося на поверхности Земли. Вследствие этого положение светил на сфере должны изменяться, т. е. светила, помимо суточного движения со сферой, должны иметь еще и видимые собственные движения по сфере.

Рассмотрим, как изменяется место Солнца на сфере вследствие орбитального движения Земли и связанные с этим явления. Построим небесную сферу при центре Солнца (знак его $\odot$), так, чтобы орбита Земли (знак ее $\oplus$) оказалась внутри сферы (см. рис. 23). С Земли в положении I Солнце видно в направлении, показанном стрелкой, и проектируется на сферу в точку I' . Если в положении I Земля будет 21 марта,

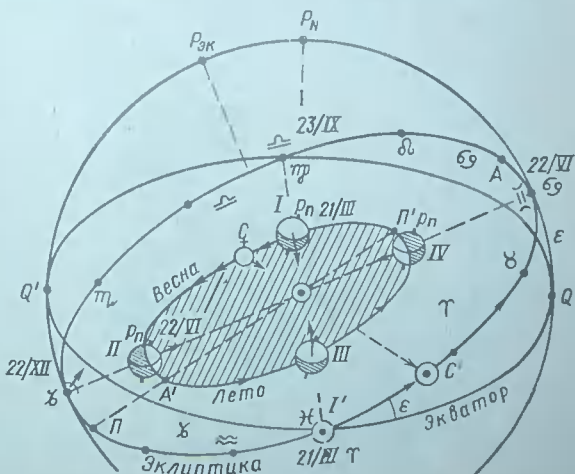


Рис. 23

Таблица 3

Дата	Точка эклиптики	Обозначение	$\delta_{\odot}$	$\alpha_{\odot}$
21 III	Весеннего равноденствия	γ	0°	0°
22 VI	Летнего солнцестояния	ϵ	$23,5^{\circ} N$	90°
23 IX	Осеннего равноденствия	ζ	0°	180°
22 XII	Зимнего солнцестояния	η	$23,5^{\circ} S$	270°

то точка I' совпадает с точкой Овна (γ). При перемещении Земли в положение C наблюдателю на ее поверхности кажется, что Солнце переместилось по сфере в положение C' в ту же сторону, что и Земля по орбите. Это движение Солнца по сфере, наблюдаемое с Земли в течение года, называется видимым годовым движением Солнца; оно происходит в сторону суточного и орбитального движения Земли, т. е. является прямым движением. Из точек II, III, IV на орбите Земли Солнце проектируется на сферу соответственно в точки ϵ , ζ , η ; все эти точки лежат на общем большом круге сферы — эклиптике.

Эклиптикой называется большой круг небесной сферы, по которому происходит видимое годовое движение Солнца. Плоскость этого круга совпадает (или параллельна) с плоскостью орбиты Земли, поэтому эклиптика представляет проекцию орбиты Земли на небесную сферу (точнее проекцию центра тяжести системы Земля—Луна). Эклиптику можно нанести на сферу по координатам Соли

ца α и δ , как это сделано на звездном глобусе или карте. Выше (см. § 2) было отмечено, что эклиптика, как всякий большой круг, имеет ось $P_{\text{эк}}P'_{\text{эк}}$, перпендикулярную плоскости орбиты Земли, и полюса эклиптики: северный $P_{\text{эк}}$ и южный $P'_{\text{эк}}$. Вследствие того что ось Земли $p_N p_S$ сохраняет направление в пространстве, угол ϵ между осью мира $P_N P_S$ и осью эклиптики $P_{\text{эк}} P'_{\text{эк}}$ остается приблизительно постоянным. На сфере этот угол ϵ называется наклоном эклиптики к экватору и равен $23^{\circ}27'$ (на 1985 г. $\epsilon = 23^{\circ}26,6'$).

Эклиптика делится экватором на две части: северную и южную. Точки пересечения эклиптики с экватором называются точками равноденствий: весеннего, или мартовского (точка Овна — γ), в которой Солнце переходит из южной половины сферы в северную; осеннего, или сентябрьского (точка Весов — ζ), в которой Солнце переходит из северной в южную половину сферы. Когда Солнце находится в этих точках, его суточная параллель совпадает с экватором и на всем земном шаре, кроме полюсов, день приблизительно равен ночи, отсюда и их название.

Около точек сферы, смещенных относительно равноденствий на 90° , склонение Солнца, равное здесь углу ϵ , несколько дней почти не меняется, и Солнце в это время не меняет своей полуденной высоты, т. е. как бы стоит. Отсюда эти точки называются солнцестояниями: летнего, или июньского (точка Рака — ϵ) и зимнего, или декабрьского (точка Козерога — η). Даты прихода Солнца в эти точки и его координаты приведены в табл. 3 и на рис. 23.

Пояс сферы, расположенный на 8° по обе стороны от эклиптики, называется поясом, или кругом Зодиака. Он проходит через 12 созвездий (см. рис. 23): Рыбы ♈ , Овен ♈ , Телец ♉ , Близнецы ♊ , Рак ♋ , Лев ♌ , Дева ♍ , Весы ♎ , Скорпион ♏ , Стрелец ♐ , Козерог ♑ , Водолей ♒ . В каждом из этих созвездий Солнце находится около месяца, в соответствии с чем каждому месяцу раньше присваивался знак созвездия.

Совместное годовое и суточное движение Солнца. Суточная параллель Солнца (рис. 24) под влиянием его годового

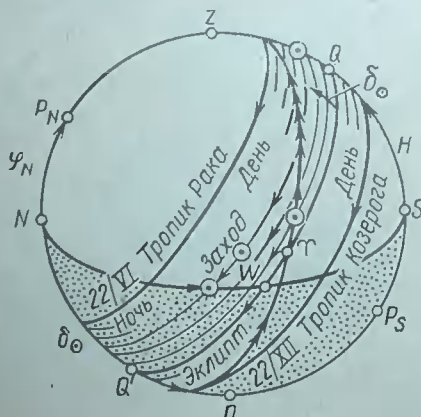


Рис. 24

движения непрерывно смещается на $\Delta\delta$, так что общее движение на сфере происходит по спирали; шаг ее $\Delta\delta$ у равноденствий (Овен, Весы) — наибольший, а у солнцестояний уменьшается до нуля. Поэтому параллели Солнца образуют за год на сфере пояс со склонениями $23^\circ 27'N$ и S . Этот пояс и строится при изучении движения Солнца (см. § 15, рис. 27).

Крайние параллели, описываемые Солнцем в дни солнцестояний, называются тропиками: крайний северный — тропик Рака, крайний южный — тропик Козерога. На тропиках происходит поворот в движении Солнца («тропикос» — по-гречески «поворотный»). В соответствии с этим крайние параллели Земли, на которых Солнце может быть в зените, носят те же названия: тропик Рака ($\varphi = 23^\circ 27'N$) и тропик Козерога ($\varphi = 23^\circ 27'S$).

Периоды в движении Солнца по эклиптике. Оборот Солнца по сфере относительно точки Овна, а следовательно, и относительно тропика происходит за тропический год, а относительно неподвижной точки сферы, например звезды — за звездный год.

Тропическим годом называется промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку Овна. В среднем тропический год равен $365,2422^d = 365^d 5^h 48^m 46^s$. Этот период положен в основу календарного года, применяемого в повседневной жизни. Точка Овна, как будет показано далее, не остается неподвижной на сфере, а имеет небольшое около $1'$ в год, движение навстречу Солнцу, поэтому полный оборот Солнца по эклиптике, называемый звездным годом, оказывается приблизительно на 20^m продолжительнее тропического.

§ 14. ИЗМЕНЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ СОЛНЦА В ТЕЧЕНИЕ ГОДА

Собственное годовое движение Солнца является следствием движения Земли, поэтому все особенности движения Земли относятся и к Солнцу. Орбитальное движение Земли, как отмечено в § 12, 13, происходит быстрее в перигелии, медленнее — в афелии (см. рис. 23). В связи с этим Солнце по эклиптике движется также неравномерно — быстрее около точки П (4/I) и медленнее — около А (4/VII). Долгота Солнца, считаемая от точки Овна, имеет в четыре характерные даты те же значения, что и $\alpha_\odot$, т. е. 0° ; 90° ; 180° ; 270° . Суточное изменение долготы вследствие неравномерности движения Солнца по эклиптике оказывается неравномерным: около точки П эклиптики $\Delta\lambda = 61,2'/d$; около точки А — $57,2'/d$; в среднем — $59,1'/d$.

Связь координат Солнца α и δ с его долготой λ и ε . Проведя через место Солнца С (рис. 25) меридиан, получим сферический $\triangle CD\gamma$, прямоугольный при вершине D, с известными элементами λ и ε . Для определения α применим формулу котангенсов к углу D:

$$\operatorname{ctg} 90^\circ \sin \varepsilon = \operatorname{ctg} \lambda \sin \alpha - \cos \varepsilon \cos \alpha,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \lambda \cos \varepsilon. \quad (57)$$

Определим δ по формуле синусов, а λ — по формуле косинуса стороны:

$$\frac{\sin \delta}{\sin \varepsilon} = \frac{\sin \lambda}{\sin 90^\circ} \text{ и } \cos \lambda = \cos \alpha \cos \delta + 0,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } \sin \delta &= \sin \lambda \sin \varepsilon; \\ \text{б) } \cos \alpha &= \frac{\cos \lambda}{\cos \delta}. \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

Эти формулы применяются при расчете эфемерид Солнца (приложение 2.4).

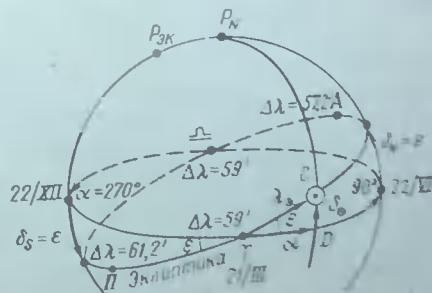


Рис. 25

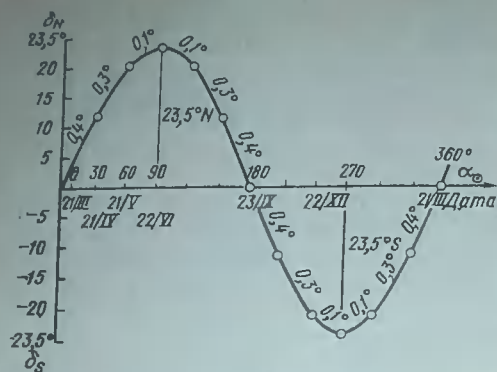


Рис. 26

Изменение координат Солнца. Получим $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ Солнца в функции изменения долготы. Для этого продифференцируем формулу (57) по α и λ , а формулу (58, а) по δ и λ . Заменяв $\cos \lambda$ по (58, б) и переходя к конечным приращениям, получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{\cos \epsilon}{\cos^2 \delta} \Delta\lambda; \\ \Delta\delta &= \cos \alpha \sin \epsilon \Delta\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Подставляя в эти формулы значения α , δ и $\Delta\lambda$ для основных точек эклиптики (см. рис. 25), получим, что $\Delta\alpha$ ме-

няется от $54'$ до $66'$, $\Delta\delta$ — от 0 до $24'/д$. Наибольшее значение $\Delta\alpha = 66,5'/д$ Солнце имеет 22 декабря, а наименьшее — $53,8'/д$ — около 18 сентября. Их разность $13,8 \cdot 4 = 51,2'$ — есть разность самых длинных и самых коротких суток в году. Среднее значение за год $\Delta\alpha = 59,14'/д$ (эти величины применяются при измерении времени). Для приближенных расчетов принимается $\Delta\alpha_3 = 1'/д$, а для $\Delta\delta_3$ — значения его в середине первого, второго и третьего месяца от равноденствий, т. е. $\Delta\delta = 0,4'/д$ — в первый месяц до и после равноденствий, $\Delta\delta = 0,3'/д$ — во второй месяц до и после равноденствий и $\Delta\delta = 0,1'/д$ — в первый месяц до и после солнцестояний. По этим данным и табл. 3 построен график значений α и δ Солнца по датам (рис. 26).

О точном расчете координат Солнца. Вводится следующая замена: Солнце обращается вокруг Земли по эллиптической орбите, соответствующей земной. Это движение определяется законами Кеплера и уравнениями § 12. Элементы условной орбиты Солнца ($i = \epsilon$ и др.) получаются на определенную эпоху t_0 . Вычисляются величины r и v (см. § 12, формулы (55), (56)). По этим данным вычисляется λ , а по формулам (57), (58) — его α и δ . Видимую долготу λ можно получить и приближенным путем — экстраполированием начальных значений (приложение 2.4).

§ 15. ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ГОДОВОЕ И СУТОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

Времена года. Количество солнечной энергии, получаемой единичной площадью на Земле, зависит главным образом от высоты Солнца над горизонтом и времени освещения. В средних широтах высоты Солнца меняются за год на $46^\circ 53'$, что и приводит к смене времен года. На рис. 23 в положении *II* Земля обращена к Солнцу северным полушарием, где высоты Солнца больше, время освещения продолжительнее — наступает лето. В положении *IV* наоборот — в северном полушарии зима, в южном — лето.

Астрономическими признаками времен года принято считать соотношение знака и величины склонения Солнца с широтой места. Когда $\delta_\odot$ становится одним с ϕ , начинается весна, а при $\delta_{\max}$ начинается лето. Когда $\delta_\odot$ становится разноименным с ϕ , начинается

осень, а при $\delta_{\min}$ начинается зима. На этом основании получим следующие даты начала и конца времен года: в северном полушарии весна с 21/III по 22/VI, лето с 22/VI по 23/IX, осень с 23/IX по 23/XII, зима с 22/XII по 21/III; в южном — наоборот.

Вследствие неравномерности движения Солнца по эклиптике время прохождения участков эклиптики между точками времен года неодинаково, поэтому в северном полушарии весна продолжается 92,9 сут; лето — 93,6; осень — 89,8; зима — 89,0 сут; теплый весенне-летний период на семь дней длиннее осенне-зимнего. В тропиках вместо лета и зимы различают два сезона — соответственно сухой и дождливый.

Климатические пояса. Разделение Земли на климатические пояса связано

и количеством тепла, получаемым от Солнца, и особенностями его суточного движения.

С астрономической точки зрения Земля разделяется на пять климатических поясов.

Жаркий, или тропический, пояс включает районы, в которых Солнце может проходить через зенит. Условие прохождения через зенит: $\delta_{\odot} = \varphi$. Следовательно, границами пояса будут параллели $23^{\circ}27' N$ и S , т. е. тропики Рака и Козерога.

Умеренный пояс (северный и южный) включает районы, в которых Солнце каждый день восходит и заходит, но не проходит через зенит. Условие восхода $\delta_{\odot} < 90^{\circ} - \varphi$. Следовательно, границами этих двух поясов будут параллели от $23^{\circ}27'$ до $66^{\circ}33' N$ и S , т. е. от тропиков до полярных кругов.

Холодный, или полярный, пояс (арктический, антарктический) включает районы, в которых возможны дни с незаходящим или невосходящим Солнцем. При $\delta_{\odot} > 90^{\circ} - \varphi$ и одноименных Солнце будет незаходящим, а при $\delta_{\odot} > 90^{\circ} - \varphi$ и разноименных — невосходящим.

Крайние параллели, на которых возможно незаходящее или невосходящее Солнце, называются полярными кругами: северным — в $\varphi = 66^{\circ}33' N$ и южным — в $\varphi = 66^{\circ}33' S$. Следовательно, два холодных пояса простираются от полярных кругов до полюсов.

Особенности движения Солнца в разных широтах. Рассмотрим, как происходит совместное суточное и годовое движение Солнца при изменении широты места. Как показано на рис. 24, в течение года Солнце движется по спирали и его крайние параллели создают пояса сферы в пределах $23^{\circ}27' N$ и S . Для вы-

яснения особенностей движения Солнца эти пояса наносятся на сферу в данной широте (рис. 27).

На экваторе (рис. 27, а) все параллели Солнца делятся пополам, поэтому день всегда приблизительно равен ночи. В дни равноденствий ($\delta = 0$) Солнце движется по экватору, который совпадает здесь с первым вертикалом; в полдень Солнце проходит через зенит. До полудня Солнце движется по E части первого вертикала, а после полудня — по W , т. е. в полдень азимут Солнца мгновенно изменяется на 180° . В дни солнцестояний параллелями являются тропики ($\delta = 23^{\circ}27'$), при этом меридиональные высоты $H = 66^{\circ}33'$ будут наименьшими.

В тропическом поясе (рис. 27, б) крайние параллели Солнца вмещают зенит ($\varphi \leq 23^{\circ}27' N, S$), поэтому Солнце проходит через зенит дважды в год, а на границах пояса — один. Продолжительность дня в течение года меняется мало. Солнце может пересекать первый вертикал ($\delta < \varphi$) и не пересекать его. В тропиках изменение азимута происходит весьма неравномерно: велико около кульминаций и мало около первого вертикала.

В умеренном поясе Солнце в течение года всегда восходит и заходит, причем продолжительность дня меняется в широких пределах (крайние параллели на рис. 24). В этом поясе Солнце никогда не проходит через зенит, а меридиональные высоты меняются в течение одного года на $2\delta_{\max}^{\circ}$.

В полярном поясе (рис. 27, в) может наблюдаться незаходящее или невосходящее Солнце, когда $\delta_{\odot} \geq 90^{\circ} - \varphi$, т. е. возможен полярный день или ночь. В ос-

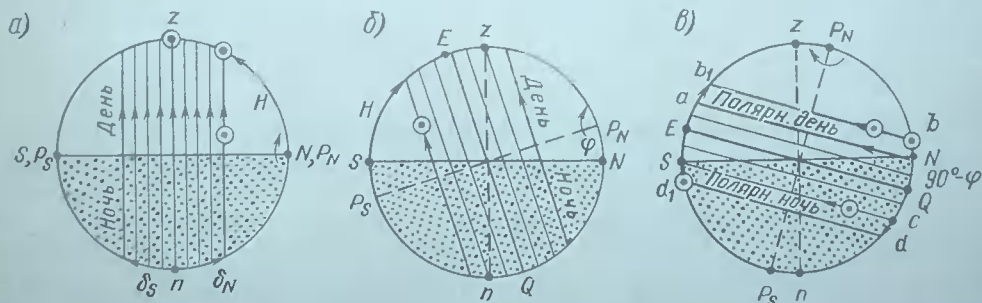


Рис. 27

тальное время Солнце восходит и заходит.

Полярным днем называется промежуток времени, в течение которого Солнце в суточном движении не заходит и движется над горизонтом (параллели bb_1 , Na на рис. 27, в); он продолжается, пока $\delta_{\odot} \geq 90^\circ - \varphi$ и одновременно.

Полярной ночью называется промежуток времени, в течение которого Солнце в суточном движении не восходит и движется под горизонтом (параллели Sc , d_1d); ночь продолжается, пока $\delta_{\odot} \geq 90^\circ - \varphi$ и разноименно.

На полюсах полярные день и ночь продолжаются почти полгода: на северном полюсе день — с 21 марта по 23 сентября, ночь — с 23 сентября по 21 марта, на южном — наоборот.

Примечание. В действительности полярный день начинается на 2—3 дня раньше (заканчивается — позже) вследствие действия атмосферной рефракции, полу диаметра Солнца и наклона горизонта (в сумме $\approx 1^\circ$), поэтому более точное условие: с 23 сентября по 21 марта, на южном — наоборот.

$$\delta_{\odot} \geq 90^\circ - \varphi \pm 1^\circ, \quad (60)$$

где $+1^\circ$ вводится для ночи; -1° — для дня.

Приближенное решение задач на движение Солнца. При обучении и в практике полезно приближенное решение, основанное на связи между датами года и α и δ Солнца, а также условиями суточного движения (восхода, кульминации). Приближенные решения позволяют определить: α и δ Солнца (см. пример 11), даты начала и конца полярной ночи (дня), даты прохождения через зенит, параллель Солнца на дату и др. Рассмотрим основные задачи на примерах.

Пример 11. Определить приближенно α и δ Солнца на 15 ноября.

Решение. 1. Намечаем ближайшую из четырех характерных дат 22/XII; $\alpha_{\odot} = 270^\circ$; $\delta_{\odot} = 23,5^\circ S$. $\Delta\alpha = 1^\circ/d$; $\Delta\delta = 0,1^\circ/d$ и $0,3^\circ$ д.

$$\begin{aligned} 2. \text{ Число суток до этой даты} &= 17 \\ 3. \Delta\alpha &= 37^\circ \cdot 17^\circ/d = 37^\circ; \Delta\delta = 30 \cdot 0,1^\circ + 7 \cdot 0,3^\circ = 5,1^\circ \\ 4. \alpha_{\odot} &= 270^\circ - 37^\circ = 233^\circ; \delta_{\odot} = 23,5^\circ - 5,1^\circ = 18,4^\circ S. \end{aligned}$$

Пример 12. Дано: $\varphi = 73^\circ N$. Определить даты начала и конца полярной ночи и ее продолжительность.

Решение. 1. Условие начала и конца ночи $\delta_{\odot} = 90^\circ - \varphi$ и разноименно, откуда $\delta = 17^\circ S$.

2. Ближайшим значением будет $\delta = 23,5^\circ S$ на 22/XII; значение $\delta = 17^\circ S$ Солнце имеет в две даты, симметричные 22 XII.

Разность: $23,5^\circ - 17^\circ = 6,5^\circ = \Delta\delta$ — общее приращение δ .

3. Число суток превышает 30 (так как $6,5^\circ : 0,1^\circ/d = 65d$), поэтому примем два суточных значения: $\Delta\delta = 0,1^\circ$ и $0,3^\circ$ и получим $30d \cdot 0,1^\circ/d = 3^\circ$, остаток $3,5^\circ : 0,3^\circ/d \approx 12d$.

Следовательно, за $30d + 12d = 42d$ и после 22 XII $\delta = 17^\circ S$.

4. Полярная ночь начнется 22 XII — $42d = 10/XI$, закончится 22 XII + $42d = 2/II$; продолжительность ее 84 сут.

По более точной формуле (60) получаются значения: $\delta = 18^\circ S$; число суток 36; полярная ночь начнется 14 ноября и окончится 29 января; продолжительность 76 сут.

Пример 13. Дано: $\varphi = 14^\circ S$. Определить даты, в которые Солнце проходит через зенит.

Решение. 1. $\delta_{\odot} = \varphi = 14^\circ S$ — будет в две даты.

2. Ближайшие даты 23 IX и 21 III; $\delta = 0^\circ$; $\Delta\delta = 0,4^\circ/d$ и $0,3^\circ/d$; $30d \cdot 0,4^\circ/d = 12^\circ$; $2^\circ : 0,3^\circ/d = 7d$.

3. Число суток до ближайшей даты: $30d + 7d = 37d$.

Даты прохождения Солнца через зенит 23 IX + $37d = 30/X$, 21 III — $37d = 12/II$.

Пример 14. $\varphi = 35^\circ N$. 14 VIII нанести на сферу параллель Солнца и определить H , δ захода, продолжительность дня, A захода.

Решение. 1. Ближайшая дата 21 IX; $\delta = 0^\circ$, число дней 40.

$$2. \delta_{\odot} = 0^\circ + (30d \cdot 0,4^\circ/d) + (10d \cdot 0,3^\circ/d) = 15^\circ N.$$

3. На рисунке сферы для $\varphi = 35^\circ N$ (см. рис. 24) получим: $H = 90^\circ - \varphi + \delta_{\odot} = 70^\circ S$; $1/\sin = 102^\circ W$; продолжительность дня $21^\circ - 204^\circ$ $13^\circ 35'$ (приблизленно 14°); $A_{\text{зак}} = 70^\circ NW$ или 290° .

Глава 5. ОРБИТАЛЬНОЕ И ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ, ЛУНЫ И ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ. ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ ЗВЕЗД

§ 16. ОРБИТАЛЬНОЕ И ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

Общая характеристика движения планет. Около Солнца обращаются девять больших планет, 32 их спутника,

астеронды и более мелкие тела. На рис. 28 дана схема солнечной системы, знаки планет и их расстояния от Солнца.

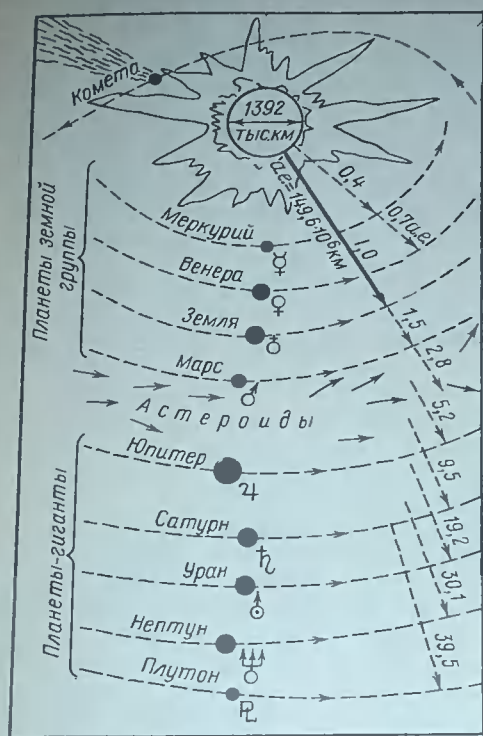


Рис. 28

Орбиты планет лежат почти в плоскости эклиптики (i до 7° ; у Плутона $i \approx 17^\circ$), их орбитальные движения описываются формулами § 12.

Планеты, орбиты которых лежат внутри земной, называются нижними планетами и могут занимать следующие характерные относительно Земли положения (рис. 29): нижнее соединение — положение планеты в точке a между Солнцем и Землей; верхнее соединение — положение ее в точке b — «за Солнцем». Элонгация (западная в точке c и восточная в точке d) — это наибольшее угловое удаление планеты от Солнца (для Венеры не более 48° , Меркурия — 28°). Планеты, орбиты которых лежат вне орбиты Земли, называются верхними планетами и могут занимать следующие положения (см. рис. 29): противостояние n' , когда Земля находится между Солнцем и планетой (если расстояние Земля—Марс минимально, противостояние называется великим); соединение b' , когда планета находится «за Солнцем»;

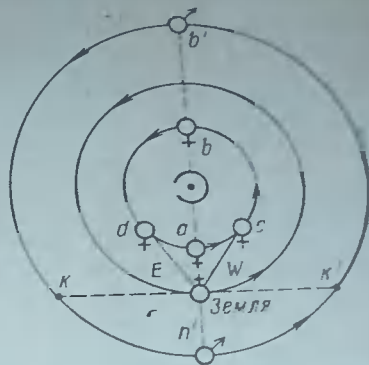


Рис. 29

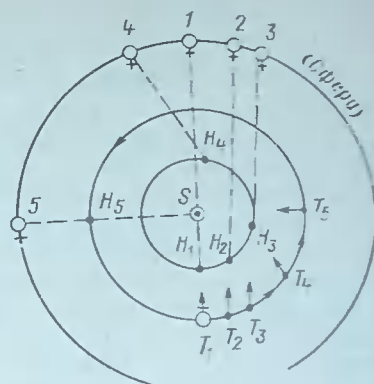


Рис. 30

квадратуры k и k' , когда разность долгот Солнца и планеты равна 90° .

Видимое движение планет по сфере. Проектируя движущуюся планету на небесную сферу с центром в Солнце (S на рис. 30), получим видимый путь планеты на сфере.

Видимое движение планеты по сфере объясняется движением ее по орбите в ту же сторону, что и Земля, но с различными скоростями. Действительно, пусть на рис. 30 изображена проекция небесной сферы на плоскость эклиптики и проекции орбит Земли T и нижней планеты (Венеры H). В положении Земли T_1 планета H_1 находится в нижнем соединении с Солнцем и видна на сфере в точке I (направление на планету с Земли показано стрелкой). При переходе Земли в точку T_2 планета, орбитальная скорость которой больше скорости Земли, пройдет больший путь и окажется в точке H_3 ; на сферу планета

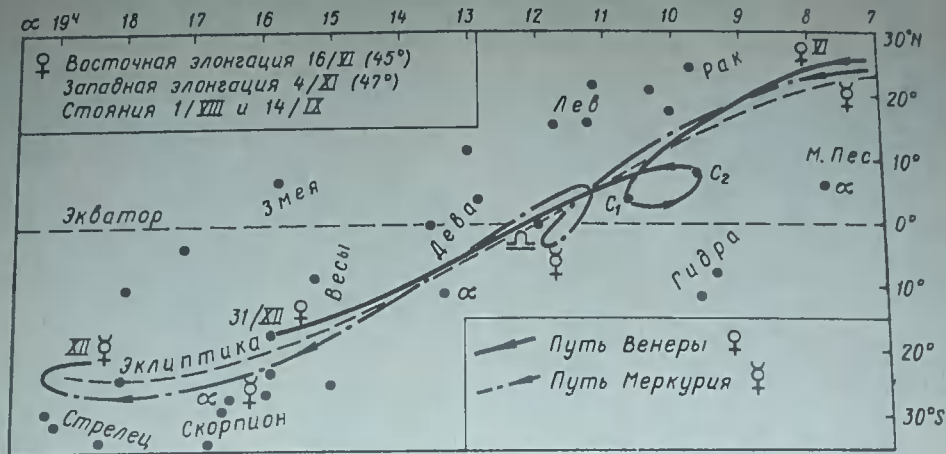


Рис. 31

проектируется в точку 2, и движение ее от точки 1 до 2 и 3 будет обратным. В положении около T_3 планета с Земли видна по касательной к ее орбите, т. е. удаляющейся от Земли в неизменном направлении. На сферу все положения планеты около H_3 проектируются около точки 3 — происходит стояние планеты. При движении Земли от T_3 к T_4 и T_5 перемещение проекции планеты от точки 3 к 4 и 5 будет прямым и более быстрым, чем движение Солнца. В положении T_5 планета H_5 находится в верхнем соединении с Солнцем, а около H_3 будет в западной элонгации. При движении нижней планеты ее освещенная часть поворачивается то к Земле, то от Земли, т. е. планета, подобно Луне, видна в различных фазах.

Характер движения верхней планеты объясняется тем, что скорость Земли больше скорости планеты, в результате чего проекция планеты на небесную сферу движется то прямо, то останавливается, то совершает обратное движение; у верхних планет смены фаз не наблюдается.

Если по результатам наблюдений получить α и δ планеты и нанести ее видимый путь на сферу или карту, то получим кривую, близкую к эклиптике, но имеющую более сложный характер, часто с петлями и зигзагами.

На рис. 31 показан видимый путь планет Меркурия и Венеры среди звезд

с июня по декабрь 1983 г. До точки C_1 Венера двигалась в ту же сторону, что и Солнце, т. е. движение было прямым. В точке C_1 происходило стояние планеты, т. е. α планеты некоторое время не менялось. От точки C_1 до C_2 планета двигалась навстречу Солнцу. В точке C_2 снова происходило стояние, а затем быстрое прямое движение Венеры. Аналогичная петля описана Меркурием.

Изменение координат планет. Вследствие видимого собственного движения планет их экваториальные координаты α и δ непрерывно и неравномерно изменяются. Для нижних планет суточные изменения α могут быть больше, чем для Солнца. Например, для Венеры наибольшее $\Delta\alpha$ будет порядка $1^\circ 23'$ в сутки, или $3,5'$ за 1^h . У верхних же планет величина $\Delta\alpha$ меньше, чем у Солнца. При прямом движении планеты ее α возрастает, при обратном — убывает. Максимальные склонения наиболее ярких планет вследствие движения их вблизи эклиптики не выходят за пределы $27^\circ N$ или S . Для Венеры $\Delta\delta$ достигает $1,3'/ч$, или $0,5^\circ/д$.

Навигационные планеты. Для морских наблюдений используются только четыре наиболее яркие планеты: Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Яркости и условия видимости этих так называемых навигационных планет меняются в зависимости от расстояния до них и расположения относительно Земли и Солнца.

Нижняя планета Венера в верхнем и нижнем соединениях (см. рис. 29) теряется в лучах Солнца и с Земли не видна. В положениях к W от Солнца (см. рис. 29) Венера видна утром перед восходом Солнца; в положениях к E — вечером после захода Солнца. Наибольшей яркости (до $-4,3^m$) Венера достигает в фазе 0,25, так как в этом положении она ближе к Земле, чем в фазе полного диска. Наиболее яркие планеты Венера и Юпитер видны в трубу даже днем, и их можно наблюдать вместе с Солнцем (подробно видимость и дневные наблюдения планет рассмотрены в § 74).

Верхние планеты (Марс, Юпитер и Сатурн) бывают невидимы только вбли-

зи соединения, когда они теряются в лучах Солнца. Яркости этих планет меняются в широких пределах. Так, Марс имеет обычно яркость около 1^m , а во время великого противостояния она возрастает до $-2,5^m$. Яркость Юпитера колеблется от $-2,5$ до $-1,5^m$. Навигационные планеты можно опознать сравнительно легко. Венера всегда близка к Солнцу, поэтому видима лишь как яркая белая вечерняя или утренняя звезда. Марс имеет красновато-оранжевый цвет. Юпитер — желтоватый, а Сатурн — белый. Для всех планет характерно отсутствие мерцания, заметного даже у самых ярких звезд. Условия видимости планет на каждый месяц данного года указаны в Ежегодниках.

§ 17. ОРБИТАЛЬНОЕ И ВИДИМОЕ МЕСЯЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ

Система Земля—Луна обращается, как известно, вокруг общего центра тяжести (ЦТ), расположенного под поверхностью Земли (рис. 32, а). Центр тяжести системы движется по орбите Земли; путь же Луны в околосолнечном пространстве представится в виде волнистой линии около орбиты Земли (рис. 32, б). Если же рассматривать систему Земля—Луна изолированно от Солнечной системы (как задачу двух тел), т. е. независимо от притяжения Солнца и планет и без движения Земли, то орбита Луны представится замкнутым эллипсом, в одном из фокусов которого находится центр тяжести системы (рис. 33). Движение Луны по такой орбите характеризуется законами Кеплера (см. § 12). Влияния же притяжений Солнца и планет учитываются как возмущения.

В ближайшей к Земле точке орбиты Луны — перигее — радиус-вектор r наименьший, а орбитальная скорость — наибольшая. Наблюдаемый с Земли угловой радиус Луны равен здесь $16,4'$,

а угловой радиус Земли, видимый с Луны (параллакс), — около $61,5'$.

В наиболее удаленной точке орбиты — апогее — r наибольший, а скорость движения — наименьшая; угловой радиус, равный $14,7'$, и параллакс — $54'$ — здесь также наименьшие. Среднее расстояние Луны от Земли составляет 384,4 тыс. км, а средняя орбитальная скорость $v = 1,02$ км/с — почти в 30 раз меньше скорости Земли.

Видимая орбита Луны. Если при центре Земли построить небесную сферу (см. рис. 33), то плоскость орбиты Луны в сечении со сферой даст большой круг LL' , называемый видимой орбитой Луны. Видимая орбита Луны — проекция действительной ее орбиты на небесную сферу. Следовательно, вместо движения Луны в пространстве можно рассматривать ее видимое движение по сфере. Нанеся на сферу проекцию орбиты Земли — эклиптику II' и небесный экватор QQ' , увидим, что видимая орбита Луны пересекается с эклиптикой под углом на-

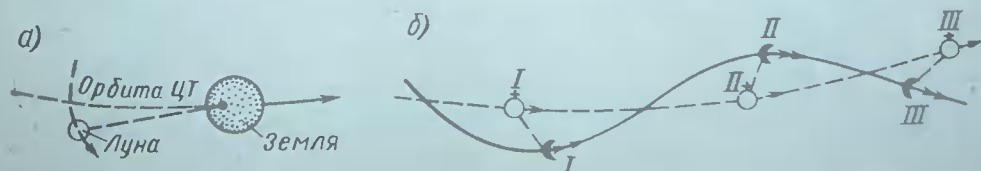


Рис. 32

клона $i \approx 5'09''$ в двух точках, называемых узлами: восходящим узлом Ω , где Луна переходит в положение севернее эклиптики, и нисходящим узлом $\mathcal{C}$, ему противоположным (узлы иногда называют драконическими точками).

Движение Луны по сфере имеет месячный период. Направление ее движения то же, что и у Солнца, т. е. прямое, но суточное перемещение значительно больше — около 13,2°. Это движение хорошо видно на ночном небе: Луна смещается среди звезд к востоку на величину своего диаметра за каждый час.

Под действием поля тяготения Солнца и планет правильное движение Луны по орбите нарушается, возникают возмущения или неравенства, вследствие которых элементы эллипса лунной орбиты непрерывно изменяются. Более крупные неравенства: эвекция $4586'' \cdot \sin \times \times (2D - M_{\odot})$, где $D = \lambda_{\odot} - \lambda_{\odot}$; вариация — $2370'' \cdot \sin 2D$; годичное уравнение и другие открыты давно. Их следствиями являются:

движение линии узлов навстречу движению Луны на $19,3^\circ$ в год. В результате этого узлы совершат полный оборот по сфере за 18,6 года. Поэтому путь Луны среди звезд каждый месяц смещается. Меняется также угол наклона орбиты к экватору — с периодом в 9,3 года;

прямое движение линии апсид (П.А. на рис. 33) на $40,7^\circ$ в год. Вследствие этого эллипс орбиты все время поворачивается и займет прежнее положение через 8,8 года;

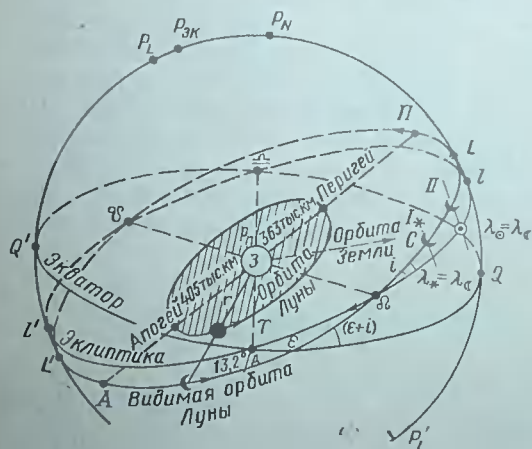


Рис. 33

периодические колебания угла наклона i от $4'59''$ до $5'17''$ с периодом в 18,6 года;

периодические колебания эксцентриситета орбиты от $\frac{1}{14}$ до $\frac{1}{23}$ с периодом в 8,8 года.

В теории движения Луны, служащей для вычисления ее координат, три координаты Луны λ , β и $\sin \delta$ представляются тригонометрическими рядами по аргументам элементов M , λ и другим Луны и Солнца, меняющимся со временем. Так, в теории Брауна координаты вычисляются по рядам

$$\lambda = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin \alpha_i, \quad \beta = \sum_{i=1}^n b_i \sin \alpha_i,$$

где ряд неравенств λ имеет более 650 членов, а ряд β — более 300 членов, поэтому вычисления производятся только на ЭВМ.

Изменение координат α и δ Луны

Вследствие видимого месячного движения Луны по сфере ее прямое восхождение и склонение непрерывно и быстро изменяются. Суточное изменение α составляет в среднем $13,2^\circ$ и колеблется приблизительно от 10 до 17° в сутки. Склонение Луны в течение месяца меняется от 0° до относительного максимума δ_x и от 0° до максимума δ_s . Наибольшее склонение будет, когда восходящий узел совпадает с точкой γ (см. рис. 33), тогда $\delta_x = \varepsilon + i = 23'27'' + 5'09'' = 28'36''N$ и S . Этот максимум уменьшается, когда с точкой Ω она совпадает нисходящий узел, тогда $\delta_x = \varepsilon - i = 18'18''N$ и S . Следовательно, наибольшее изменение δ за месяц может быть около 57° ; суточное изменение δ колеблется от десятых долей градуса примерно до 7° .

Периоды в движении Луны. Весь путь по видимой орбите, т. е. полный круг по сфере, Луна совершает за месяц. В зависимости от того, по отношению к какой точке считать оборот Луны, получим пять различных месяцев, из которых в мореходной астрономии встречаются два.

Звездный, или сидерический, месяц называется период оборота Луны по сфере относительно какой-либо звезды (промежуток, через который снова $\lambda_{\odot} =$

$\lambda_{\odot}$), в среднем равный $27^{\circ}7'43''11^c \approx 27,32^d$. За звездный месяц Солнце переместится по сфере в ту же сторону, что и Луна, на $27,8^{\circ}$ (см. рис. 33, точки I и II). Луна, проходя по $13,2^{\circ}$ в день, будет догонять Солнце еще $2,21^d$, поэтому оборот Луны относительно Солнца больше на эту величину.

Лунным, или синодическим, месяцем называется период оборота Луны по сфере относительно Солнца (т. е. когда снова $\lambda_{\odot} = \lambda_{\odot}$), в среднем равный $29^d12^h44^m03^s \approx 29,53^d$. Этот месяц лежит в основе календарного месяца. За лунный месяц происходит весь цикл изменений вида Луны, т. е. смена фаз.

Двенадцать лунных месяцев, или «лунный год», имеют продолжительность около 354 сут и приблизительно на 11 сут короче, чем тропический и календарный годы. Вследствие этого дни лунного месяца или одни и те же фазы Луны из года в год приходятся на разные календарные даты и будут повторяться в те же дни, только через 19 лет (метонов цикл: $29,53^d \times 235$ лунных месяцев $= 6939,65^d$ и 19 лет $\times 365,25^d = 6939,8^d$).

Зная продолжительность месяцев, можно определить суточный путь Луны относительно звезд: $\frac{360^{\circ}}{27,32^d} = 13,2^{\circ} \approx 53^m$ и относительно Солнца: $\frac{360^{\circ}}{29,53^d} = 12,2^{\circ} \approx 49^m$.

Суточное и месячное движение Луны. В суточном движении Луна, как и Солнце, описывает не параллель, а спираль (рис. 34), так как ее δ и α быстро изменяются. Если в данные сутки звезда С, Солнце и Луна были в кульминации одновременно (положение I на рис. 34), то через один оборот сферы относительно звезды — звездные сутки — звезда С будет снова в той же кульминации. Солнце за это время годовым движением (около 1° в сутки) перейдет в положение II' и будет кульминировать позже звезды на $3^m56^s \approx 4^m = 1^{\circ}$, т. е. солнечные сутки на 4^m продолжитель-

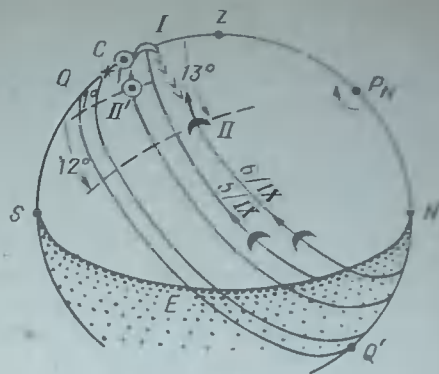


Рис. 34

нее звездных. Луна же за сутки месячным движением (около 13° в сутки) перейдет в положение II и будет кульминировать через 53^m после звезды или через 49^m ($\approx 50^m$) после Солнца. Следовательно, по солнечному времени лунные сутки продолжаются в среднем 24^h50^m .

По этой причине момент кульминации Луны на данном меридиане (T_M) каждые сутки увеличивается на 50^m , т. е. в последующие сутки имеем ($T_K + 50^m$), а в предыдущие ($T_K - 50^m$). Если нам известно время кульминации (T_K) Луны на некотором меридиане, например гринвичском, то для получения времени кульминации на другом (местном) меридиане (T_M^*) следует проинтерполировать разность $\pm 50^m$ по долготе. На меридианах, расположенных к востоку от данного, Луна была раньше, чем на гринвичском, поэтому T_M^* меньше данного на величину

$$\frac{-50^m}{360^{\circ}} \lambda \approx \frac{-2^m}{15^{\circ}} \lambda,$$

т. е. на каждые 15° долготы время кульминации Луны уменьшается приблизительно на 2^m . Для меридианов, лежащих к западу, время будет увеличиваться на 2^m на каждые 15° долготы (см. пример 25).

§ 18. ФАЗЫ И ВОЗРАСТ ЛУНЫ

Известно, что Луна светит отраженным солнечным светом, поэтому при ее движении вокруг Земли освещенная

часть занимает для земного наблюдателя различные положения. Изменение видимой с Земли освещенной части Лу-

ны называется смелой фаз Луны. На рис. 35, а показана одна из фаз: невидимая часть диска заштрихована; граница освещенности называется терминатором и имеет форму эллипса; край диска называется лимбом и имеет круговую форму. На рис. 35, б показано изображение фаз, применяемое в МАЕ.

Величина фазы Φ характеризуется отношением освещенной части диска TL ко всему диаметру, т. е. $\Phi = \frac{TL}{LL}$, и изменяется от 0 до 1. Фазы Луны повторяются через лунный месяц, равный $29,5^a \approx 30^a$. Фазы одинаковы в одни и те же дни, т. е. при одинаковом возрасте Луны.

Возрастом Луны (B_L) называется число суток и их долей, протекавших с момента ближайшего новолуния. Он изменяется от 1 до $29,5^a \approx 30^a$ (0^a). Последовательность смены лунных фаз показана на рис. 35, в, в центре которого Земля, обращенная к нам северным полюсом; направление вращения ее с W на E . Освещенная часть Луны всегда обращена к Солнцу, с Земли же наблюдателю M видны различные доли этой части (на рис. 35, в — утолщенные линии). В положении I, называемом новолунием, Солнце и Луна расположены на одном круге широт, т. е. их долготы

равны (см. рис. 33). Луна культивируется одновременно с Солнцем около полудня и с Земли не видна; при этом $\Phi = 0$ и $B_L = 0$ (30^a), но и при $B_L = 29^a$ и 1^a Луна также не видна, и эти дни относятся к новолунию. В фазе новолуния возможны затмения Солнца при $\delta_L \approx \delta_S$. В положении II молодая Луна видна вечером в виде серпа, выпуклость которого направлена к W . В положении III, называемом первой четвертью, разность $\lambda_L - \lambda_S = 90^\circ$. При этом вечером видна половина диска Луны ($\Phi = 0,5$) выпуклостью к W ($B_L = 7,5^a$); здесь заканчивается первая четверть лунного месяца. В положении IV нарастающая Луна видна в первую половину ночи в виде ущербленного диска, обращенного светлым лимбом к W .

В положении V, называемом полнолунием (разность $\lambda_L - \lambda_S = 180^\circ$; $\Phi = 1$; $B_L = 14,7^a$), Луна видна всю ночь. Практически полнолуние будет при $B_L = 14, 15$ и 16^a . В положении VI «Луна на ущербе» видна во вторую половину ночи в виде ущербленного диска, обращенного светлым лимбом к E . В положении VII, называемом последней четвертью (разность $\lambda_L - \lambda_S = 270^\circ$; $\Phi = 0,5$; $B_L = 22^a$), Луна видна перед утром в виде половины диска, обращенного выпуклостью к E .

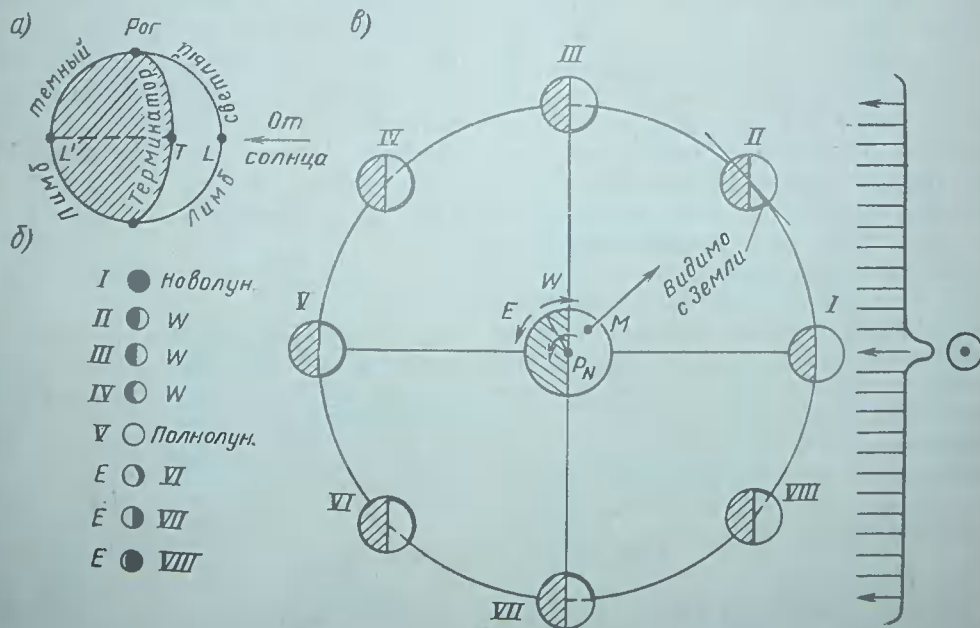


Рис. 35

Таблица 4

Год	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
<i>Л</i>	5	16	27	8	19	0	11	22	3	14

В положении VIII «старая Луна» видна утром в виде серпа, выпуклостью к *Е*. Наконец, в положении I снова наступает новолуние и лунный месяц заканчивается. Положения I и V Луны в теории приливов называют сизигиями, а положения III и VII — квадратурами.

Видимость Луны в данном месте определяется не только ее фазой, но и расположением параллели относительно горизонта. Если склонение Луны одновременно с широтой и будет наибольшим в фазе полнолуния, то параллель Луны будет находиться высоко над горизонтом, и наоборот. Интересно отметить, что в северной широте весной Луна видна лучше вечером в первой четверти, осенью — утром в последней четверти, а зимой — ночью в полнолуние, так как параллели ее в это время расположены высоко над горизонтом.

Пример 15. 25 мая 1985 г. определить приблизительно возраст Луны B_{ζ} , фазу, T_{κ} , $T_{\text{зах}}$, α_{ζ} .

Решение. 1. Для приближенного определения B_{ζ} применяется формула

$$B_{\zeta} = L - M + D, \quad (63)$$

где L — лунное число, приведенное в табл. 4, на середину года;

M — номер месяца в году;

D — число месяца;

$$B_{\zeta} = L - M + D = 35^{\text{а}} \text{ (период } 30^{\text{а}} \text{ отбрасываем)}; \quad B_{\zeta} = 5^{\text{а}}.$$

2. Фаза (см. рис. 35) — серп, выпуклостью к *W*.

3. Приближенное время кульминации определяется относительно кульминации Солнца ($12^{\text{ч}}$), учитывая запаздывание Луны на $0,8^{\text{ч}}$ в сутки:

$$T_{\kappa} = 12^{\text{ч}} + 0,8^{\text{ч}} \cdot B_{\zeta} = 16^{\text{ч}}.$$

4. Заход происходит (при $\delta = 0^{\circ}$) через $6^{\text{ч}}$ после кульминации:

$$T_{\text{зах}} = T_{\kappa} + 6^{\text{ч}} = 16^{\text{ч}} + 6^{\text{ч}} = 22^{\text{ч}}.$$

5. Прямое восхождение Луны определяется через $\alpha_{\odot}$, подсчитывая смещение Луны от Солнца на 12° в сутки:

$$\alpha_{\zeta} = \alpha_{\odot} + 12^{\circ} \cdot D \cdot B_{\zeta} = 62^{\circ} + 60^{\circ} = 122^{\circ},$$

где на 25/V $\alpha_{\odot} = 90^{\circ} - 28^{\circ} = 62^{\circ}$.

§ 19. ПРЕЦЕССИЯ, НУТАЦИЯ И ГОДИЧНАЯ АБЕРРАЦИЯ. ИЗМЕНЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ ЗВЕЗД

Прецессия. Форма Земли — геоид — отличается от сферы в основном на величину экваториальных выступов, массу которых условно можно представить сосредоточенной в экваториальном кольце (рис. 36), наклоненном к плоскости орбиты на угол ϵ . Вследствие суточного вращения Земли с угловой скоростью ω ее можно считать подобной гидроскопу, кинетический момент которого $\vec{H} = J\omega$, где J — момент инерции Земли относительно оси вращения $P_X P_S$. Вектор этого момента $\vec{H}$ направлен к Северному полюсу Земли. Движение же Земли происходит в поле тяготения Солнца, Луны и планет.

Рассмотрим вначале притяжение Солнца. Сила F от притяжения Солн-

цем [см. формулу (50)] центральной шарообразной массы Земли компенсируется центробежной силой F_1 . Притяжение избыточной массы m кольца создает дополнительные силы: ближнюю $\vec{f}_1 = k^2 \frac{mM}{r_1^2}$ и дальнюю $\vec{f}_2 = k^2 \frac{mM}{r_2^2}$, условно приложенные к точкам q и q' . Точка q' ближе к Солнцу, поэтому расстояние $r_1 < r_2$ и сила $\vec{f}_1 > \vec{f}_2$. Разность сил $\vec{f}_1 - \vec{f}_2 = \Delta f$ создаст небольшой вращающий момент $L = \Delta f r$, вектор которого $\vec{L}$ приложен к центру Земли и направлен к нам. По теореме Резаля скорость u конца вектора $\vec{H}$ кинетического момента твердого тела относительно точки O равна вектору $\vec{L}$ главного мо-

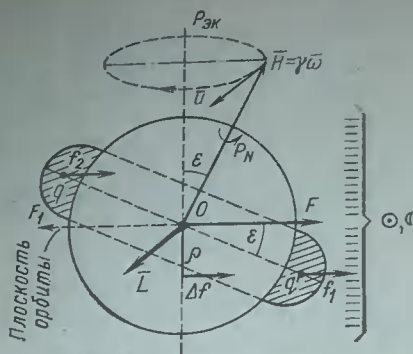


Рис. 36

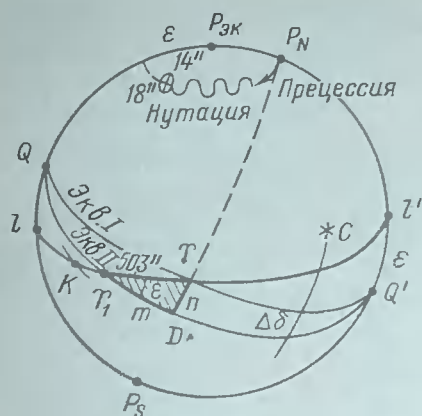


Рис. 37

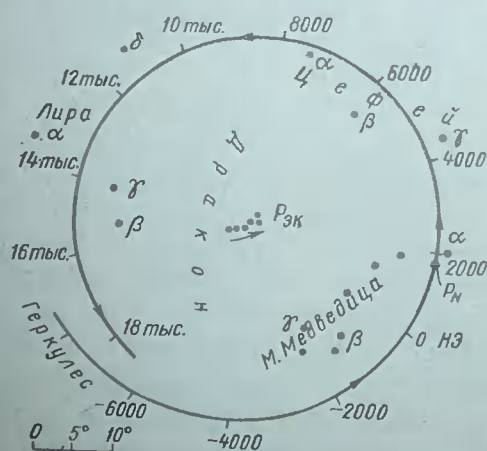


Рис. 38

мента всех сил, действующих на тело, относительно той же точки.

Следовательно, вектор $\vec{H}$, направленный по оси Земли, будет перемещаться со скоростью ω вокруг оси OP_N и описывать коническую поверхность. Это явление в механике называется прецессией оси гироскопа. Прецессия оси Земли будет происходить очень медленно,

так как по закону прецессии $\omega_p = \frac{L}{H}$, а величина момента L внешних сил очень мала. Рис. 36 построен для июньского солнцестояния, и величина $\vec{L}$ будет наибольшей; для декабрьского солнцестояния направление $\vec{L}$ будет обратным, а для равноденствий $\vec{L} = 0$. Следовательно, солнечная составляющая прецессии непостоянна, но учитывается в среднем за год.

Аналогичную, но большую прецессию вызывает притяжение Луны. Лунная составляющая момента $\vec{L}$ больше солнечной из-за близости Луны, и меняется ежемесячно, но учитывается также в среднем за год. В результате ось Земли будет прецессировать совместной лунно-солнечной прецессией.

Вследствие этой прецессии полюс мира на сфере будет перемещаться вокруг полюса эклиптики P_N , приблизительно с постоянной скоростью, а экватор — непрерывно наклоняться, отчего точка Овна будет ежегодно смещаться на $50,3''$ в положение γ_1 (рис. 37). Это явление было обнаружено во II в. до н. э. греческим астрономом Гиппархом по изменениям координат звезд, измеренным за 150 лет до него. Отступление точки γ навстречу движению Солнца ежегодно на $50,3''$ вызывает более ранний приход Солнца в точку γ — на $20^m 24^s$ раньше полного оборота его по сфере. Это явление и названо предварением равноденствий, или прецессией (от лат. «прецессия» — предварение). По этой причине тропический год, равный $365,2422^a$ (см. § 13), короче полного оборота Солнца (звездного года) на $20^m 24^s$. Полюс мира P_N опишет вокруг полюса эклиптики полную кривую за $\frac{360 \cdot 60 \cdot 60}{50,3} \approx 26\,000$ лет. Вследствие прецессии от планет полюс эклиптики также смещается на $47''$ в столетие, поэтому P_N бу-

от двигаться не по окружности, а по спирали (рис. 38), и название Полярной звезды будет переходить к разным звездам. Сейчас к P_γ ближе всего (около $50'$) наблюдается звезда α Малой Медведицы (минимальное расстояние $28'$ будет в 2100 г.); в 4000 г. Полярной будет γ Цефея, в 14 000 г. α Лиры и т. д. Точка Овна находилась в созвездии Овна 2000 лет назад. В настоящее время под действием прецессии она перешла на $28'$ навстречу Солнцу в созвездие Рыб; настолько же сместились и точки $\underline{\epsilon}$, $\underline{\zeta}$ (см. рис. 23).

Прецессия от планет смещает полюс эклиптики и как бы поворачивает эклиптику вокруг точки K (см. рис. 37), вследствие этого меняется и угол наклона ϵ . Угол наклона с учетом только прецессии (средний наклон ϵ_0) определяется по формуле

$$\epsilon_t = 23^\circ 27' 8.3'' - 0.468'' t, \quad (62)$$

где t — число лет от 1900 г.

Общее действие Солнца, Луны и планет дает общую прецессию по долготе $50.3''$ в год. На рис. 37 показано смещение вследствие прецессии точки γ по экватору и меридиану, или постоянные прецессии по α и δ , обозначаемые m и n . Из $\triangle \gamma \gamma_1 D$ получим:

$$m = 50.3'' \cos \delta = 46.1''$$

$$n = 50.3'' \sin \delta = 20''$$

Смещение точки Овна по экватору равно $46.1''$ — сказывается на величине единиц измерения времени, считаемых по оборотам этой точки (см. § 22).

Координаты всех светил, в том числе и звезд, вследствие прецессии непрерывно изменяются. Эти изменения можно подсчитать по приближенным (первым производным) формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \alpha &= (m + n \sin \alpha \operatorname{tg} \delta) t, \\ \Delta \delta &= n \cos \alpha t, \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

где m , n — постоянные прецессии;
 t — число лет от эпохи, на которую даны α и δ .

Более точные формулы учитывают вторые производные α и δ совместно с собственным движением звезд. Формулы для учета прецессии применены в алгоритмах для ЭВМ (приложение 2.3).

Нутация. Периодическое изменение действующих на Землю сил тяготения

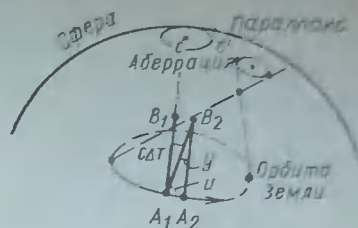


Рис. 39

(особенно от Луны), а также их направлений вызывают появление более быстрых, как бы колебательных движений полюса P_γ , так называемых нутаций (см. рис. 37). Период наибольшего из колебаний около 18.6 года, что показывает его связь с Луной, а величина осей эллипса отклонений около $18''$ и $14''$. Вследствие нутаций координаты всех светил также изменяются, но на значительно меньшую величину — порядка $0.3''$ в год (формулы приведены в приложении 2.3). Отметим, что прецессия и нутация смещают по сфере всю координатную сетку (вместе с точкой Овна).

Поправки координат α и δ звезд за прецессию и нутацию рассчитываются по формулам и вводятся в виде поправок $\Delta \alpha$ и $\Delta \delta$. При расчете эфемерид Солнца прецессия учитывается в его средней долготе и угле ϵ , а нутация — в виде поправок $\Delta \alpha$ и $\Delta \delta$. Учитываются эти величины и при предвычислении координат планет и Луны.

Годичная абберация. Годовое орбитальное движение Земли вызывает смещение луча света от светила в направлении движения планеты — так называемую годичную абберацию. Абберация возникает также от движения всей Солнечной системы относительно соседних звезд (со скоростью 19.5 км/с) — вековая абберация и от вращения Земли — суточная абберация. Их действием в МАЕ пренебрегают. Годичная абберация происходит вследствие того, что орбитальная скорость Земли ($v \approx 30$ км/с) сопоставима со скоростью распространения света ($c = 3 \cdot 10^8$ км/с — величина конечная и постоянная). Пусть наблюдатель на Земле направит ось телескопа A_1B_1 на звезду S (рис. 39) — луч света затратит на прохождение отрезка B_1A_1 (длины телескопа) проме-

жуют времени ΔT . За это время наблюдатель сместится по орбите в точку A_2 и луч света сместится из центра трубы. Чтобы видеть звезду в центре телескопа, трубу надо наклонить в положение A_1B_2 на угол u , величина которого определяется из $\triangle A_1B_2A_2$:

$$\frac{A_1A_2}{\sin u} = \frac{A_2B_2}{\sin u}$$

или

$$\sin u = \frac{A_1A_2}{A_2B_2}$$

где u — угол наклона оси телескопа к направлению движения.

Но $A_1A_2 = v\Delta T$, а $A_2B_2 = c\Delta T$ и $\sin u = u'' \text{ arc } 1''$ — по малости угла, тогда

$$u'' = \frac{v}{c \text{ arc } 1''} \sin u = k \sin u, \quad (64)$$

где величина $k = \frac{v}{c \text{ arc } 1''}$ называется постоянной абберации и равна $20,5''$.

По величине u'' рассчитывают поправки координат $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ светил за годичную абберацию (они имеют величину до $1''$). Эти поправки вводят в эфемериды всех светил (формулы для их расчета приведены в приложении 2.3).

Годичный параллакс звезд. Смещение звезды на сфере при наблюдении ее из противоположных точек орбиты Земли (см. рис. 39) называется годичным параллаксом. Этой величиной в МАЕ пренебрегают, так как наибольшее значение полуоси смещения для звезды Проксима (Ближайшая) Центавра всего $0,76''$.

Изменение экваториальных координат звезд. Наблюдения показывают, что места звезд на сфере относительно координатной сетки не остаются постоян-

ными, а подвержены смещениям — звезды имеют как общие, так и отдельные смещения. Общее смещение сетки координат вызывается прецессией и нутацией; движение Земли вызывает абберацию, а движение Солнечной системы — собственные движения звезд (только у 12 звезд оно превышает $4''$ год, наибольшее — $10''$ год).

Собственные движения звезд помещены в звездных каталогах и оцениваются годовыми величинами μ_α и μ_δ , которые учитываются совместно с прецессией как $\Delta\alpha_{пр} = \mu_\alpha$ и $\Delta\delta_{пр} = \mu_\delta$.

Координаты звезд, которые мы получаем непосредственно из наблюдений, после исправления за счет ошибок инструмента и рефракции называют видимыми местами (координатами) звезд.

Если координаты звезды α_0 , δ_0 из каталога (они называются средними известными на некоторый начальный момент (эпоху), то на любой другой момент ее видимые координаты α_* , δ_* могут быть рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_* &= \alpha_0 + (\Delta\alpha_{пр} - \mu_\alpha) + \Delta\alpha_{н\text{ут}} + \Delta\alpha_{аб\text{бер}} \\ \delta_* &= \delta_0 + (\Delta\delta_{пр} - \mu_\delta) + \Delta\delta_{н\text{ут}} + \Delta\delta_{аб\text{бер}} \end{aligned} \quad (65)$$

где t — число лет от начальной эпохи, $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ — поправки координат, рассчитываемые, как показано в приложении 2.3.

Если в формулах (65) учесть только действие прецессии и собственного движения, то получим средние координаты или средние места звезд, которые в даны в звездных каталогах на определенную эпоху. Если учесть действие нутации, то получим истинные места звезд, а если учесть еще и поправки за абберацию, то получим их видимые места, которые приводятся в МАЕ, предвычисленные на несколько лет вперед.

§ 20. ПОНЯТИЕ ОБ ОРБИТАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Классификация орбит искусственных спутников Земли (ИСЗ). Орбиты ИСЗ могут быть круговыми, эллиптическими, параболическими или гиперболическими (рис. 40) в зависимости от скорости v , сообщаемой аппарату при запуске. Большинство спутников движется по эллиптическим, близким к круговым, орбитам, плоскости которых проходят

через центр Земли. Вид кеплеровой орбиты ИСЗ определяется шестью ее элементами: i , $\Omega = \lambda_*$, ω , e , p , h (см. § 12 и рис. 41). Первые пять элементов определяют положение орбиты в пространстве, последний — положение ИСЗ на орбите. Ближайшая к Земле точка P орбиты, где скорость спутника наибольшая, называется перигеем, а ее

проекция на Землю — перигеом: наиболее удаленная точка A орбиты — апогеом (линия $АП$ называется линией апсид). Проекция спутника на поверхность Земли называется подспутниковой точкой или геозенитом (проекция светила на поверхность Земли называется полюсом освещения).

Орбиты ИСЗ классифицируются по углу наклона i , полуоси a , т. е. по высоте H над поверхностью Земли, и по эксцентриситету e . При $i = 0$ орбита называется экваториальной (см. рис. 41), при $i = 90$ — полярной, при промежуточном угле i — наклонной. Угол наклона орбиты определяет районы движения спутника: при полярной орбите спутник может наблюдаться по всей Земле; при экваториальной — в районе экватора (в зависимости от H); при $i < 90$ подспутниковая точка доходит до $\varphi = i$.

По высоте H над поверхностью Земли ИСЗ подразделяются на низкие — с высотой до 5 тыс. км (эти спутники быстроперемещающиеся) и высокие — более 5 тыс. км. Среди высоких выделяют стационарные спутники, запущенные в направлении с W на E на экваториальную орбиту с высотой $H = 35\,870$ км (они «висят» неподвижно над одной точкой Земли). Высота H спутника определяет дальность его видимости и частоту прохождения в данном месте.

Скорости спутников и периоды их обращения. При выведении спутника на

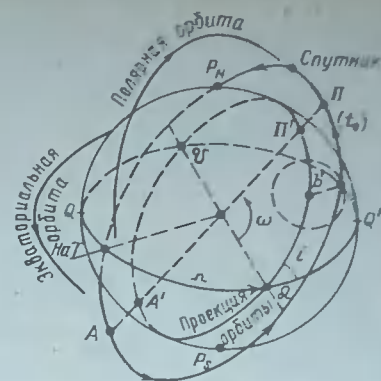


Рис 41

орбиту основными параметрами являются: высота точки выведения, скорость разгона и направление вектора скорости. Связь круговой скорости v_1 с высотой можно получить из уравнения (53) или упрощенно, приравняв силу тяготения центростремительной силе:

$$1 \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv_1^2}{r},$$

где $r = R + H$ — расстояние до центра Земли, H — высота спутника.

Отсюда

$$v_1 = \sqrt{\frac{1M}{R+H}}.$$

Для Земли, подставляя $R = 6371$ км, $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$, получим

$$v_1 = R \sqrt{\frac{g_0}{R+H}} = \frac{7,91}{\sqrt{1 + \frac{H}{R}}} \quad (66)$$

Первой космической скоростью v_1 называется скорость тела, при которой оно не упадет на Землю, а начнет вращаться около нее по круговой орбите. Эта скорость зависит от высоты спутника и поля тяготения, поэтому для разных планет она различна.

По известной скорости v_1 можно определить период T кругового обращения спутника:

$$T = \frac{2\pi(R+H)}{v_1} \quad (67)$$

Значения первой космической скорости и периоды обращения при разных высотах ИСЗ показаны в табл. 5.

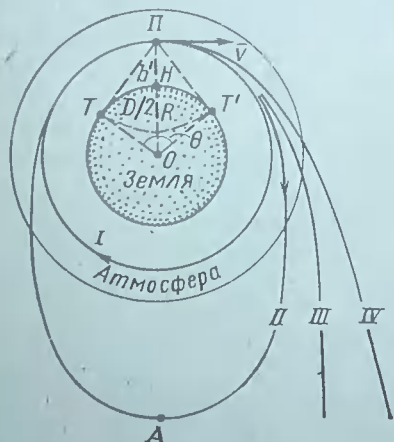


Рис 40

H , км	0	250	575	1000	1090	10 000	20 000
v_1 , км/с	7,91	7,76	7,56	7,35	7,08	4,94	4,07
T , мин	84,4	89	96	105,7	120	147*	247

Из табл. 5 видно, что круговая скорость убывает с высотой спутника. На высоте 35 870 км спутник движется с угловой скоростью Земли, и если его запустить с запада на восток, то получим стационарный спутник. Таков, например, советский спутник, запущенный 26 III 1974 г. ($T = 23^{\circ}46'$).

Если скорость спутника при запуске больше круговой, но меньше параболической, равной $v_1 \sqrt{2}$, то орбита спутника будет эллиптической (см. рис. 40, II). Большая полуось такой орбиты определяется соотношением высоты запуска и скорости, сообщенной спутнику относительно круговой, т. е.

$$a = \frac{R \cdot H}{2 - \left(\frac{v}{v_1}\right)^2}$$

Период обращения ИСЗ по эллиптической орбите определяется из третьего закона Кеплера:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (16)$$

или

$$T = 1,41 \cdot 10^{-4} a^{3/2}$$

Например, спутники американской системы NAVSS «Транзит» имеют $v = 7,25$ км/с, a — около 7460 км ($H = 1090$ км) и $T = 108'$.

Для навигационных целей наиболее пригодными оказались быстроперемещающиеся ИСЗ, запущенные на почти круговые полярные орбиты (высота около 1000 км).

Если скорость аппарата при выводе на орбиту равна параболической, т. е. $v_1 \sqrt{2}$, то его движение происходит по разомкнутой кривой — параболе (см. рис. 40, III).

Второй космической скоростью v_2 называется скорость, при которой тело начнет дви-

гаться по параболе и обратив на Землю не возвратится. На уровне Земли $v_2 = 11,18$ км/с, а на высоте 300 км — 10,93 км/с. Около других космических тел эта скорость ниже, например около Луны $v_2 = 2,37$ км/с, около Юпитера — 60,19 км/с и т. д. Если скорость аппарата больше параболической, т. е. $v > v_1 \sqrt{2}$, то его орбита — гипербола (см. рис. 41, IV) и он уже не вернется на Землю. Такие скорости придают аппарату, выведенным в солнечную систему или летящим на другие планеты. Показанные скорости справедливы только в сфере преобладающего притяжения Земли (радиус около 924 тыс. км). При выходе аппарата из этой сферы он начнет двигаться под действием притяжения Солнца по эллиптической орбите, так как для Солнца эти скорости меньше параболической.

Скорость v_3 тела, при которой оно движется по параболе относительно Солнца и может уйти из солнечной системы, называется третьей космической скоростью. На уровне орбиты Земли $v_3 = 42,1$ км/с. Если скорость ракеты превышает эту величину, то она улетит из Солнечной системы.

Зона видимости ИСЗ Зоной видимости ИСЗ на земной поверхности называется малый круг TT' сферического радиуса $D/2$, описанный из подспутниковой точки V' (см. рис. 40 и 41). Зона видимости зависит от высоты спутника H и рефракции радиоволн, излучаемых ИСЗ. Геометрическая зона видимости определяется из треугольника TOV' , в котором

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{R}{R + H}$$

Но угол $\theta = \frac{D}{R}$, поэтому

$$D = \frac{2R}{57,3} \arccos \left(1 - \frac{H}{R}\right)$$

или

$$D = 120 \arccos \left(1 - \frac{H}{R}\right)$$

Например, для ИСЗ с $H = 1000$ км $D = 3630$ миль.

Плоскость орбиты спутника сохраняет свое положение в пространстве

(без учета возмущений), а Земля вращается, поэтому подспутниковая точка b' и зона видимости смещаются к западу с каждым витком спутника на

$$l = 27,8 \sin i \cos \varphi T.$$

Так, полярный спутник с высотой $H = 1000$ км в широте $\varphi = 0^\circ$ смещается каждый виток на $l = 1580$ миль, а в широте $\varphi = 60^\circ$ — на 790 миль; через 13—14 оборотов этот спутник снова пройдет над данным районом. Сравнивая D с l , видим, что зона видимости больше смещения спутника, поэтому он может наблюдаться на экваторе два оборота, а в широте 60° — четыре оборота, т. е. чем больше широта, тем чаще можно наблюдать спутник.

Продолжительность наблюдения спутника определяется временем прохождения зоны видимости через место наблюдателя. При центральном прохождении $\Delta T = \frac{\theta T}{360}$. К краям зоны это время уменьшается. Для рассмотренного выше ИСЗ наибольшее время прохождения около 18^m .

Следовательно, для обеспечения достаточно частого определения места по спутникам нужно запустить несколько спутников, синхронно движущихся, для непрерывного определения — 24.

Понятие о вычислении орбит и эфемерид спутников. Эллиптическая кеплерова орбита спутника определяется, как отмечалось, шестью элементами: $p, e, \Omega, \omega, i, t_0$ (см. рис. 41). Эти элементы задаются при запуске спутника, а в процессе полета определяются по результатам наблюдений наземных станций слежения.

Расчет положения спутника, движущегося по кеплеровой орбите, производится как для планет (см. § 12). Однако в реальных условиях на спутник действуют различные возмущающие силы, и его движение сильно отклоняется от простой эллиптической орбиты. Возмущения движения спутника подразделяются на возмущения от гравитационных сил и от негравитационных. Наибольшие гравитационные возмущения происходят от несферичности поля тяготения Земли (эллипсоидальная форма и неравномерность распределения масс внутри Земли), меньшие — от влияния Луны и Солнца. Среди негравитационных сил наибольшая — это тормозящее действие атмосферы, меньшие — от электромагнитных явлений и от светового давления. Учет возмущений производится различными приемами, сейчас принят метод оскулирующих орбит в сочетании с поправками методом рядов.

Глава 6. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

§ 21. ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Измерение времени, как и других физических величин, производится сравнением с величиной, принятой за единицу. Вследствие необратимости времени для создания единицы его измерения можно применить только периодические природные процессы по возможности постоянной длительности. Такие процессы позволяют производить измерение времени как «назад» — в прошлое, так и «вперед» — в будущее, считая, что процесс остается неизменным. Для измерения времени используются следующие периодические процессы:

суточное вращение Земли (или небесной сферы);

годовое обращение Земли вокруг Солнца (или годовое движение Солнца);

частоты излучения или поглощения молекул или атомов.

Кроме того, для воспроизведения единиц измерения применяются колебательные процессы (маятник, пластины кварца и др.). В качестве единицы измерения применяется длительность всего процесса, его части или нескольких процессов. Основная единица измерения времени (секунда) получена как доля суток — одного оборота Земли. Смена дня и ночи — наиболее естественный ритм, которому подчинена жизнь на Земле, поэтому он остается в основе измерения времени.

Сутками называется промежуток времени, за который Земля (или небесная сфера) делает один оборот вокруг оси. В зависимости от того, по какой точке сферы замечается ее оборот, различают звездные сутки (по точке Овна), истинные солнечные и средние солнечные сутки (по «среднему» Солнцу). Звездные

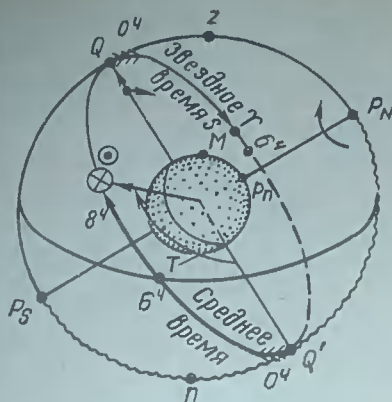


Рис. 42

и средние сутки делятся на часы, минуты и секунды, в результате чего получаются звездные и средние единицы меры времени; в них длительность основной единицы — секунды — различна. За основу была принята средняя солнечная секунда. Однако оказалось, что эталон этой единицы приходится уточнять: первоначально это была $1/86\,400$ доля средних суток; после обнаружения неравномерностей вращения Земли (1960 г.) за секунду стали принимать $1/31\,556\,925,974\,7$ часть тропического года — это секунда системы СИ (эфемеридная секунда). Но потребовался эталон, воспроизводящий эту секунду, и с 1967 г. международная конференция установила: «секунда — это $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующего резонансной частоте перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133». Эта «атомная секунда» и является эталонной, приближающейся к эфемеридной.

§ 22. ЗВЕЗДНЫЕ СУТКИ, ЗВЕЗДНОЕ ВРЕМЯ. ОСНОВНАЯ ФОРМУЛА ВРЕМЕНИ

Примем, что поворот сферы отсчитывается по точке Овна. При этом получим звездные единицы и системы счета звездного времени — местную и гринвичскую.

Звездными сутками называется промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки Овна на одном и том же меридиане.

Для измерения промежутка времени удобнее измерять другую физическую величину — угол поворота сферы за протекающее время, т. е. часовой угол данной точки. При этом часовой угол точки Овна (рис. 42) называется звездным временем, а угол поворота среднего Солнца от полуночи (от точки Q' , см. рис. 42) — средним временем. Так как протекающее время измеряется теперь углом поворота сферы, для его измерения можно применять те же единицы, что и для измерения углов: градусы, радианы, часы ($1^h = 15^\circ$); секунда при этом равна $0,25'$, или $15''$. На этом основании протекающее время численно равно углу поворота сферы от меридиана наблюдателя, выраженному в часах (секундах), градусах или радианах; эти углы и воспроизводятся на измерителях времени — часах.

Системы счета времени определяются тем, от какого меридиана и в каких единицах ведется счет. Если считать от меридиана данного места, получим местное время — звездное (S_M) или среднее (T_M), на гринвичском — гринвичское (звездное и среднее). В повседневной жизни применяется только среднее солнечное время в системах поясных, декретных, судовых и других времен. В качестве эталонной системы применяется гринвичское среднее время, выраженное в атомных секундах, — это всемирное координированное время (UTC), в котором и подаются сигналы точного времени по радио. Измерение больших промежутков времени входит в задачу календаря. В основе календарного месяца и года лежат периоды обращения Луны и Земли, неделя — искусственное образование.

За начало звездных суток принимается момент верхней кульминации точки Овна. Звездные сутки делятся (в звездных единицах) на 24 ч, час — на 60 мин и минута — на 60 с.

Звездным временем S называется промежуток времени (в звездных единицах), протекающий от момента верхней кульминации точки Овна до данного ее положения.

ния. Изобразим сферу на плоскости экватора (рис. 43): внутри изображена Земля и связанные с ней меридиан QQ' и зенит z . При вращении сферы Земля и меридиан QQ' остаются неподвижными. По определению звездного времени оно равно времени поворота точки Овна от Q до γ , т. е. дуге $Q\gamma$, но эта дуга измеряет часовой угол точки Овна t^V , следовательно, звездное время численно равно часовому углу точки Овна, т. е. $S = t^V$. На этом основании звездное время можно выражать в часовых или градусных единицах, например $S = 8^h44^m16^s$ звездных единиц или $t^V = 131^\circ04,0'$; обычно его выражают в градусных единицах. Здесь отсчет велся от меридиана данного места, поэтому полученное время относится к системе местных времен, что отмечается буквой «м», т. е. S_m или t_m^V .

Звездное время даты не имеет, так как промежутки времени больше суток в нем не выражают. Звездное время на данном или гринвичском меридианах воспроизводится на звездных хронометрах. Это время удобно при наблюдениях звезд и обработке звездных наблюдений.

Примечание. Точка Овна перемещается по сфере вследствие прецессии и нутации. Если учесть прецессию точки Овна — $46,1''$ в год навстречу суточному движению, то оказывается, что звездные сутки короче полного оборота сферы на $0,0084^\circ$ [нутация учитывается по формуле (12), приложение 2].

Основная формула времени. Пусть $P_N D$ (см. рис. 43) — меридиан светила S , тогда γD — его прямое восхождение α , а γQD — часовой угол t . Из рис. 43 видно, что сумма дуг α и t равна дуге $Q\gamma$, т. е. $t^V = S$ или

$$S = t + \alpha. \quad (69)$$

Звездное время в данный момент равно сумме востового часового угла светила и его прямого восхождения. Эта формула справедлива для любого светила (на один момент), т. е.

$$S = t_* + \alpha_* = t_\odot + \alpha_\odot = t_4 + \alpha_4 = \dots$$

Формула (69) уже применялась ранее для связи систем координат [см. формулу (2)].

Для момента верхней кульминации $t = 0^\circ$ и $S = \alpha$. Отсюда, зная α_* , мож-

но определить звездное время или поправку часов, и наоборот — по S определить α_* .

Формула часового угла. Решая формулу (69) относительно t , получим

$$t = S - \alpha. \quad (70)$$

Добавив к обеим частям по 360° (24ч), получим

$$t + 360^\circ = S + 360^\circ - \alpha.$$

Но величина $360^\circ - \alpha$ есть звездное дополнение τ_* , а от часового угла период 360° отбрасывается, поэтому для звезд имеем:

$$t_* = S + \tau_*. \quad (71)$$

По этой формуле рассчитываются часовые углы звезд; применяется она также в машинных алгоритмах для часовых углов светил [см. формулы (13) и (22) приложения 2].

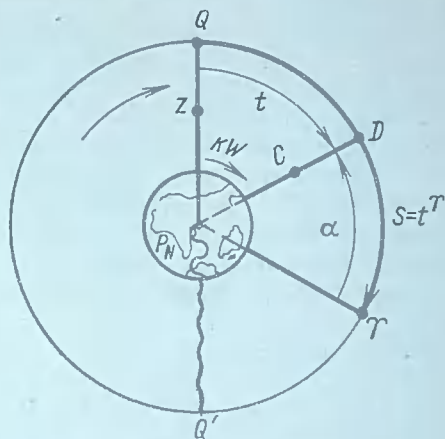


Рис. 43

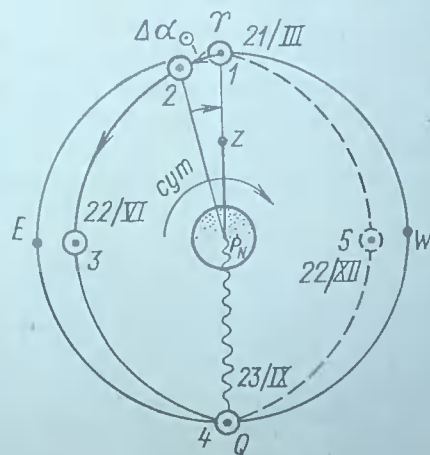


Рис. 44

Звездное время неудобно для повседневной жизни, так как начало звездных суток приходится на разное время суток солнечных. Так, 21/III Солнце (положение 1 на рис. 44 показывает Солнце в момент кульминации γ) расположено в точке γ , при этом звездные сутки начнутся в полдень. Через сутки Солнце переместится по эклиптике примерно на $1^\circ = 4^m$ и будет кульминировать через 4^m после точки Овна. Через три месяца — 22/VI Солнце пере-

местится в положение 3 — кульминация точки Овна произойдет утром. Через полгода (в положении 4) звездные сутки начнутся в полночь, еще через три месяца — 22/XII — вечером и через тропический год — снова в полдень.

Из рис. 44, кроме того, вытекает, что тропический год, равный 365,2422 средних суток, содержит на один звездный сутки больше, т. е. 366,2422 звездных суток.

§ 23. ИСТИННЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ СУТКИ.

СРЕДНИЕ СУТКИ, СРЕДНЕЕ ВРЕМЯ.

СВЯЗЬ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ С ИСТИННЫМ И ЗВЕЗДНЫМ

Истинные солнечные сутки. Для повседневной жизни время удобнее считать по Солнцу.

Истинными солнечными сутками называется промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями Солнца на одном и том же меридиане. За начало солнечных суток обычно принимается нижняя кульминация Солнца, поэтому *истинным солнечным временем* ($T_\odot$) называется промежуток времени, протекающий от нижней кульминации Солнца до данного момента.

Однако величина истинных суток в течение года изменяется. Из рис. 44 видно, что солнечные сутки продолжительнее звездных на $\Delta\alpha_\odot$. При изучении координат Солнца в § 14 отмечалось, что вследствие неравномерности движения Солнца и наклона эклиптики величина $\Delta\alpha_\odot$ меняется в течение года неравномерно: около 22/XII имеем наибольшее $\Delta\alpha = 66,6'$ в сутки, а около 18/IX — наименьшее $\Delta\alpha = 53,8'$ в сутки. Поэтому зимой сутки длиннее, а летом —

осенью короче. Разность в продолжительности солнечных суток в эти даты составит $12,8' \cdot 4 = 51,2'$. В среднем $\Delta\alpha_\odot = 59,14'$. Переменность длительности истинных суток делает их неудобными в качестве единицы измерения, и истинное солнечное время применяется теперь только как часовой угол Солнца. (Исключением являются солнечные часы, показывающие $T_\odot$, — модное украшение парков и садов за рубежом.)

Средние солнечные сутки. Средняя за год продолжительность истинных суток принята за средние сутки. Для их воспроизведения на сфере вводится условная точка — среднее Солнце ($\otimes$). Среднее Солнце (рис. 45) располагается на экваторе и движется в ту же сторону, что и истинное, но равномерно. Его прямое восхождение изменяется каждые сутки на одну и ту же величину:

$$\Delta\alpha_\otimes = \frac{24^h}{365,2422^d} = 3^m 56,56^s = 59,14' / \text{д.}$$

где 24^h — изменение α за тропический год.

Меридиан среднего Солнца не должен отходить далеко от истинного, поэтому его движение подчинено определенным условиям.

Движение Солнца по эклиптике заменено движением среднего эклиптического Солнца C_1 (см. рис. 45), совпадающего с истинным в апогее и перигее; их связывает «уравнение центра». Вторая часть уравнения — «приведение на экватор» — переносит движение C_1 на экватор, так что C_1 и $\otimes$ одновременно

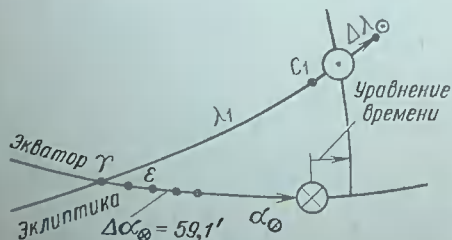


Рис. 45

проходят точку Овна. Суммарная формула дает уравнение времени, связывающее истинное и среднее Солнце.

Суточное движение среднего Солнца и применяется при измерении времени.

Средними сутками называется промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего Солнца на одном и том же меридиане. За начало средних суток принята нижняя кульминация среднего Солнца — полночь. Средние сутки делятся на 24 ч, час — на 60 мин, минута — на 60 с. Вычисленная средняя секунда до 1960 г. являлась эталонной (см. § 27), теперь эталонная секунда — атомная.

Среднее время. Средним солнечным или просто средним временем T называется промежуток времени от момента нижней кульминации среднего Солнца на данном меридиане до данного момента (данного положения $\otimes$), выраженный в средних единицах. Среднему времени обязательно приписывается дата, например (рис. 46) $T_M = 15^h 03^m 45^s$ 17/V 1985 г. В зависимости от географического меридиана QQ' , от которого ведется счет времени, различают несколько систем счета среднего времени. Так, на рис. 46 дана местная система (T_M).

Из рис. 46 видно, что за время T среднее Солнце пройдет дугу $Q'D$, а дуга QD есть часовой угол среднего Солнца, поэтому

$$T = 15^\circ + 12^\circ, \quad (72)$$

т. е. среднее время численно равно часовому углу среднего Солнца плюс 12° (180°). На этом основании среднее время можно выражать в любых угловых единицах, но принято применять только часовую меру. Среднее время в той или иной системе счета воспроизводится часами, хронометрами и кварцевыми часами.

Уравнением времени η называется разность среднего и истинного времени, численно равная разности их часовых углов (рис. 47), т. е.

$$\eta = \alpha_\otimes - \alpha_\odot. \quad (73)$$

Из рис. 47 видно также, что

$$\eta = \alpha_\otimes - \alpha_\odot.$$

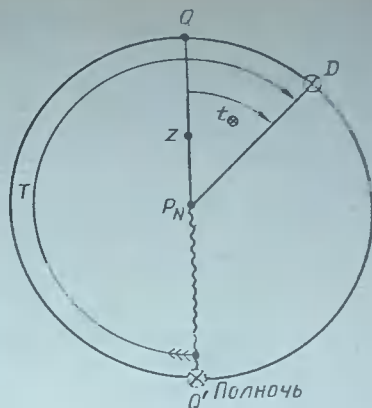


Рис. 46

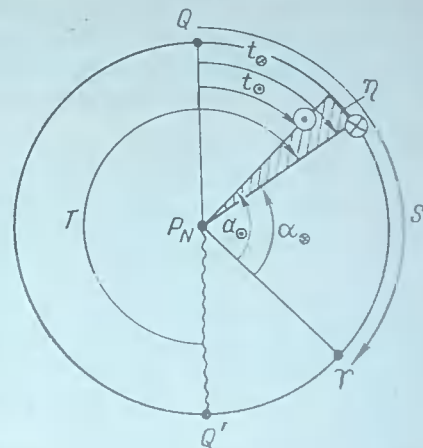


Рис. 47

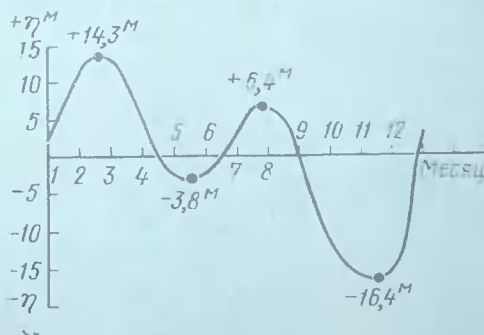


Рис. 48

Если среднее Солнце впереди истинного в суточном движении, то η имеет знак «+», если позади, то «-». График уравнения времени показан на рис. 48. Из него видно, что четыре раза в году уравнение времени равно нулю и имеет четыре экстремальных значения:

11/II+14,3^м; 26/VII+6,4^м; 15/V—3,8^м;
3/XI—16,4^м.

Связь среднего и истинного времени. Формула (73) и рис. 47 устанавливают связь между истинным и средним временем, на основании которой можно решить следующие задачи.

1. Получение часового угла Солнца $t_{\odot}$ по известному T . Решая формулу (73) относительно $t_{\odot}$, имеем

$$t_{\odot} = t_{\odot} - \eta,$$

но по формуле (72) $t_{\odot} = T \pm 12^h$, поэтому

$$t_{\odot} = T \pm 12^h - \eta. \quad (74)$$

где η выбирается из МАЕ или графиков.

2. Получение времени кульминации Солнца. Для верхней кульминации $t_{\odot} = 0^h$, поэтому из формулы (74) имеем

$$T = 12^h + \eta. \quad (75)$$

Например, 3/XI уравнение времени —16,4^м, поэтому Солнце кульминирует в $T = 11^h 43,6^m$ по местному времени.

Связь среднего и звездного времени. Применим основную формулу времени (69) к среднему Солнцу (см. рис. 47):

$$S = t_{\odot} + \alpha_{\odot},$$

но по формуле (72) $t_{\odot} = T \pm 12^h$, поэтому

$$S = T \pm 12^h + \alpha_{\odot}, \quad (76)$$

т. е. среднее время связано со звездным величиной $\alpha_{\odot}$.

Если величина $12^h + \alpha_{\odot} = S_0$ задана (или выбирается) на некоторый начальный момент (например, $T_{гр} = 0^h$), то S на данный момент T получится по формуле

$$S = S_0 + T - \mu T, \quad (77)$$

где $T + \mu T$ — перевод промежутка времени T в звездные единицы;
 μ — переводной коэффициент, равный 0,0027379.

§ 24. МЕСТНЫЕ И ГРИНВИЧСКИЕ СИСТЕМЫ СЧЕТА ВРЕМЕНИ. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВРЕМЕНАМИ НА РАЗЛИЧНЫХ МЕРИДИАНАХ

Рассмотрим системы счета времени, применяемые на практике. Система счета времени определяется тем, от какого меридиана и в каких единицах ведется счет времени.

Местное время. Местной системой счета времени или сокращенно *местным временем* называется среднее (T_m) или звездное (S_m) время, считаемое от данного меридиана с долготой λ , соответст-

венно в средних или звездных единицах. Пусть на рис. 49 Земля и небесная сфера изображены на плоскости экватора со стороны P_N . Обозначим меридиан Гринвича $Q_0Q'_0$, меридиан наблюдателя в месте A с $\lambda'_E = Q_1Q'_1$; в месте B (λ''_W) — $Q_2Q'_2$. Эти меридианы неподвижны, сфера вращается к W . Пусть γ — положение точки Овна в данный момент, тогда по определению звездного времени (§ 22) дуга $Q_1\gamma = S'_m$ представляет звездное местное время на меридиане точки A , а дуга $Q_2\gamma = S''_m$ — то же для меридиана B . Обозначив положение среднего Солнца на тот же момент $\odot$, в соответствии с определением среднего времени, имеем: $\sphericalangle Q'_1\odot = T'_m$; $\sphericalangle Q'_2\odot = T''_m$ — местные средние времена меридианов точек A и B . Местное время одной системы одинаково для всех наблюдателей, расположенных на данном географическом меридиане λ . Так, все наблюдатели на меридиане P_NAP_S имеют одно время S'_m или T'_m . Так как меридианов бесчисленное множество, то и местных времен может быть множество.

Для наблюдателей на разных географических меридианах времена одной

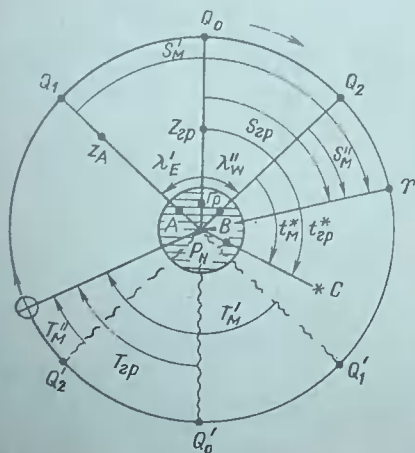


Рис. 49

системы отличаются на величину разности долгот этих меридианов. На рис. 49 время S'_m для наблюдателя A отличается от S''_m для наблюдателя B на величину дуги $Q_1Q_2 = \lambda'_E + \lambda''_W = \Delta\lambda$, так как точка γ при вращении сферы пройдет дугу Q_1Q_2 за время $S'_m - S''_m$. Следовательно.

$$S'_m - S''_m = \Delta\lambda_E$$

или

$$S'_m = S''_m + \Delta\lambda_E, \quad (78)$$

т. е. местные времена отличаются на величину разности долгот. Аналогично

$$T'_m = T''_m + \Delta\lambda_E. \quad (79)$$

Из рис. 49 видно, что чем дальше наблюдатель к востоку, тем его местное время больше, например $S'_m > S''_m$. Следовательно, для одного момента местные времена увеличиваются при смещении наблюдателей к востоку.

Гринвичское время. Гринвичский меридиан $Q_0Q'_0$ характерен тем, что от него ведется счет долгот, т. е. $\lambda_{Гр} = 0$.

Гринвичским временем называется среднее ($T_{Гр}$) или звездное ($S_{Гр}$) время, считаемое от меридиана Гринвича с $\lambda = 0$. Среднее гринвичское время $T_{Гр}$ называется также всемирным временем (UT_1). По $T_{Гр}$ устанавливаются морские хронометры, обсерваторные часы, оно является аргументом в МАЕ. По меридиану Гринвича установлены также все эталонные системы времен (UTC , TA_1). Для наблюдателей, расположенных на гринвичском меридиане, $T_{Гр}$ является местным временем.

Связь гринвичского и местных времен. На рис. 49 дуга $Q_0\gamma = S_{Гр}$, а $Q'_0\gamma = T_{Гр}$. Для пункта A S'_m больше $S_{Гр}$ на дугу $Q_0Q_1 = \lambda'_E$, откуда

$$S'_m = S_{Гр} + \lambda'_E \text{ и } T'_m = T_{Гр} + \lambda'_E,$$

т. е. местные времена отличаются от гринвичского на долготу места.

§ 25. ПОЯСНОЕ, ДЕКРЕТНОЕ, ЛЕТНЕЕ, МОСКОВСКОЕ И СТАНДАРТНОЕ ВРЕМЯ, ИХ СВЯЗЬ С МЕСТНОЙ СИСТЕМОЙ

В повседневной жизни, в технике, на транспорте применяются системы счета среднего времени, опирающиеся на систему поясных времен и их вариантов (декретное, летнее и др.).

Аналогично для пункта B получим

$$S''_m = S_{Гр} - \lambda''_W; T''_m = T_{Гр} - \lambda''_W.$$

В общем виде эти формулы записываются так:

$$S_m = S_{Гр} \pm \lambda^E_W; \quad (80)$$

$$T_m = T_{Гр} \pm \lambda^E_W. \quad (81)$$

Для часовых углов, например светила C (см. рис. 49), имеем

$$l^*_m = l^*_{Гр} \pm \lambda^E_W. \quad (82)$$

При применении формул (80) и (81) надо помнить, что чем восточнее меридиан, тем время больше или «к востоку времени больше». Очень полезно английское правило:

«Longitude west, Greenwich time best.

Longitude east, Greenwich time least».

Следует учитывать, что при применении формулы (81) дата при $T_{Гр}$ и T_m может измениться.

При решении задач на перевод времен с данного меридиана на другой можно применять два приема: «через Гринвич» и «через разность долгот». Лучше применять прием «через Гринвич», т. е. данное T_m сначала перевести в $T_{Гр}$, а затем долготой — на другой меридиан. Прием «через $\Delta\lambda$ », т. е. по формулам (78) и (79), применяется для береговых пунктов.

Пример 16. На меридиане $\lambda_1 = 131^\circ 27.5'E$; $T'_m = 6^h 18^m 20^s 15/V$ 1985 г. Определить T_m в $\lambda_2 = 61^\circ 43.0'E$.

Решение. Применяем прием «через Гринвич»:

T'_m	6 ^h 18 ^m 20 ^s	15/V — занимаем 1 ^я — 24 ^я
λ_1	8 45 20	переведена в часы по приложению 3 к МАЕ.
$T_{Гр}$	21 32 20	14/V см. также пример 1.
λ_2	4 6 52	
T''_m	1 ^h 39 ^m 22 ^s	15/V

Поясное время. Каждый меридиан Земли имеет собственное местное среднее время, меняющееся при переходе с меридиана на меридиан. Такой счет практически неудобен, поэтому солнеч-

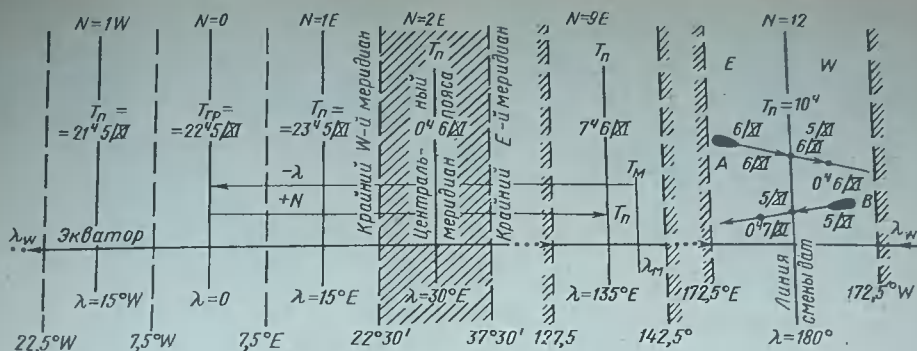


Рис. 50

ное время всегда считалось по одному определенному меридиану для целого района или страны. Обычно за исходный принимался меридиан обсерватории или дворца в столице и его время (истинное, позже — среднее) применялось в целой области. Таковы парижское время, гринвичское время и др. Однако при этом также возникают неудобства: разность времен двух произвольных меридианов (равна $\Delta\lambda$) содержит дробные части единиц, расчеты и перестановки часов неудобны.

Развитие транспорта и появление телеграфа потребовало упорядочения счета времени. На астрономическом конгрессе 1884 г. была рекомендована предложенная Флемингом система поясных времен, постепенно принятая почти во всех странах. В РСФСР поясное время введено в 1919 г., в СССР — в 1924 г., на судах — с 1/V 1918 г. (декрет 449).

В системе поясных времен счет времени ведется на 24 центральных меридианах Земли, отстоящих друг от друга на 15° долготы, так что эти времена отличаются ровно на 1 ч. Территории поясов распространены на $7,5^\circ$ по обе стороны от центральных меридианов, и в этих зонах принято одно общее время.

Поясным временем T_n называется среднее местное время центрального меридиана данного часового пояса, принятое по всей территории пояса. Поясное время отсчитывается от нижней кульминации среднего Солнца на центральном меридиане до данного момента. Теоретическая структура часовых поясов показана на рис. 50. Каждый пояс имеет центральный меридиан, кратный 15° дол-

готы, и крайние (к W и E) меридианы, отстоящие от него на $7^\circ 30'$. Например, долгота центрального меридиана пояса №2E равна $30^\circ E$, крайние меридианы — $22^\circ 30' E$ и $37^\circ 30' E$. Центральный меридиан начального — нулевого пояса имеет $\lambda = 0^\circ$, местное время на нем $T_{гр}$, крайние меридианы — $7^\circ 30' W$ и $7^\circ 30' E$. От него к востоку располагаются пояса от 1 до 12E и к западу от 1 до 12 W. Структура пояса №12 необычна: его центральный меридиан $\lambda = 180^\circ$ одновременно E и W; половина пояса E-я, половина — W-я. поясное время в них одно, но даты разные. Например, $T_n = 10^h 6/XI$ в E-й, а $T_n = 10^h 5/XI$ в W-й. На рис. 50 показано изменение времени по поясам: если в №2E имеем $0^h 6/XI$ (или $24^h 5/XI$), то в поясе №1E — $23^h 5/XI$, в поясе №0 — $22^h 5/XI$ и т. д., а в поясе №3E получим $1^h 6/XI$ и т. д.

Определение № пояса по долготе. Долготу следует разделить на 15° : если остаток меньше $7^\circ 30'$, то частное равно номеру пояса; если остаток больше $7^\circ 30'$, то к частному прибавляется единица. Например, в долготы $\lambda = 142^\circ 50' E$ имеем $\frac{142^\circ 50'}{15} = 9 + 7^\circ 50'$; № = $9 + 1 = 10E$. Еще проще перевести λ в часовой счет и округлить до ближайшего часа. В примере $\lambda = 9^h 31^m 20^s$; № = 10E.

При показанной структуре пояса времени, принятого на его территории, не может отличаться от местного больше чем на 30^m . Однако теоретические границы поясов соблюдаются только в морях, океанах и малообитаемых районах. Фак-

тические границы поясов определяются правительствами стран с учетом административных, географических и экономических особенностей данного района и часто отличаются от теоретических. Границы поясов периодически подправляются (так, в СССР последние изменения введены в 1982 г.). Эти границы показываются на картах часовых поясов, например у нас издается карта № 90080, где, кроме того, приведены особенности счета времени в разных странах и поправки для перехода к $T_{гр}$.

Многим поясным временам присвоены свои названия. Так, время первого пояса ($M = 1E$) называют средневропейским, второго — восточноевропейским, третьего — московским, десятого — приморским, двенадцатого — камчатским. В США времена поясов от 5 до 8 W названы соответственно восточным, центральным, горным и тихоокеанским.

На всей территории пояса время одинаково, поэтому при перемещениях часы не переводятся. При пересечении восточной границы пояса часы переставляются сразу на 1^ч вперед, при пересечении западной — на 1^ч назад.

Переход от местного времени к поясному. В местное время для перехода к поясному следует ввести поправку за разность долгот местного и центрального меридианов ($\Delta\lambda$ в часовой мере). Однако для движущегося судна задачу удобнее решать «через Гринвич». Пусть нам известно T_m для меридиана λ_m (см. рис. 50). С помощью долготы, приведенной в часовую меру, получаем местное время нулевого меридиана, т. е. $T_{гр}$, но оно также и поясное нулевого пояса, поэтому с помощью номера пояса (он представляет λ центрального меридиана в часах) переходим ко времени T_n на центральном меридиане данного пояса:

$$T_{гр} = T_m \mp \lambda_m^E; \quad (83)$$

$$T_n = T_{гр} \pm M_W^E; \quad (84)$$

Обратный переход от T_n к T_m производится аналогично, но по формулам:

$$\begin{aligned} T_{гр} &= T_n \mp M_W^E; \\ T_m &= T_{гр} \pm \lambda_m^E. \end{aligned} \quad (85)$$

Обратим внимание, что местное время переводится только долготой, поясное — номером пояса.

Пример 17. 17.08.85 г. в $\lambda = 82^\circ 10'$ имеем $T_m = 5^h 38^m$. Определить T_n .

Решение. Решение производится «через Гринвич». 1. Определяем M пояса $\frac{82^\circ 10'}{15} = 5^h + 7^\circ 10'$; $M = 5 W$.

2.	T_m	$5^h 38^m$	17.08	переводим $\lambda = 5^h 28^m 40^s$
	λ	$5^\circ 29'$		и округляем до 1 ^ч , так как T_m задано до 1 ^м
	$T_{гр}$	$11^\circ 07'$		
	M	5		
	T_n	$6^h 07^m$	17.08	

Декретное время. С целью экономии электроэнергии на вечернем освещении часы на территории СССР поставлены на 1^ч вперед от поясного времени. Первоначально это время вводилось только летом (летнее время), но декретом СНК 16 VI 1930 г. (и 9 II 1931 г.) оставлено постоянно и названо декретным временем. Декретным временем T_d на территории СССР называется поясное время, увеличенное на 1^ч, т. е.

$$T_d = T_n + 1^h. \quad (86)$$

Часы, идущие по декретному времени, показывают время соседнего к востоку пояса, кроме расположенного на Чукотке пояса $M = 12E$, в котором часы идут по условному поясу $M = 13E$.

Примечание. Пояс $M = 13E$ распространяется до линии смены дат в Беринговом проливе ($\lambda = 169^\circ W$), часы показывают время $M = 11 W$, но дата отличается на 1 д.

Летнее время. В ряде стран перевод часов на 1^ч вперед (иногда на 2^ч) осуществляется только на лето. Такое время увеличенное поясное время называется летним временем (Summer Time). Оно вводится правительственным распоряжением данной страны либо в одни и те же даты (СССР, Египет, Ньюфаундленд и др.), либо особым распоряжением ежегодно (Англия, Аргентина, Австралия, Алжир, Бермуды, Исландия, Испания, Польша, некоторые штаты США и др.). В СССР летнее время (1^ч сверх декретного) введено постановлением Совета Министров СССР № 925 от 24/X 1980 г. — с 1 апреля по 1 октября.

В Англии $BST = T_{гр} + 1^ч$ в 1983 г. вводилось с 20 марта по 23 октября. Сведения о летнем времени можно найти в «Admiralty List of Radio Signals», vol. 5 и на картах часовых поясов.

Московское время. Москва расположена во втором восточном часовом поясе, но декретное время в нем — третьего пояса, а летнее — четвертого. Московским временем называется поясное время третьего восточного пояса, когда действует декретное время (зимой) и четвертого пояса — когда действует летнее время. Оно связано с гринвичским соотношением

$$T_{мск} = T_{гр} + 3^ч (4^ч). \quad (87)$$

Московское время широко применяется на транспорте, в связи, по нему составляются расписания и т. п.

Стандартное время (Standart Time) В зарубежных пособиях стандартным временем называют систему счета среднего времени, официально принятую в данном районе Земли. Это может быть поясное, летнее, декретное, поясное $\pm 30^м$ (как в Индии, Индонезии, Иране, Афганистане, среднем поясе Австралии), местное — определенного пункта (как в Тибетии, Гвиане и др.). Стандартные времена показаны на картах часовых поясов (вернее, это карты стандартных времен), приведены в справочниках и «Nautical Almanac's».

§ 26. СУДОВОЕ ВРЕМЯ, ПЕРЕСТАНОВКА ЧАСОВ, СМЕНА ДАТ. РАСЧЕТЫ, СВЯЗАННЫЕ С СУДОВЫМ ВРЕМЕНЕМ

Судовое время. Судовые часы должны идти по поясному времени какого-либо пояса, в иностранных же портах и территориальных водах могут быть поставлены по стандартному времени. Пояс, по времени которого следует установить судовые часы, выбирается капитаном из организационных и экономических соображений, например, в иностранном порту судовые часы можно поставить на $1^ч$ вперед стандартного; при внутреннем переходе судна через два пояса на часах можно сохранить время исходного пояса, так как предстоит возвращение, и т. п.

Судовым временем T_c называется поясное время того часового пояса, по которому поставлены судовые часы. Номер пояса указывается капитаном и записывается в судовой журнал. Номер пояса, указанный капитаном, очень часто не совпадает со счислимой долготой, поэтому при расчетах он выбирается из журнала, а не определяется по долготе. Судовое время обычно отсчитывается до $1^м$, что достаточно для нужд судовой жизни, эксплуатации и навигации при скоростях до 15—16 уз (при скоростях до 25 уз время следовало бы замечать до $30^с$, а при больших — и до $10^с$).

Перестановка судовых часов. После пересечения границы пояса или исходя

из организационных нужд по распоряжению капитана переставляют часы: вперед на $1^ч$ — при плавании к В, назад на $1^ч$ — при плавании к W. Перестановка часов на $1^ч$ обычно производится на вахте 20—24^ч. Вахтенный помощник, спросив разрешение капитана, объявляет по трансляции: «Сегодня в 22.00 судовые часы будут переведены на $1^ч$ вперед — на 23.00 (или назад — на 21.00)». В назначенное время по хронометру запускают секундомер, переводят часы в штурманской рубке и машине, а вахтенный матрос с секундомером — во всех судовых помещениях, кроме радиорубки. При централизованной службе времени — с электрическими (электронными) часами перевод всех часов выполняется штурманом с центрального поста. О переводе часов делается запись в журнале, например: «22.00 $ол = 15,2$ ($М = -2$), судовые часы переведены на $1^ч$ вперед на 23.00 ($М = -3$)». На карте это от-
$$\frac{22\ 00 - 23\ 00}{15,2}$$
мечается так. В порту может быть такая запись: «23.00 (-5), перешли на стандартное время порта Бомбей 23.30 ($-5^ч30^м$)».

Переход от местного времени к судовому. Из расчетов по МАЕ получается местное среднее время T_m явления, например, кульминации Луны, захода

Солнца и др. Часы же на судне идут по судовому времени T_c , поэтому штурману постоянно приходится пересчитывать местное время в судовое по формулам (83), (84) в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{гр} &= T_m \mp \lambda_W^E; \\ T_c &= T_{гр} \pm \lambda_W^E. \end{aligned} \right\} \quad (88)$$

где λ — долгота места судна, снятая на этот момент;

λ^E — номер пояса, по которому поставлены судовые часы (из журнала); для стандартного времени вместо λ^E вводится поправка времени из справочника или карты.

Пример 18. 23.02.85 г. в $\lambda = 13^\circ 40' E$ заход Солнца $T_m = 17^h 15^m$. Определить T_c ($\lambda^E = 3-E$).

Решение.

T_m	$17^h 15^m$	23.02
λ	0 55	
$T_{гр}$	16 20	
λ^E	3	
T_c	$19^h 20^m$	23.02

Приближенный расчет S_m по T_c . Для проверки освоения вопросов измерения времени полезно решить аналитически и графически задачу перехода от T_c к S_m . При решении сначала получаем T_m , затем на местном меридиане рассчитываем S_m , причем $\alpha_\odot$ — приближенно по дате.

Пример 19. 10 ноября $T_c = 17^h 50^m$ ($\lambda^E = -11$) в $\lambda = 143^\circ 20' E$. Определить приближенно S_m и показать на чертеже.

Решение.

T_c	$17^h 50^m$	10.11
λ^E	11	
$T_{гр}$	6 50	
λ	9 33	
T_m	16 23	(рис. 51)
12	12	
$t_{(s)}$	4 23	
$\alpha_\odot$	15 12	
S_m	$19^h 35^m$	

Расчет $\alpha_\odot$.
 На 22.12 $\alpha = 18^\circ$;
 $\Delta\alpha = 42^\circ \cdot 4 \text{ м/д} = 168^\circ = 2^\circ 48^\circ$;
 $\alpha_\odot = 15^\circ 12^\circ$.

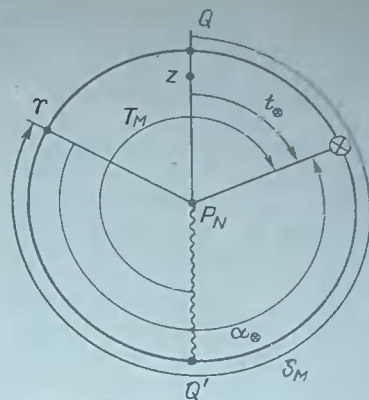


Рис. 51

Линия смены дат. Меридиан 180° Земли разделяет E и W долготы. В системе поясных времен этот меридиан является центральным меридианом пояса $\lambda^E = 12$, имеющего E и W части. Поясное время в них одинаково, но даты разные (см. рис. 50), поэтому по меридиану 180° проходит линия смены дат (или демаркационная линия времени). Официальная линия смены дат в некоторых районах Земли отклоняется от меридиана 180° , чтобы изменения даты не вызывали неудобств у местных жителей. Точные границы линии дат указаны на картах часовых поясов и даны в справочниках. При пересечении этой линии дату следует изменять.

Правила смены даты. Смену даты на судах принято производить не в моменты пересечения линии даты, а в полночь, следующую за переходом.

1. При следовании судна восточными курсами (см. рис. 50, судна A) от 0 до 180° с полуночи, следующей за пересечением линии дат, на судне повторяется та же дата, что и была (например, 6/11 на рис. 50).

2. При следовании западными курсами от 180 до 360° с полуночи, следующей за пересечением судном линии дат, на судне дата изменяется сразу на две единицы, например с 5/XI на 7/XI (см. рис. 50, судно B). Изменение даты записывается в судовую журнал.

3. При применении этих правил с момента пересечения 180° меридиана и до следующей полуночи даты сохраняются, а долготы в расчетах считаются сверх

180° в том же направлении, например для судна А (см. рис. 50) считаем 180°50' Е и т. д., для судна В — 180°55' W и т. д. Номер пояса также сохраняется прежним до полуночи.

Расчет гринвичского времени по показаниям судовых часов и хронометра. Циферблаты судовых часов и хронометров разделены на 12ч, сутки же имеют 24ч, поэтому часовые деления циферблатов имеют два значения, например 1 и 13ч, 4 и 16ч и т. д. При наблюдениях записываются: момент хронометра $T_{хр}$, т. е. секунды, минуты и тот час, который видит наблюдатель; показания судовых часов T_c в 24-часовом счете; номер пояса из журнала.

При обработке наблюдений. прежде

Решение.

1)	24ч ← 1ч	2)	
T_c	9ч50 ^м 3.10 [↑]	$T_{хр}$	10ч51 ^м 35 ^с
λ	11	u	-1 12
Приблиз. $T_{гр}$	22ч50 ^м 2.10	$T_{гр}$	22ч50 ^м 23 ^с

2.10 — точное гринвичское время и дата.

всего определяются приближенное $T_{гр}$ и гринвичская дата по формуле

$$T_{гр} \approx T_c \mp \lambda_{гр}^E.$$

Затем определяется точное (до 1с) гринвичское время в 24-часовой шкале по формуле

$$T_{гр} = T_{хр} + u_{хр}, \quad (189)$$

где $u_{хр}$ — поправка хронометра, выбранная из журнала и экстраполированная на данное время.

Так же рассчитывается точное поясное время, только его поправка берется относительно T_{II} .

Пример 20. 3 октября наблюдали Солнце: $T_{хр} = 10^h 51^m 35^s$; $u = -1^m 12^s$; $T_c = 9^h 50^m 3.10$. ($\lambda = 11E$). Определить точное $T_{гр}$ и дату.

§ 27. ПОНЯТИЕ О ЭТАЛОННЫХ СИСТЕМАХ СЧЕТА ВРЕМЕНИ. ПОНЯТИЕ О КАЛЕНДАРЕ И ЭРАХ

Всемирное координированное время. Теоретически равномерное время (на меридиане Гринвича), принятое при предвычислении координат светил¹, называется эфемеридным временем (*ЕТ*). Это теоретически равномерная шкала времени, по которой составлен астрономический ежегодник. За единицу измерения *ЕТ* принята *эфемеридная секунда* — 1/31 556 925,974 7 часть тропического (1900) года. Для реализации этого времени необходимо получить на приборах равномерную единицу и равномерную шкалу (систему счета) времени. Наиболее равномерной является шкала международного *атомного времени* UT_A ; начальная эпоха (начало отсчета) его неизменна; его единицей является *атомная секунда* (см. § 21). Эта шкала воспроизводится атомными часами (эталоны частоты). Атомное время UT_A уста-

навливается международным бюро времени на основе показаний не менее семи атомных часов, функционирующих в различных учреждениях, в соответствии с определением атомной секунды. Это — эталонная система времени, не связанная с суточным вращением Земли.

Из астрономических наблюдений суточного движения звезд получается всемирное время UT_0 , относящиеся к мгновенному положению полюса Земли в данном месте. Вследствие движения полюсов Земли координаты φ и λ пунктов наблюдений изменяются и все UT_0 надо отнести к среднему положению полюса введением поправки $\Delta\lambda_p$. С учетом поправки за движение полюса получим время UT_1 ($T_{гр}$), одинаковое всюду:

$$UT_1 = UT_0 + \Delta\lambda_p. \quad (90)$$

По данным ряда служб времени вводится эталонное время в системе UT_1 ($T_{гр}$), это точная шкала суточного

¹ Предвычисленные координаты называются эфемеридами.

вращения Земли (без учета сезонных и других колебаний). Эти две шкалы связываются между собой.

Всемирным координированным временем (UTC) называется григорианское среднее время, выраженное в атомных секундах и согласованное по показаниям ряда служб времени. Эта шкала воспроизводится в СССР Государственным первичным эталоном времени и частоты, и по ней ведутся передачи сигналов эталонного времени.

Время *UTC* в определенный момент точно согласуется со шкалой UT_1 и воспроизводит время, определяемое вращением Земли, в атомных секундах. Однако через некоторое время вследствие разности атомной и средней секунд и от неравномерности вращения Земли шкала *UTC* расходится с астрономическим временем UT_1 , т.е. образуется разность ΔT_K шкал времени:

$$\Delta T_K = UT_1 - UTC. \quad (91)$$

Величина ΔT_K представляет собой поправку координированного времени для перехода к $T_{гр}$ (UT_1). По современным требованиям отклонения ΔT_K не должны превышать $0,7^c$, поэтому время от времени шкала *UTC* корректируется, но точно на 1^c . Рекомендуется корректировку вводить 1-го числа кварталов года (1 января и т.д.). Ноль шкалы *UTC* смещается ближе к нулю UT_1 подачей сигнала $0,0^c$ в $23^h59^m61^s$ (если $\Delta T_K = +1^c$), или в $23^h59^m59^s$, если $\Delta T_K = -1^c$. Такие корректировки производят все службы мира в одно и то же время через свои радиостанции (1 января и т.д.). Расхождения шкал в любое время указываются при подаче сигналов времени (кроме шести точек) маркированными сигналами — двоячными точками, как показано в § 34. Из сказанного следует твердо усвоить, что все сигналы времени подаются в шкале *UTC*, их расхождение с $T_{гр}$ не превышает $0,7^c$ и указывается в сигнале времени, а время от времени происходит их корректировка, приближающая *UTC* к $T_{гр}$.

Вследствие корректировки нуль шкалы *UTC* отходит от нуля UTA — атомной шкалы, но всегда на целые секунды (1/1 1973 г. — на $+12,0^c$).

Понятие о календаре и эрах. Календарем называются системы счета боль-

шого количества средних солнечных суток, принятые в повседневной жизни человека. Исторически сложились три периода, принятые в календаре: неделя, месяц, год.

Месяц имеет в основе оборот Луны вокруг Земли — лунный месяц, равный $29,53^d$. Календарный месяц имеет разное число суток — $28^d(29)$, 30^d , 31^d , причем их распределение в году, последовательность, а также их названия, сохранившиеся со времен Римской империи, вызваны случайными историческими причинами и очень неудобны.

Календарный, или *гражданский*, год имеет в основе период обращения Земли вокруг Солнца — тропический год, равный $365,2422$ средних суток. Календарный год заключает всегда целое, но разное число суток: *простые годы* — 365^d и *високосные* — 366^d . Високосными годами считаются те, номер которых делится на четыре, за исключением лет, кратных 100, первые две цифры которых на 4 не делятся (например, 1700, 1800, 1900) — эти годы считаются простыми. Так, годы 1968, 1972, 2000 високосные; 1969, 1975, 2100 — простые. Такое чередование простых и високосных годов принято в действующем сейчас *новом стиле*, или григорианском календаре, отличающемся от *старого стиля* на 13^d и введенном в СССР с 14/II 1918 г. (вместо 1/II было предписано считать 14/II 1918). В старом стиле (юлианском календаре) високосных годов было больше: исключение годов, кратных 100, в приведенном правиле отсутствовало, и календарный год больше отличался от тропического.

Трудность в согласовании естественных периодов в 29^d , 53 и $365,2422^d$ с искусственными (календарными) месяцами и годом, состоящими из целых суток, привела к образованию трех систем календарей: *лунного*, *солнечного* и *лунно-солнечного*. Лунный календарь, принятый и сейчас в некоторых странах востока, весьма трудно согласовывается с солнечным. Лунно-солнечных календарей в развитых странах нет. В большинстве государств в настоящее время принят солнечный календарь. Несовершенство современного календаря (семидневная неделя, переменная продолжительность месяцев, их распределение и

др.) вызвали многочисленные предложения о его реформе. Так, в Организации Объединенных Наций несколько раз обсуждался вопрос о введении усовершенствованного всемирного календаря, но это отвергалось представителями США и Англии по религиозным мотивам.

Эры. Начало счета календарных годов называется *эрой*. В древности и в средние века существовало множество эр: «от сотворения мира», от воцарения разных государей (эра Набонассара, эра Диоклетиана и т. п.). Наша *новая эра* (н. э.) имеет случайное происхождение: в 248 г. эры Диоклетиана при составлении таблиц пасхи монах Дионисий принял, что мифическое «рождество Христово» произошло за 532 г. до этого, и установил эру «от рождества Христа». Цифра 532, по-видимому, была принята исходя из «великого круга» ($19 \times 28 =$

$= 532$ г.) повторяемости дней пасхи в те же дни недели, лунного месяца и года. В России новая эра введена с 1 января 1700 г., до этого счет велся от «сотворения мира» (шел 7208 г. этой эры), а новый год начинался с 1 сентября. Счет годов в новой эре ведется как вперед от начального года, так и назад, например 46 г. до н. э.

В обсерваторной астрономии и хронологии счет больших промежутков ведется в днях так называемого *юлианского периода* (введенного историком Ю. Скалигером), под которым понимается непрерывный счет суток и их долей от некоторой условной даты — полдень 1 января 4713 г. до н. э. Число протекших «юлианских дней» проводится в астрономических ежегодниках. Например, 10 ноября 1977 г. $T_{\text{гр}} = 0^{\text{ч}}$ дней юлианского периода 2 443 457.5 (см. приложение 2.2).

Глава 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДИМЫХ КООРДИНАТ СВЕТИЛ. МОРСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЕЖЕГОДНИК

§ 28. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФЕМЕРИД. ПОНЯТИЕ ОБ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЕЖЕГОДНИКАХ

Способы определения эфемерид. Координаты всех светил вследствие рассмотренных выше причин с течением времени изменяются. При решении астрономических задач необходимо иметь координаты данного светила на момент наблюдений. Это возможно, если их значения вычислить по формулам небесной механики на заданные моменты вперед. Предвычисленные координаты светил называются эфемеридами. В настоящее время на судах возможны три пути получения эфемерид светил: из ежегодников, вычислением на ЭВМ и смешанное решение.

Выборка эфемерид из ежегодников. До сих пор основным приемом получения всех астрономических данных в море является выборка их из МАЕ; задачи рассмотрены ниже.

Вычисление эфемерид на ЭВМ. В связи с тем что на судах мирового флота распространяются настольные судовые ЭВМ, этот путь вычисления эфемерид в ближайшее время получит широкое

применение. Так, он может быть реализован в судовой клавишной ЭВМ. Поэтому в приложении 2 приведены общая последовательность и формулы для вычисления эфемерид Солнца и звезд: их следует представлять при работе с ЭВМ.

Смешанное решение. В ряде стран (США, Англии, Франции) уже несколько лет (с 1977 г.) выпускается сокращенный «Ежегодник для калькуляторов» («Alphapas for Computers») на несколько лет, позволяющий по его исходным данным вычислить (интерполяцией на ЭКВМ) t и δ . В ближайшее время предполагается выпустить такой ежегодник и у нас.

Ежегодники. Эфемериды светил и другие предвычисленные данные помещаются в изданиях, называемых Астрономическими ежегодниками, выпускаемыми ежегодно на 2—3 года вперед. В Институте теоретической астрономии АН СССР в Ленинграде вычисляются следующие ежегодники:

1. *Астрономический ежегодник СССР (АЕ)*, предназначенный для обсервато-

рий, полевых астрономо-геодезических, научно-исследовательских работ; в нем эфемериды даны до $0,01''$, по аргументу эфемеридное время; издается АН СССР.

2. *Морской астрономический ежегодник (МАЕ)*, предназначенный для нужд мореплавания; в нем эфемериды даны до $0,1'$ по аргументу $T_{гр}$; издается ГУНиО Министерства обороны.

3. *Авиационный астрономический ежегодник (ААЕ)*, предназначенный для нужд авиации; в нем эфемериды даны до $1'$ по аргументу $T_{гр}$; издается Воениздатом Министерства обороны СССР.

В большинстве развитых стран выпускаются аналогичные издания.

Кроме официальных ежегодников, в СССР и за рубежом выпускаются популярные Астрономические календари, предназначенные для школ и любителей астрономии (в них эфемериды даны до $0,1'$ или $1''$, но через большие промежутки времени, в основном по аргументу $T_{гр}$). Кроме эфемеридного отдела, в них помещаются популярные и обзорные статьи по астрономии и ее истории. Таков, например, «Астрономический календарь» издания Всесоюзного астрономо-геодезического общества СССР.

Из зарубежных морских ежегодников назовем совместный англо-американский «The Nautical Almanac», издаваемый в Лондоне и Вашингтоне; «Nautisches Jahrbuch», издаваемый отдельно в ГДР и ФРГ; «Ephemerides Nautiques», издаваемый во Франции. Кроме официальных ежегодников, частные фирмы за рубежом выпускают ежегодники-справочники, в которых эфемеридный отдел заимствован из официальных ежегодников, но, кроме того, даются сведения по приливам, из лотии, законодательства,

морской практики и другие, например популярный среди моряков «Woopl's Nautical Almanac» и более примитивный «Reed's Nautical Almanac» и др.

Звездные каталоги. Сведения для расчета координат звезд в ежегодниках берутся из звездных каталогов. В каталогах приводятся средние экваториальные координаты звезд и их изменения, полученные из абсолютных наблюдений звезд, а также дифференциальным методом на определенную дату — эпоху. Известны фундаментальные каталоги «GC» (общий каталог Босса), «FK-4» (каталог Астрономического общества) и др.

Морской астрономический ежегодник. В СССР МАЕ выпускается с 1930 г. (первый русский Ежегодник выходил с 1814 по 1855 г.). За это время его форма и частично содержание менялись четыре раза, последний раз в 1976 г. В результате последнего изменения его форма приведена в соответствие с мировым стандартом. Изменения коснулись объема Ежегодника, таблиц восхода и захода, интерполяционных таблиц, вспомогательных данных и инструкций. Содержание МАЕ и их устройство во всех странах теперь приблизительно одинаковы: отличия касаются только некоторых сведений. В ежедневных таблицах (прил. 4.1; 4.2) МАЕ на каждый час $T_{гр}$ приведены: звездное время, часовые углы и склонения Солнца, планет и Луны, а также время восхода, захода Солнца и Луны, сумерки и др. Интерполирование на промежуточное время производится по основным интерполяционным таблицам в конце МАЕ. Склонения и звездные дополнения звезд приведены в таблицах «Звезды» (прил. 4.3; 4.4) и частично на вкладыше (в зарубежных МАЕ — в ежедневных таблицах).

§ 29. УСТРОЙСТВО ТАБЛИЦ МАЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧАСОВЫХ УГЛОВ И СКЛОНЕНИЙ СВЕТИЛ

Основные данные помещены в ежедневных таблицах МАЕ (Приложения 4.1—4.2), занимающих большую его часть. На каждом развернутом листе МАЕ приведены данные для трех суток: на левой странице — часовые углы точки Овна (звездное время), часовые углы и склонения Солнца, Венеры, Марса,

Юпитера и Сатурна; на правой странице — часовые углы и склонения Луны, время ее восхода и захода на каждый день, время восхода, захода Солнца и сумерек на среднюю дату листа. Внизу страниц приведены дополнительные данные: время кульминации, параллаксы, радиусы и др. Рассмотрим принцип

устройства таблиц МАЕ для часовых углов и склонений светил

Получение звездного времени. Аргументами для входа в МАЕ являются григорианская дата, $T_{гр}$ и название светила, поэтому найдем зависимость, связывающую часовую точку Овна с $T_{гр}$. Применяя основную формулу времени к среднему Солнцу, получим:

$$S_{гр} = t_{гр}^c + \alpha_{гр}$$

или, учитывая, что $S = t^h$; $t = T \pm 12^h$, имеем

$$t_{гр}^h = T_{гр} \pm 12^h + \alpha_{гр} \quad (92)$$

По этой формуле для значений $T_{гр}$ через 1^h предвычислены и помещены в МАЕ табличные значения t_T точки Овна (помечены $t_{гр}$). Поправка за избыток ΔT сверх часа получается дифференцированием формулы (92) по T :

$$\frac{dt^h}{dT} = 1 + \frac{d\alpha_{гр}}{dT}$$

Переходя к конечным приращениям, получим

$$\Delta t^h = \Delta T + \left(\frac{\Delta \alpha_{гр}}{\Delta T} \right) \Delta T$$

В скобках $\Delta \alpha_{гр}$ есть изменение $\alpha_{гр}$ за $\Delta T = 1^h = 60^m = 900'$. Учитывая, что

Пример 21. 11.05 85 г. в $T_{гр} = 5^h 45^m$, $\lambda = 82^\circ$, $\lambda = 104^\circ 51.5'$ л., $T_{эл} = 9^h 44^m 18^s$, $\alpha_{эл} = 18^\circ 53'$.

Определить $t_M^h(S_M)$ по МАЕ.

Решение.

$T_{гр}$	$5^h 45^m$	11.05	$T_{эл}$	$9^h 44^m 18^s$
λ	8		λ	0 53
$T_{гр}$	$21^h 45^m$	10.05	$T_{гр}$	$21^h 45^m 11^s$
аргументы для входа в МАЕ				
Из МАЕ на 10.05	$T_{гр} = 21^h$		t_T	$183^\circ 35.9'$ (см. прил. 4-1)
Из ОИТ на $\Delta T = 45^m 11^s$			ΔT	11 19.6
			$t_{гр}^h$	194 55.5
			λ	104 51.5
			t_M^h	299 47.0

Получение часовых углов и склонений звезд. Формула для часового угла звезды получается из основной формулы времени (69), записанной для местного

$\Delta \alpha_{гр} = 59.14'$ за сутки, получим $\frac{\Delta \alpha_{гр}}{\Delta T} = \frac{59.14'}{24 \cdot 900'} = 0.0027379$ — это коэффициент μ перевода единиц среднего времени в звездные. Следовательно,

$$\Delta t^h = (\Delta T + \mu \Delta T) \quad (93)$$

где ΔT — приращение $T_{гр}$ сверх действующего часа в м и с.

Формула (93) представляет перевод промежутка ΔT в звездные единицы и в градусную меру (см. формулу (77)).

Поправки, рассчитанные по формуле (93), помещены в конце МАЕ в «Основных интерполяционных таблицах» (ОИТ) на каждую минуту и секунду часа. В таблицу входят с минутами ΔT (сверху) и секундами (слева) в графу «Точка Овна». Выбрав Δt^h , придают ее к часовому «табличному» значению t , и далее получают местное звездное время

$$t_M^h = t_T + \Delta t^h = t_M^h \quad (94)$$

Вычисления производят по схеме, показанной в примере 21. Величину t_M^h определяют при подборе звезд по звездному глобусу или таблицам, а также как промежуточную величину при определении t_M^h .

меридиана с долготой λ , решением ее относительно t_M^h

$$t_M^h = S_M - \alpha_* = t_M^h + \tau_*$$

где $\tau_* = 360^\circ - \alpha_*$.

Подставляя в эту формулу значение t_m^V из формулы (94), получим

$$t_m^* = t_T + \Delta t^V \pm \lambda_W^E + \tau_*. \quad (95)$$

Величины τ_* , а также δ_* приведены в разделе «Звезды. Видимые места» (с. 270 МАЕ) для 159 наиболее ярких звезд в порядке возрастания их α (приложения 4.3—4.4). На левой странице по прямому восхождению, номеру и месту звезды в созвездии приведены τ_* — градусы на год, минуты по месяцам. На правой странице по номеру и собственному имени звезды (если оно есть) приведены δ_* . Так как минуты τ_* и δ_* даны на первое число месяца, на проме-

жуточные даты приходится интерполировать их между колонок. На вкладыше к МАЕ, приложение V, величины τ и δ для 50 наиболее ярких звезд приведены через 10 дней, поэтому интерполировать их не нужно, а значения получаются точнее. Там же приведены τ и δ Полярной звезды. Таким образом, в МАЕ даны координаты 160 звезд, из них 119 имеют собственные имена. Названия созвездий (русские и латинские) и некоторых звезд и их номера приведены на последней странице МАЕ. Вычисление t и δ звезд производится по схеме примера 21 с добавлением τ_* и выборкой δ_* .

Пример 22. 11.05. 85 г. в $T_c = 19^h44^m$ ($\lambda_c = 6W$), $\lambda = 103^\circ46,0' W$ наблюдали α Б. Медведицы. $T_{xp} = 1^h43^m35^s$, $u_{xp} = +1^m10^s$. Определить t_m^* , $t_{гр}$ (меньший 180°) и δ_* .

Решение.

T_c	19^h44^m	11.05	T_{xp}	$1^h43^m35^s$
λ_c	6		u_{xp}	+ 1 10
$T_{гр}$	1^h44^m	12.05	$T_{гр}$	$1^h44^m45^s$
Из ежедневных табл. МАЕ на 12.05 $T_{гр} = 1^h$				t_T $244^\circ44,9'$
Из ОИТ на $\Delta T = 44^m45^s$				Δt 11 13,1
				$t_{гр}^V$ 255 58,0
				λ_w 103 46,0
				t_m^V 152 12,0
Из табл. «Звезды», левая с., № 72, α Б. Медведицы (см. прил. 4.3)				τ_* 194 17,3
				t_m^* $346^\circ29,3' W$
				$t_{пр}$ $13^\circ30,7' E$
Из табл. «Звезды», правая с., № 72, Дубхе (см. прил. 4.4)				δ_* $61^\circ50,1' N$

Получение часовых углов и склонений Солнца, планет и Луны. Формулу, выражающую часовой угол через аргумент $T_{гр}$, можно получить из основной формулы времени, записав ее два раза — для среднего Солнца и для данного светила:

$$S_{гр} = t_{гр}^{(s)} + \alpha_{(s)}; \quad S_{гр} = t_{гр}^{св} + \alpha_{св}.$$

В один и тот же момент левые части равны, поэтому

$$t_{гр}^{св} + \alpha_{св} = t_{гр}^{(s)} + \alpha_{(s)},$$

или

$$t_{гр}^{св} = t_{гр}^{(s)} + \alpha_{(s)} - \alpha_{св}.$$

Но по формуле (72) имеем: $t_{гр}^{(s)} = T_{гр} \pm 12^h$.

Подставляя значение $t_{гр}^{(s)}$, получим формулу для часового угла светила:

$$t_{гр}^{св} = T_{гр} \pm 12^h + \alpha_{(s)} - \alpha_{св}. \quad (96)$$

По этой формуле для $T_{гр}$ через интервал в 1^h предвычислены табличные значения t_T часовых углов Солнца, четырех планет и Луны, помещенные в

ежедневных таблицах МАЕ в колонке $t_{\text{гр}}$.

Приращение часового угла за промежуток ΔT сверх целого часа $T_{\text{гр}}$ получается следующим путем. Дифференцируя выражение (96) по T и переходя к конечным приращениям, получим

$$\frac{\Delta t}{\Delta T} = 1 + \frac{\Delta \alpha_{\odot}}{\Delta T} - \frac{\Delta \alpha_{\text{св}}}{\Delta T}.$$

Принимая изменения прямых восхождений за $1^{\circ} = 60' = 900''$ и прибавив и отняв постоянную величину $\frac{\Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}}}{900}$, получим

$$\Delta t = \left(\Delta T + \frac{\Delta \alpha_{\odot} - \Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}}}{900} \Delta T \right) + \left(\frac{\Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}} - \Delta \alpha_{\text{св}}}{900} \Delta T \right). \quad (97)$$

Таким путем изменение часового угла светила за промежуток $\Delta T^{\text{м.с}}$ разделено на две части: равномерную Δt_1 (в первых скобках), не зависящую от даты, и неравномерную Δt_2 меняющуюся по датам. В величину Δt_1 входят: $\Delta \alpha_{\odot}$ — изменение прямого восхождения среднего Солнца за час, равное $2,5'$; $\Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}}$ — наибольшее возможное изменение α данного светила за час; для Солнца $2,8'$; для Венеры $3,5'$; для Луны $43,5'$. Величина Δt_1 представляет перевод промежутка $\Delta T^{\text{м.с}}$ в равномерное изменение t , т. е. как бы во время, считаемое по данному светилу в угловых градусах и минутах.

Значения Δt_1 для Солнца (планет) и Луны вычислены для каждой минуты и секунды часа и приведены в ОИТ в отдельных колонках.

Для Солнца и планет величина $\Delta \alpha_{\odot} - \Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}}$, представляющая как бы переводной коэффициент, принята в МАЕ одинаковой по наибольшему $\Delta \alpha$ для Венеры, равному $3,5'$, поэтому второй член в скобках равен $-1,0'$, а Δt_1 за час составит $14^{\circ}59'$ и доли его за меньшие промежутки. Для Луны величина $\Delta \alpha_{\odot} - \Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}}$ составит $-41,0'$, поэтому Δt_1 за час равна $14^{\circ}19'$.

Вторая поправка $\Delta t_2 = \left(\frac{\Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}} - \Delta \alpha_{\text{св}}}{900} \right) \times \Delta T$ учитывает неравномерность изменения α Луны, Солнца и планет.

Величина $\Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}} - \Delta \alpha_{\text{св}} = \bar{\Delta}$ называется квазиразностью (искусственной разностью) и предвычисляется для Солнца и планет на среднюю дату листа МАЕ (приведена внизу колонок i), а для Луны — на каждый час (см. прил. 4.1, 4.2).

Квазиразностью $\bar{\Delta}$ в МАЕ называется разность между наибольшим возможным изменением α светила в 1° и фактическим изменением его за данный час. Квазиразность в нашем МАЕ всегда положительна, так как взято $\Delta \alpha_{\text{св}}^{\text{max}}$ (в английском — для Венеры бывает отрицательна). Например, для Солнца наибольшая $\bar{\Delta} = 3,5' - 2,3' = 1,2'$; для Луны — $\bar{\Delta} = 18,0'$; для планет — $\bar{\Delta} = 6,0'$.

Квазиразность интерполируется на данную минуту, для чего надо войти с выбранной $\bar{\Delta}$ и минутой $\Delta T_{\text{гр}}$ в две крайние колонки ОИТ. Следовательно, $t_{\text{гр}}$ на данный момент $T_{\text{гр}}$ получается по формуле

$$t_{\text{гр}}^{\text{св}} = t_2 + \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (98)$$

Для получения местного часового угла светила имеем формулу

$$t_{\text{св}}^{\text{св}} = t_2 + \Delta t_1 + \Delta t_2 \pm \Delta t_3^{\text{св}} \quad (99)$$

Вычисления производят по схеме, приведенной в примере 23. Склонение Солнца, Луны и планет приводится также через час, поэтому на промежуточное время его следует интерполировать в соответствии с формулой

$$\delta = \delta_7 + \frac{\Delta}{60} \Delta T, \quad (100)$$

где δ_7 — значение склонения на ближайший меньший час $T_{\text{гр}}$, выбранное из ежедневных таблиц;

Δ — часовая разность склонений со своим знаком, выбираемая внизу колонки для Солнца и планет и рядом с δ — для Луны (иногда для Венеры и Солнца Δ следует образовать самому).

Интерполирование производят по двум крайним колонкам ОИТ, входя в них с минутой ΔT и Δ .

Пример 23. 10.05. 85 г. в $T_c = 15^h 45^m$ ($\lambda = 11^\circ W$); $\lambda = 168^\circ 33' W$ наблюдали Солнце $T_{xp} = 2^h 46^m 37^s$; $u_{xp} = -1^m 15^s$. Определить $t_M^\odot$ и $\delta_\odot$.

Решение.

T_c	$15^h 45^m$	10,05	T	$2^h 46^m 37^s$
λ	11		u	- 1 15
$T_{гр}$	$2^h 45^m$	11,05	$T_{гр}$	$2^h 45^m 22^s$
Из МАЕ на 11.05, $T_{гр} = 2^h$ (см. прил. 4.1)	$t_T^\odot$	210° 55,0'	δ_T	$17^\circ 49,9' \left(\frac{1,0}{-0,7} \right)$
Из ОИТ по $\Delta T = 45^m 22^s$	Δt_1	11 19,7	$\Delta \delta$	$\pm 0,5$
Из ОИТ по $\bar{\Delta} = 1,0'$ и $\Delta T = 45^m$	Δt_2	0,8	$\delta_\odot$	$17^\circ 50,4' N$
	$t_{гр}$	222 15,5		
	λ_W	168 33		
	$t_M^\odot$	53° 42,5' W		

Пример 24. 12.05. 85 г. в $T_c = 5^h 44^m$ ($\lambda = 12^\circ E$); $\lambda = 165^\circ 35' E$ наблюдали Луну $T_{xp} = 5^h 43^m 52^s$; $u_{xp} = +0^m 38^s$. Определить t_M^ζ и δ_ζ .

Решение.

T_c	$5^h 44^m$	12,05	T	$05^h 43^m 52^s$
λ	13		u	+ 0 38
$T_{гр}$	$17^h 44^m$	11,05	$T_{гр}$	$17^h 44^m 30^s$
Из МАЕ на 11.05, $T_{гр} = 17^h$	t_T^ζ	159° 34,8'	δ_T	$19^\circ 36,9' \left(\frac{-12,0}{-10,4} \right)$
По $\Delta T = 44^m 30^s$ из ОИТ	Δt_1	10 37,1	$\Delta \delta$	- 7,7
По $\Delta T = 44^m$ и $\bar{\Delta} = 12,0'$	Δt_2	8,9	δ_ζ	$19^\circ 29,2' S$
	$t_{гр}$	170 20,8		
	λ_E	165 35		
	t_M^ζ	335 55,8 W		
	$t_{гр}$	24° 04,2' E		

§ 30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ КУЛЬМИНАЦИИ СВЕТИЛ

В море часто требуется получить время какого-либо астрономического явления, главным образом захода и восхода Солнца, кульминаций Солнца и Луны. В общем случае для любого светила эта задача решается путем определения из параллактического треугольника часового угла этого светила в заданном его положении. Для кульминаций эта общая задача упрощается, так

как для верхней кульминации $t_M = 0^h$, а для нижней $t_M = 180^\circ$, откуда время кульминации любого светила можно рассчитать с любой точностью (например, до 1^с). Практически высокой точности не требуется, достаточно 1^м, поэтому в МАЕ для Солнца, планет и Луны приводится предвычисленное местное среднее время кульминации их на меридиане Гринвича.

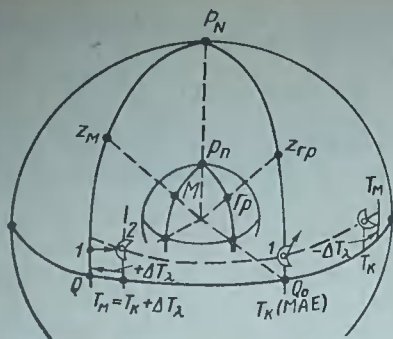


Рис. 52

Определение времени кульминации Луны, Солнца и планет (до 1^м). Для Солнца и Луны предвычисленное T_m на Гринвиче, обозначенное T_n , приводится на правой странице внизу для верхней (в), а для Луны и нижней (н) кульминаций по дате. Для планет приводится только время верхней кульминации на среднюю дату листа — внизу левой страницы (см. прил. 4.1, 4.2).

Это местное время на меридиане Гринвича (T_n) относится только к меридиану с долготой $\lambda = 0^\circ$. Для наблюдателя с долготой λ_m следует получить свое T_m , которое отличается от T_n , так как за время поворота Земли (сферы) на величину λ_m светило, имеющее собственное движение, переместится в другую точку сферы. На рис. 52 в положении 1 Луна кульминирует на меридиане Гринвича (T_n). Собственное движение Луны (прямое) показано стрелкой. Если наблюдатель М расположен в западной долготы λ_w , то за время поворота сферы на угол Q_0Q Луна переместится из положения 1 в положение 2, и куль-

минация ее наступит позже на угол ΔT_λ , на который должна дополнительно повернуться сфера, поэтому

$$T_m = T_n + \Delta T_\lambda \quad (101)$$

Для наблюдателя в восточной долготы кульминация, наоборот, наступит раньше (по местному времени), чем на Гринвиче, т. е.

$$T_m = T_n - \Delta T_\lambda \quad (102)$$

В МАЕ величина и знак поправки ΔT_λ определяются по формуле

$$\Delta T_\lambda = \frac{\mp \Delta^m}{360^\circ} \lambda^\circ, \quad (103)$$

где Δ — разность T_n с предыдущими сутками, если долгота восточная, и с последующими сутками, если долгота западная. Обычно при восточной долготы знак «—», при западной «+».

Примечание. У планет собственное движение бывает обратным, тогда знаки — противоположные.

По формуле (103) в МАЕ составлена таблица (приложение 1Б), в которую входят с разностью Δ , вычисленной по ежедневным таблицам — от данных суток к предыдущим при λ_E , и наоборот — при λ_W (для планет разности получают трехсуточные и их надо делить на 3), и долготой места. Для Солнца разности Δ не превышают 1^м, поэтому поправкой ΔT_λ обычно пренебрегают и принимают $T_n = T_m$.

Пример 25. 11.05.85 г. в $\lambda = 141^\circ 15' E$ определить T_c ($\lambda = 11E$) верхней кульминации Луны и Солнца.

Решение. Из МАЕ на 11.05 на правой странице внизу выбираем T_n верхней кульминации Луны и Солнца и образуем разности с предыдущими сутками $\Delta = -52^m$ и 0^m .

На меридиане Гринвича 11.05
По $\Delta = -52^m$ и $\lambda = 141^\circ$
(из приложения 1Б)

Перевод T_m в T_c приемом
«через Гринвич»

	Луна	Солнце
T_n	6 ^h 00 ^m (—52 ^m)	11 ^h 56 ^m (0 ^m)
ΔT_λ	— 20	0
T_m	5 40 11.05	11 56 11.05
λ_E	9 25	9 25
$T_{гр}$	20 15 10.05	2 31
λ_E	11	11
T_c	7 ^h 15 ^m 11.05	13 ^h 31 ^m

«Лунные сутки», т. е. промежуток между двумя кульминациями, продолжительнее средних приблизительно на 50^м, поэтому в некоторые дни кульминации Луны на Гривиче не происходит (в МАЕ эти случаи отмечены прочерком). Например, если 3.05.85 $T_k = 23^h 11^m$, то, прибавив «лунные сутки» 24^ч50^м, получим следующую кульминацию Луны 0^ч01^м 5.05 (точнее, 0^ч07^м), а 4.05 кульминации не будет. В подобных случаях следует брать последующую кульминацию (при восточной долготе) и интерполировать «через дату» с предыдущей кульминацией (при λ_W — наоборот).

Решение.

t_m^*	360°00,0'		
τ_*	146 15,0	из таблиц «Звезды» для α Волопаса	
t_m^V	213 45,0		
λ_E	107 42		
$t_{гр}^V$	106 03,0		
t_T	93 21,1	на 10.05	$T'_{гр}$ 15 ^ч обратным входом в МАЕ на 10.05
Δt	12°41,9'		ΔT 50 ^м 39 ^с обратным входом в ОИТ для точки Овна
			$T_{гр}$ 15 ^ч 50 ^м 39 ^с
			λ_2 9
			T_c 0 ^ч 51 ^м 11.05

Может оказаться, что и по судовому времени на эту дату кульминации не окажется, тогда берется ближайшая кульминация.

Определение времени кульминации звезд, планет, Луны и Солнца «через часовой угол» (до 1^с). Эта задача — частный случай общей задачи определения времени по часовому углу. При верхней кульминации $t_m = 0^h$ (360°), а при нижней — 180°. Переведя его в $t_{гр}$ и входя в МАЕ обратным входом, получаем $T_{гр}$ и затем T_c .

Пример 26. 10.05.85 г. в $i_c = 107^{\circ}42'$ Е определить T_c ($\lambda_2 = 9E$) верхней кульминации звезды Арктур (α Волопаса).

§ 31. ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ВИДИМОГО ВОСХОДА (ЗАХОДА) СОЛНЦА, ЛУНЫ И ВРЕМЕНИ СУМЕРЕК

При движении Солнца по суточной параллели aa_1 (рис. 53) утром его центр сначала приходит на $h = -12^{\circ}$ — этот момент называется началом навигационных сумерек (C_1), затем на $h = -6^{\circ}$ — начало гражданских сумерек (C_2), затем его край появляется на видимом горизонте (положение C_3) — это видимый восход Солнца. При $h = 0^{\circ}$ (положение C_3) имеем истинный восход Солнца.

Сумерками называется явление постепенного убывания освещенности при заходе Солнца или возрастания ее при восходе. В мореходной астрономии сумерки условно разделены на гражданские и навигационные.

Гражданскими сумерками называется промежуток времени от захода Солнца до снижения его центра на -6° (ут-

ром — наоборот), освещенность при этом падает от 700 до 1 лк; видны предметы в море и горизонт, можно читать, появляются яркие звезды (рис. 54).

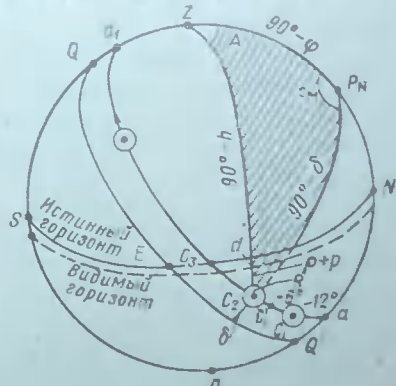


Рис. 53

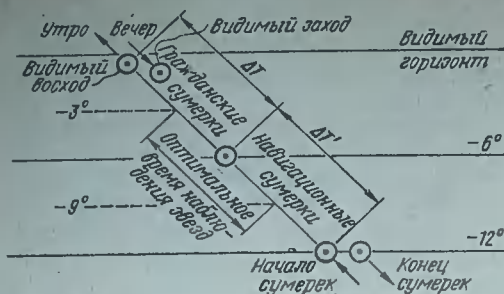


Рис. 54

Навигационными сумерками называется промежуток времени от $h_{\odot} = -6^{\circ}$ до $h_{\odot} = -12^{\circ}$. В это время предметы уже не видны, но горизонт еще виден, видны все навигационные звезды. Полная темнота наступает после конца астрономических сумерек ($h = -18^{\circ}$), но в навигации они значения не имеют.

Наилучшим временем для наблюдения звезд секстаном, как выяснилось из экспериментов, является промежуток от $h_{\odot} = -3^{\circ}$ до $h_{\odot} = -9^{\circ}$, т. е. приблизительно между средними моментами сумерек (см. рис. 54).

Основания расчета t_m и времени восхода (захода) Солнца и сумерек. В момент видимого восхода центр Солнца находится ниже истинного горизонта (C_2 на рис. 53), и его высота может быть подсчитана по формуле

$$h = -d - \rho + p - R_{\odot} \quad (104)$$

где d — наклонение видимого горизонта, зависящее от возвышения e глаза ($d = 1,76\sqrt{e_m}$);

ρ — астрономическая рефракция, поднимающая изображение Солнца;
 p — парралакс Солнца;
 $R_{\odot}$ — видимый угловой радиус Солнца.

Эти величины можно выбрать из табл. 11-а и 8 МТ—75. Принимая $e = 0$, т. е. с уровня моря, $\rho = -34,3'$; $R_{\odot} = -16,0'$ из указанных таблиц, получим $h_{\odot} = -50,3'$.

Из параллактического треугольника $zPNC_2$ (см. рис. 53) по данным φ , δ и полученной h имеем:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_m,$$

откуда

$$\cos t_m = \frac{\sin h - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \quad (105)$$

По формуле (105) последовательно, принимая $h = -50,3'$, $h = -6^{\circ}$ и $h = -12^{\circ}$, получаем часовые углы и затем по формуле (74) — T_m — время захода, конца гражданских и навигационных сумерек и аналогично — для восхода. В МАЕ это сделано для меридиана Гринвича.

Основания расчета t_m и времени восхода (захода) Луны. При подсчете высоты Луны в момент видимого восхода ее края применяется та же формула (104), но при значениях величин $\rho_L = +57'$ и $R_L = -15,5'$; $h_L = -34,3' - 15,5' + +57' = +7,2'$.

С этим значением высоты по формуле (105) рассчитаны t_m , а затем и время восхода (захода) Луны, помещенное в МАЕ.

§ 32. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВОСХОДА (ЗАХОДА) СОЛНЦА И ЛУНЫ ПО МАЕ. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ СУМЕРЕК И ВРЕМЕНИ НАЧАЛА НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД

Восход (заход) Солнца и сумерки. Из формулы (105) видно, что время восхода, захода и сумерек зависит от широты, склонения, т. е. даты, и высоты Солнца. Значение высоты для восхода (захода) принято постоянным, равным $-50,3'$, без учета возвышения глаза, т. е. с уровня моря; для сумерек приняты постоянные значения -6° и -12° . Широты принимаются через 2° (от 50 до 74°), через 5 или 10° для меньших широт, а склонения — на среднюю дату листа. С этими данными в МАЕ вычислены местные времена явления на меридиане

Гринвича и помещены на правой странице ежедневных таблиц (см. прил. 4.2). Для получения местного времени явления в заданном пункте необходимо интерполировать «табличное» время по широте и долготе пункта. Изменение времени по долготе происходит вследствие собственного движения светила и пояснялось при рассмотрении кульминации (см. § 30, рис. 52). Напомним, что для восточных долгот определяется разность с предыдущими сутками, однако в МАЕ разности времен восхода (захода) уже приведены: слева с предыдущими

сутками. справа — с последующими, т. е. для восточных и западных долгот.

Если данная дата не совпадает со средней датой листа, то предварительно получают «табличное» время данных суток, используя те же суточные изменения, приведенные слева (к предыдущим суткам) и справа.

Интерполирование по широте производится от ближайшей меньшей широты с разностью времен, определенной самим вычислителем от меньшей к большей широтам. Времена сумерек — явления менее определенного — интерполируются только по широте. Для интерполирования используют приложения 1А и 1Б МАЕ. В эти таблицы входят с разностью времен (Δ_1) по широте и $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_r$, получая поправку времени за широту ΔT_φ , и с суточной разностью Δ_2 и долготой, получая поправку времени за долготу места ΔT_λ .

Следовательно, для получения местного времени явления T_m надо в табличное время ввести две поправки:

$$T_m = T_t + \Delta T_\varphi + \Delta T_\lambda. \quad (106)$$

Затем местное время явления переводят в судовое (через Гринвич):

$$T_a = T_m \mp \lambda_W^E \pm \lambda_W^E.$$

За полярным кругом можно наблюдать незаходящее Солнце (полярный день) или невосходящее Солнце (полярную ночь). Эти явления помечены в МАЕ знаками □ и ■. В высоких широтах сумерки могут продолжаться всю ночь.

т. е. наблюдаются сумеречные ночи: они помечены в МАЕ знаком ///.

Восход (заход) Луны. В МАЕ на каждые сутки приводится местное время восхода и захода Луны на меридиане Гринвича, предвычисленное для широт через 2, 5 и 10°, склонений Луны на данные сутки и высоты +7,2' с уровня моря (см. § 31). Для Луны время явления меняется очень заметно, поэтому для перехода к местному времени в заданном пункте обязательно интерполировать по широте и долготе по формуле (106). Изменение времени с широтой определяется вычислителем — от ближайшей меньшей широты к большей, и с этой величиной Δ_1 и $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_r$ из таблицы 1А определяется поправка за широту ΔT_φ .

Поправка времени за долготу ΔT_λ определяется с суточным изменением Δ_2 , приведенным слева для λ_E и справа — для λ_W (знак Δ_2 определяется вычислителем), и долготой — из таблицы приложения 1Б.

Пример 27. 12.05.85 г. $\varphi = 57^\circ 35' N$; $\lambda = 168^\circ 15' E$ ($\lambda^E = 12E$). Определить по МАЕ T_c начала навигационных сумерек, восхода Солнца и восхода Луны.

Решение. Явления восхода (захода) Солнца и сумерек приведены на среднюю дату листа МАЕ, в данном случае на 11.05, поэтому для 12.05 надо добавить поправку, данную справа (—2м), получим для восхода Солнца $T_s = 3^h 53^m$; эту же поправку можно вводить и для времени сумерек, в данном случае $T_t = 1^h 53^m$. Для Луны время дано на каждые сутки, атаки разностей определяются на глаз, в данном случае $\Delta_1 = +10^m$; $\Delta_2 = -14^m$ (см. прил. 4,2).

		Начало навигационных сумерек	Восход Солнца	Восход Луны
12.05 $\varphi = 56^\circ N$	T_r	1 ^h 53 ^m Разность	3 ^h 53 ^m Разность	2 ^h 35 ^m Разность
По Δ_1 и $\Delta\varphi = 1^\circ 35'$	ΔT_φ	— 23 (—31)	— 8 (—11)	+ 7 (+10)
По Δ_2 и $\lambda = 170^\circ$	ΔT_λ	—	+ 1 (+2)	— 6 (—14)
Перевод в T_c «через Гринвич»	T_m	1 30	3 46	2 36 12.05
	λ	11 13	1 1 13	11 13
	$T_{гр}$	14 17 11.05	1 6 33 11.05	15 23 11.05
	λ^E	12	1 2	12
	T_c	2 ^h 17 ^m 12.05	4 ^h 33 ^m 12.05	3 ^h 23 ^m 12.05

Определение времени начала наблюдений звезд в сумерки. Лучшим временем наблюдений звезд секстаном является, как уже отмечалось (см. рис. 54), промежуток от снижения Солнца на -3° до -9° , т. е. приблизительно вечером — промежуток от середины гражданских до середины навигационных сумерек, а утром — наоборот. Для расчета времени начала наблюдений вечером надо определить время захода Солнца ($T_{гр}$) и к нему добавить половину продолжительности (ΔT) гражданских сумерек.

Величина ΔT равна разности времени гражданских сумерек и захода Солнца, данных в МАЕ в одной строке — ближайшей широты. Утром ко времени начала навигационных сумерек добавляется половина их продолжительности ($\Delta T'$). Далее по найденному $T_{гр}$ рассчитывается S_m для установки звездного глобуса и подбора звезд.

Пример 28. 10.05.85 г. в $\varphi = 57^\circ 25' S$, $\lambda = 70^\circ 15' W$ определить $T_{гр}$ и T_c ($M_s = 4W$) начала вечерних наблюдений звезд.

Решение.

Заход Солнца 10.05	T_T	16 ^h 10 ^m Разность (см. прил. 4.2)
По -9^M и $\Delta\varphi = 1^\circ 25'$	ΔT_φ	— 6 (-9^M)
По -2^M и $\lambda = 70^\circ$	ΔT_λ	0 (-2^M)
	T_M	16 04 10.05
	λ_W	4 41
Заход Солнца	$T_{гр}$	20 45 ($T_c^{zak} = 16^h 45^m$)
По $\Delta T' = 45^M$	$\frac{\Delta T}{2}$	22
Начало наблюдений	$T_{гр}$	21 ^h 07 ^m ($T_c = 17^h 07^m$)

Поправки ко времени восхода (захода) Солнца и Луны. Время восхода (захода), приведенное в МАЕ, относится к уровню моря и средним атмосферным условиям. Если возвышение глаза наблюдателя не равно 0, а температура и давление отличаются от средних, то высота Солнца и Луны, принятая в расчетах (см. § 31), изменится и изменится время восхода (захода). Поправку ко времени восхода (захода) этих светил можно получить по формуле (48) в виде

$$\Delta T^M = \frac{1}{15} \sec \varphi \operatorname{cosec} A \Delta h' = K_1 \Delta h', \quad (107)$$

где K_1 вычисляется по $\sec \varphi$ и $\operatorname{cosec} A$, выбравшим из табл. 6-а МТ-75; $\Delta h' = -d + \Delta h_t + \Delta h_B$ получают по табл. 11-а, 14-а и 6 МТ-75.

Величина K_1 умножается на $\Delta h'$, а знак ΔT^M одноименен со знаком $\Delta h'$ при восходе и разноименен при заходе.

Об использовании МАЕ предшествующих лет. Координаты Солнца и звезд могут быть получены по Ежегоднику прошлого года или одного из четырех предшествующих лет с ошибкой, не превышающей $0,4'$ (для прошлого года). В пояснении к пользованию МАЕ приведены инструкции и примеры получения координат по МАЕ предшествующего года. Более подробные пояснения и таблица поправок приведены в первом издании настоящего учебника (1968 г.). Время кульминации Солнца и его восхода, захода и сумерек с точностью до 2—3^m можно выбрать по МАЕ предшествующего года без всяких поправок.

МОРСКИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И РАБОТА С НИМИ

Глава 8. ИЗМЕРИТЕЛИ ВРЕМЕНИ. СУДОВАЯ СЛУЖБА ВРЕМЕНИ

§ 33. ХРОНОМЕТР И ДРУГИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ВРЕМЕНИ НА СУДНЕ

Для решения астрономических и навигационных задач на судне требуется иметь $T_{гр}$ с точностью до 0,5—1^с, а для целей эксплуатации требуется T_c до 1^м. Поэтому на судне должно храниться и воспроизводиться точное «эталонное» время $T_{гр}$ и приближенное поясное — судовое время. Измерителями эталонного времени и его хранителями являются механические и кварцевые хронометры; оно распространяется к местам наблюдений палубными часами и секундомерами. Судовое время воспроизводится судовыми часами — механическими или системой электрических часов, работающих от центрального датчика.

Механический морской хронометр. На рис. 55: 1 — корпус хронометра и крышка; 2 — карданов подвес; 3 — стопор подвеса; 4 — циферблат завода; 5 — заводной ключ. Хронометром называются высокоточные переносные часы с пружинным маятником, позволяющие получать достаточно точное время $T_{гр}$ в течение длительного промежутка времени.

Для обеспечения равномерности хода хронометр имеет ряд механических устройств, отличающих его от обычных часов. Другая особенность — наличие циферблата завода и удары, четко прослушиваемые каждые 0,5^с.

Хронометр состоит из следующих основных узлов: двигателя, спуска (хода), регулятора (маятника) и счетчика со стрелками. Рассмотрим особенности узлов хронометра, отличающие его от обычных часов.

Двигатель хронометра — источник энергии, приводящий в движение его части. Он представляет собой сжатую пружину, действие которой передается на систему шестерен через специальный

барабан в форме улитки (рис. 56). Улитка 3 соединена с пружиной 1 цепью Галля 2 так, что при полном заводе пружины действие ее передается цепью на малый радиус улитки, а в конце завода — на большой радиус, поэтому крутящий момент на валу зубчатого колеса 4 будет постоянным. Пружина заводится через головку 5 и цепь 2. Число часов работы пружины от полного завода показывается указателем завода на циферблате.

Хронометрический спуск (ход) предназначен для равномерного (в такт маятнику) пуска и остановки всего счетного механизма. Спуск представляет устройство, пропускающее зубец спускового колеса 6 (см. рис. 56) через 0,5^с и передающее энергию двигателя на ре-

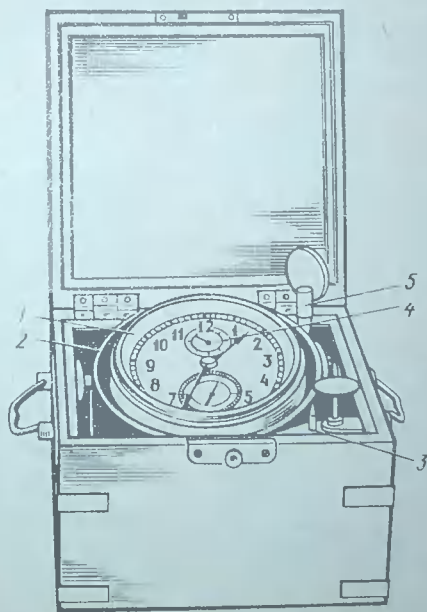


Рис. 55

регулятор (баланси́р) 12 без трения толчками-импульсами. Для этого на оси 11 балансира помещены ролики с укрепленными на них спусковым 8 и импульсным 7 камнями. Энергия от пружины передается на баланси́р через удары зубцов спускового колеса 6 об импульсный камень 7; спусковое колесо стопорится камнем 9 каждые 0,5с.

Регулятор является основным элементом, воспроизводящим колебательный процесс со строго постоянным периодом. Регулятор представляет собой пружинный маятник с температурной компенсацией. Он состоит из балансира 12, цилиндрической пружины-«волоска» 14, баррета 13 и грузиков q_1 и q_2 .

Период колебаний маятника выражается формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{K}} \quad (108)$$

где J — момент инерции балансира относительно оси вращения;

K — момент упругости волоска на 1 рад.

Момент инерции J зависит от массы балансира и грузиков и расстояния от них до оси вращения, т. е. от радиуса инерции.

Сохранение постоянства периода колебаний маятника при изменении температуры достигается изменением радиуса инерции грузиков. Для этого баланси́р 12 изготавливается из двухслойной полукруглых пластин: внутренняя — из никелевой стали, внешняя — из латуни. При повышении температуры все детали балансира расширяются. При этом внешние пластинки расширяются больше внутренних, и грузики q_1 и q_2 приближаются к центру, вследствие чего их радиус инерции уменьшается, а общий момент J остается постоянным. При понижении температуры происходит обратное явление. Для регулировки хода хронометра, если он превышает 4с в мастерских слегка отдают или зажимают дополнительные грузики — винты (q'_2) на баланси́ре.

Счетчик, или передаточный и стрелочный механизмы, состоит из системы зубчатых колес и стрелок. От часов он отличается конструкцией подшипников, комбинированных из рубина (втулка) и алмаза (опора), куда введена постоянная смазка.

Все эти устройства и высокое качество изготовления делают хронометр чрезвычайно надежным инструментом.

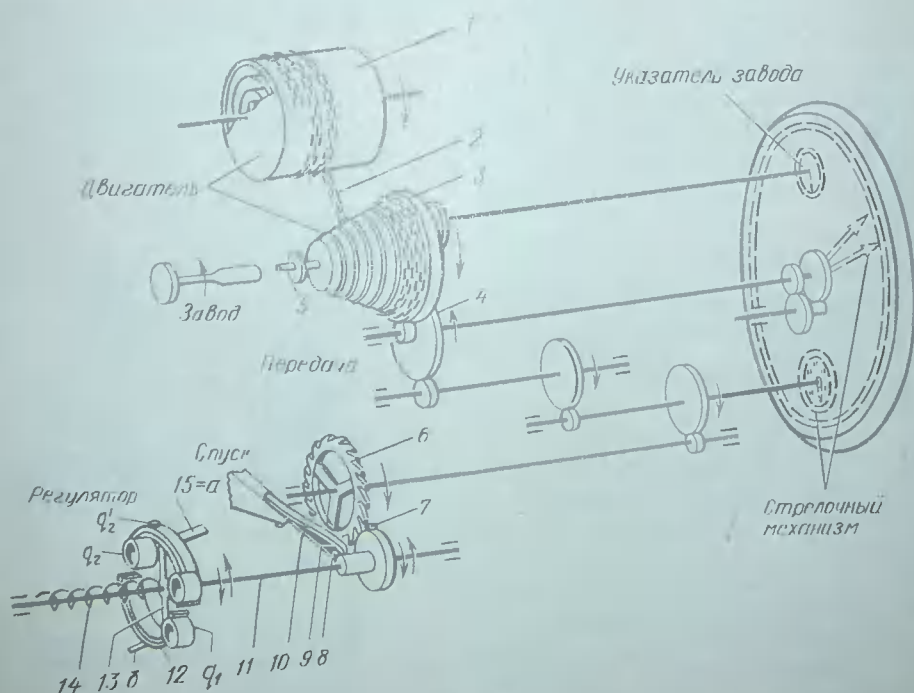


Рис. 56

который при соблюдении правил ухода может непрерывно работать 10–15 лет (при сроке службы 25 лет) и обеспечить получение на судне $T_{гр}$ с точностью до $\pm 0,5$ — 1°.

Кварцевые хронометры (часы).

Кварцевые часы представляют электронное и электромеханическое устройство, в котором регулятором равномерного хода стрелок являются периодические колебания пластинки кварца под воздействием электрического тока.

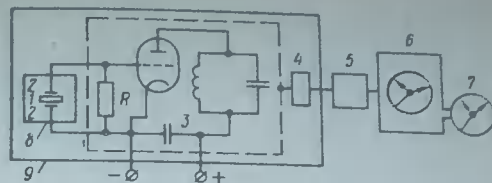


Рис 57

ная стрелка делает скачки в $0,2^\circ$ по большому светящемуся циферблату.

Секундомеры. Для измерения промежутков времени на судах применяются секундомеры. Секундомеры разделяются на три класса точности; обычно на судах встречаются секундомеры III класса (ошибка меньше $0,8^\circ$ за 15^m хода). Однако для астрономических наблюдений следует применять секундомеры I и II классов, например двухстрелочный СД спр-1 или однострелочный С-1-2А (за 30^m дают отклонение меньше 1°). Секундомер пускается по хронометру или по сигналам времени непосредственно перед наблюдениями, что позволяет точно воспроизводить $T_{гр}$.

Судовые (морские) часы. Кроме эталонного гринвичского времени, на судне широко применяется судовое T_c , по которому осуществляется плавание, организация службы, быта и отдыха команды и пассажиров. Для измерения судового времени служат судовые механические, электрические и различные бытовые часы.

Судовые часы представляют собой стальные пружинные часы с анкерным ходом в специальном корпусе с циферблатом, разделенным на 12^h (в старых — на 24^h); некоторые образцы часов, например 5-ЧМ, имеют секундную стрелку.

Судовые часы с секундной стрелкой устанавливаются в радиорубке, штурманской и рулевой рубках и в машинном отделении. В остальных помещениях и каютах можно устанавливать часы без секундных стрелок или обычные настенные часы. Судовые часы идут по T_c , кроме часов в радиорубке, установленных по московскому времени.

Наиболее современной является электронная система времени, работающая от

На блок-схеме (рис. 57) этих часов показана пластинка кварца 1, которая под воздействием тока то расширяется и замыкает электроды 2, то сжимается и с постоянной частотой $f = 1/T$. В результате этого с такой же частотой происходит колебательный процесс в электромагнитном контуре 3. Эти колебания усиливаются в усилителе 4, затем их частота уменьшается в делителе частоты 5. Полученный переменный ток вращает со строго определенной частотой асинхронный двигатель 6, который перемещает стрелки на циферблате и, кроме того, дает импульсы на репитеры — вторичные часы 7, показывающие установленное на них среднее время $T_{гр}$. Кварц заключен в термостат 8, а полупроводниковый контур и усилитель — в общий термостат 9. Питание часы получают от преобразователя или батарей.

Кварцевые хронометры выпускаются как отечественной промышленностью, так и зарубежными фирмами; точность хода их до $0,01^\circ$ в сутки. Кварцевые хронометры работают обычно на электронную систему точного времени, распространенного с помощью электрических стрелочных часов или цифровых индикаторов в основные помещения судна. Механический хронометр в таких случаях сохраняется как контрольный и запасной.

Палубные часы. Палубные часы представляют собой точные переносные часы с температурной компенсацией, воспроизводящие $T_{гр}$ и служащие для производства астрономических наблюдений, а также для замены хронометра в случае его порчи. Эти часы имеют анкерный спуск, как у обычных часов, балансир с компенсацией и регулировку хода путем изменения длины волоска; секунд-

центрального датчика. Электронные или электрические часы устанавливаются во всех помещениях и дают время с точ-

ностью до 1°. Они переводятся и согласовываются из центрального поста и не требуют завода

§ 34. ПОПРАВКА ХРОНОМЕТРА И ЧАСОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ХРОНОМЕТРА

Поправкой хронометра (u_{xp}) называется разность между гринвичским средним временем $T_{гр}$ и показанием хронометра T_{xp} в один и тот же момент, т. е.

$$u_{xp} = T_{гр} - T_{xp}. \quad (109)$$

Поправка может быть положительной (если хронометр позади) или отрицательной (если хронометр впереди $T_{гр}$), но величина ее не должна превышать $\pm 6^{\circ}$. Однако практически невыгодно иметь большую поправку. Поэтому, если поправка велика, то стрелки хронометра переводят так, чтобы u была порядка 1° и со знаком «+». Перевод стрелок выполняют с помощью ключа, надетого на головку минутной и часовой стрелок, поворотом их «по ходу» вправо до нужного отсчета; секундную стрелку трогать нельзя.

Аналогично определяется и поправка часов относительно московского или другого поясного времени, т. е.

$$u_{ч} = T_{х.м.в.} - T_{ч} \quad (110)$$

или

$$u_{ч} = T_{п} - T_{ч}. \quad (111)$$

Показания любых часов дают соответствующее время только после введения поправки, т. е.

$$T_{гр} = T_{xp} + u_{xp} \quad (112)$$

$$T_{п} = T_{ч} + u_{ч} \quad (113)$$

При расчете $T_{гр}$ предварительно надо определить гринвичскую дату и приближенное $T_{гр}$ по формуле

$$T_{гр} = T_c \pm M_{\text{в}}^E, \quad (114)$$

Этот расчет рассмотрен выше в § 26, пример 20.

Определение поправки хронометра по радиосигналам времени. Все сигналы времени в настоящее время передаются в шкале всемирного координированного времени UTC (сокращенно — координированного времени $T_{\text{вн}}$, см. § 27)

Оно отличается от $T_{гр}$ на величину поправки $\Delta T_{\text{к}}$, т. е.

$$T_{гр} = T_{\text{вн}} + \Delta T_{\text{к}}. \quad (115)$$

Величина поправки $\Delta T_{\text{к}}$ передается вместе с сигналами точного времени, как показано ниже, или выводится по предыдущей.

С учетом величины $\Delta T_{\text{к}}$ поправка хронометра, полученная по радиосигналам, определяется по формуле

$$u_{xp} = (T_{\text{вн}} - T_{xp}) - \Delta T_{\text{к}} \quad (116)$$

или

$$u_{xp} = u'_{xp} - \Delta T_{\text{к}} \quad (117)$$

Поправка u' , полученная без учета $\Delta T_{\text{к}}$, имеет точность ниже $\pm 1^{\circ}$; требуемая же точность поправки $\pm 0,5^{\circ}$.

Сигналы времени. Передача сигналов времени как у нас, так и за рубежом производится широкоэвещательными и специальными радиостанциями по двум типам программ: эвещательные сигналы (шесть точек) и эталонные сигналы точного времени (шестьдесят сигналов в минуту).

Эвещательные сигналы для проверки времени передаются всеми нашими и большинством зарубежных станций в виде «шести точек», т. е. импульсов длительностью 0,1°, через 1° в шкале UTC, т. е. в атомных секундах, начиная с 59°55' и до 0,0° следующего часа. Погрешность их подачи станциями на европейской территории СССР не превышает 0,3°, для других районов погрешность может достигать 0,5°. Однако после эвещательных сигналов не дается разность шкал $\Delta T_{\text{к}}$. Ее нужно получить по эталонным сигналам точного времени, как показано ниже, записать в журнал и вводить после приема эвещательных сигналов по формуле (116.) При этом обеспечивается точность поправки порядка $\pm 0,5^{\circ}$. Следовательно, на судне можно принимать сигналы «шесть точек», но следует учитывать поправку $\Delta T_{\text{к}}$.

Эталонные сигналы точного времени.

В настоящее время все радиосигналы точного времени подаются в шкале UTC и состоят из секундных сигналов (точек) и удлиненного сигнала (тире) на начало минуты. Такие сигналы называются «типа A_1 ». В СССР применяется несколько программ подачи эталонных радиосигналов времени.

Программы отличаются последовательностью и продолжительностью подачи сигналов A_1 и других сигналов. Все данные о программах публикуются в брошюре «Эталонные сигналы частоты и времени» (издательство «Стандарты», Москва), а также в английском пособии «The Admiralty List of Radio Signals», vol. V. На западе страны и в Атлантике хорошо слышны московские станции РБУ (66,6 кГц) и РВМ (около 5, 10 и 14 тыс. кГц), горьковская УТР 3 (25 кГц); на востоке страны - иркутские станции РТЗ (50 кГц) и РИД (около 5, 10 и 15 тыс. кГц), хабаровская УШЦ 3 (25 кГц) и сахалинская РНС-В (100 кГц).

Наиболее благоприятное поясное время приема радиосигналов от 0 до 7^ч; наименее благоприятное — от 8 до 16^ч. Для ознакомления рассмотрим две программы сигналов точного времени.

Программа радиостанций РБУ и РТЗ (передается с 01 до 24 московского времени).

Начало	Конец	Сигналы
0 ⁰⁰ 00 ^c	4 ⁵⁵ 55 ^c	Секундные сигналы A_1X длительностью по 0,1 ^c ; начала минут удлинены до 0,5 ^c и информация о ΔT_K
5 00	6 00	Позывные радиостанции
6 00	58 55	Несущие образцовые частоты (сигналы NON)
59 00	59 55	Сигналы A_1N с частотой повторения 10 Гц

Программа радиостанции РВМ (передается с 0 до 24^ч московского времени).

Начало	Конец	Сигналы
10 ⁰⁰ 00 ^c	19 ⁵⁵ 55 ^c	Секундные сигналы времени (A_1X); начала минут удлинены до 0,5 ^c ; одновременно передается информация о ΔT_K
40 00	49 55	

Окцидаль

Начало	Конец	Сигналы
20 00	29 55	Сигналы A_1N с частотой повторения 10 Гц; начало минут удлинено до 0,5 ^c
50 00	59 55	
00 00	07 55	Несущие образцовые частоты (сигналы NON)
30 00	37 55	
8 00	9 00	Передатчик выключен
9 00	10 00	Сигналы опознавания радиостанции

Получение поправки ΔT_K за разность шкал. Поправку ΔT_K на данный момент можно получить двумя способами:

по «маркированным» сигналам времени в ходе их передачи — при приеме поправки u' ;

интерполированием поправки ΔT_K принятой ранее и записанной в журнал.

Получение ΔT_K по «маркированным» сигналам. Код передачи информации о разности шкал построен следующим образом. Разность шкал представлена в виде

$$\Delta T_K = DUT_1 - dUT_1 \quad (118)$$

где DUT_1 — десятые доли секунд разности,
 dUT_1 — сотые доли разности.

После каждого минутного сигнала эти величины с их знаками передаются путем сдвоения «маркировки» секундного сигнала (двойная точка), причем знак и величина определяются номером секунды.

Положительные поправки даются путем «маркировки» следующих сигналов:
с 1 по 8^c ($+DUT_1$) каждая сдвоенная точка дает +0,1^c поправки;
с 21 по 24^c ($+dUT_1$) каждая сдвоенная точка дает +0,02^c поправки.

Отрицательные поправки даются «маркировкой» следующих сигналов:
с 9 до 16^c ($-DUT_1$) каждая сдвоенная точка дает -0,1^c;
с 31 до 34^c ($-dUT_1$) каждая сдвоенная точка дает -0,02^c.

Положительные и отрицательные сигналы могут комбинироваться.

Величина поправки ΔT_K может достигать до 0,7^c. Зарубежные радиостанции подают только десятые доли DUT_1 по этому же коду.

Пример 29. По сигналам радиостанции РВМ подсчитано, что сведены сигналы на 9, 10, 11, 12, 13^с и на 21, 22, 23^с. Определить ΔT_k .

Решение. $\Delta T_k = (-0,1^с) \cdot 5 + (+0,02^с) \cdot 3 = -0,44^с$.

Получение ΔT_k по принятой ранее. Значение ΔT_k может быть принято в начале месяца, приведено к его середине и затем применяться весь этот месяц. Если суточное изменение ΔT_k не получено, то в настоящее время его можно принимать равным $-0,003^с/сут$.

Например, на 1 марта принята $\Delta T_k = +0,56^с$; на середину месяца $\Delta T_k = +0,56^с - 0,003 \cdot 15 = +0,5^с$.

Порядок определения поправки хронометра (часов). Поправку можно получить приемом сигналов на хронометр (часы), что точнее, или на секундомер. Можно принимать как эталонные сигналы, так и вещательные (6 точек). Сигналы удобнее принимать утром, после завода хронометров, например в $T_c = 7^h40^m$ или в 8^h .

Прием сигналов на хронометр (часы). Настроив приемник и прослушав сигналы для ΔT_k , записываем 3 (5) момента $T_{вк}$, намеченные вперед по программе, один из них на 30-й секунде. В моменты подачи этих сигналов замечаем показания хронометра и, записав их под $T_{ик}$, вычисляем $u_{хр}$ и далее $u_{хр}$.

Пример 30. 7.01.85 г. около $T_c = 7^h40^m$ (МЗ - 3Е) по сигналам РВМ определили $\Delta T_k = -0,6^с$ и наметили три момента вперед. Определить $u_{хр}$.

Решение

$T_{вк}$	$4^h45^m00,0^с$	$4^h46^m30,0^с$	$4^h48^m00,0^с$
$T_{хр}$	4 45 22,5	4 46 53,0	4 48 23,0
$u'_{хр}$	$-0^m22,5^с$	$-0^m23,0^с$	$-0^m23,0^с$

$$u_{ср} = -22,8^с$$

$$u_{хр} = u'_{хр} + \Delta T_k = -0^m22,2^с$$

Примечание. При приеме сигналов непосредственно на механический хронометр возможно уточнение, рекомендуемое ППС-27, изд. 1975 г. Каждый момент $T_{хр}$ увеличивается на $0,25^с$, т. е. половину скачка стрелки. При этом в примере 30 получим $u_{хр} = -0^m22,5^с$.

Прием сигналов на секундомер. Можно принимать и эталонные и вещательные сигналы; рассмотрим последние. Прием сигналов «шесть точек» рекомендуется производить так. Взять два секундомера, чтобы принять два сигнала, первый запустить с сигналом $59^m55,0^с$, второй — $0^m0^с$. Затем записать два отсчета хронометра, намеченные на $30^с$ — 1^m вперед и в эти моменты остановить секундомеры. Добавляя ко времени $T_{вк}$ подачи сигналов показания секундомеров, получим моменты $T_{ик}$, соответствующие $T_{хр}$. Выводят две поправки, берут среднюю и к ней добавляют T_k из журнала.

Пример 31. 27.05.85 г. в $T_c = 8^h$ приняты на секундомеры сигналы $T'_{вк} = 3^h59^m55^с$ и $T''_{вк} = 4^h00^m00^с$; $\Delta T_k = +0,3^с$.

Определить $u_{хр}$.

Решение.

$T_{вк}$	$3^h59^m55,0^с$	$4^h00^m00,0^с$
$T_{скм}$	2 03,5	2 28,7
$T_{ик}$	4 01 58,5	4 2 28,7
$T_{хр}$	4 01 30	4 02 00
$u_{хр}$	$0^m28,5^с$	$0^m28^с$

$$u_{хр} = 0^m28,6^с + 0,3^с = +28,9^с \text{ или округленно } u_{хр} = 29^с$$

§ 35. ХОД ХРОНОМЕТРА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ. ЖУРНАЛ ПОПРАВОК ХРОНОМЕТРА

Механизм хронометра или часов не может работать совершенно равномерно, поэтому время $T_{хр}$ постепенно отклоняется от гринвичского, т. е. хроно-

метр спешит или отстает. При этом его поправка непременно изменяется.

Величина изменения поправки хронометра (или часов) за некоторый про-

межуток времени называется ходом его за этот промежуток. Ход хронометра считается положительным, если хронометр отстаёт, и отрицательным, если хронометр спешит относительно гринвичского времени.

Суточным ходом ω хронометра называется изменение поправки хронометра за одни сутки. Суточный ход хронометра ω с его знаком получается, если из последующей поправки хронометра u_2 вычесть предыдущую u_1 и эту разность разделить на интервал ΔT^d между определениями, выраженный в сутках и их долях с точностью до 0,01^d (перевод осуществляется по табл. 43-а МТ — 75), т. е.

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{\Delta T^d} \quad (119)$$

Если положительная поправка уменьшается (отрицательная растёт), то ω отрицательна — хронометр спешит. Если положительная поправка увеличивается (отрицательная убывает), то ω положителен — хронометр отстаёт.

Суточный ход ω вычисляется ежедневно при получении поправки. Вычисления производят до 0,01^c, а результат округляют до 0,1^c. Если требуется более точный суточный ход, как, например, при расчёте поправки вперёд на интервал более суток, то рекомендуется брать поправку u за 5 суток назад. Рассчитанный по формуле (119) суточный ход будет иметь меньше ошибки вывода и относиться к средним условиям за интервал ΔT^d .

Пример 32. 11.00 в $T_{гр} = 144$ имела $u_1 = -8^m 34,5^s$; 16.07 в $T_{гр} = 19^h$ определена $u_2 = -8^m 45,0^s$. Найти суточный ход хронометра.

Решение.

$$1. T_{гр2} - T_{гр1} = 5^d 21^h \text{ (табл. 43-а МТ — 75)}$$

$$2. \omega = \frac{-8^m 45,0^s - (-8^m 34,5^s)}{5,21^d} =$$

$$-2,02^c \approx -2,0^c.$$

Для определения суточного хода палубных или других точных часов служит также формула (119).

Суточный ход применяется для расчёта поправки в момент наблюдений [см. формулу (122)] и для контроля за работой хронометра (часов).

Так как ω рассчитывается вперёд, то ω должен быть постоянным. Кроме того, величина и постоянство хода характеризуют качество хронометра. Практически ход хронометра не совсем постоянен, и чтобы работа хронометра считалась нормальной, колебания его хода, или вариации, должны заключаться в пределах некоторого допуска.

Вариацией хода $\Delta\omega$ называется разность двух смежных суточных ходов, т. е.

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \quad (120)$$

Обычно вариация имеет разные знаки и представляет случайные колебания хода на величину $\pm 0,5^c$; максимальная вариация не должна превышать $2,3^c$.

Качество работы хронометра оценивается двумя показателями: величиной хода ($\omega_{\max}$) и средней вариацией. У хронометра первого класса ход не должен превышать $\pm 2^c$, а средняя вариация $\pm 0,2^c$. У хронометров второго класса, используемых на морском флоте, ход не должен превышать $\pm 4^c$, а средняя вариация $\pm 0,5^c$. Для палубных часов соответственно $\pm 9,0^c$ и $\pm 1,3^c$.

Так как точность хранения времени на судне и получения $T_{гр}$ на момент наблюдений зависят от устойчивости хода хронометра, то были выявлены факторы, влияющие на его ход. Наибольшее влияние на ω оказывает изменение температуры, несмотря на специальное устройство маятника. Влияют также магнитные поля, влажность, изменение давления и внутренние причины (окисление, износ, смазка и другие, зависящие от продолжительности эксплуатации и качества хронометра).

Изменение ω от температуры выражается температурной формулой хода:

$$\omega_t = \omega_0 + C(t - t_0) + \frac{S}{200}(t - t_0)^2 = \omega_0 + \Delta\omega_t \quad (121)$$

где ω_0 — суточный ход при нормальной температуре ($t_0 = +20^c$);

t — данная температура и ход ω_t при ней;

$\Delta\omega_t$ — изменение хода при данной температуре;

C и S — температурные коэффициенты, приводимые в аттестате.

В аттестатах отечественных хронометров приводятся суточные ходы при разнoй температуре и иногда таблица поправок суточных ходов $\Delta\omega_r$. Применять эту формулу рекомендуется при отклонении температуры более 4°.

В настоящее время формулой (121) и расчетом хода на данную температуру приходится пользоваться крайне редко, так как суточный ход определяется каждые сутки, а температура в рубке практически мало меняется. Кроме того, при переменном ходе или температуре поправку лучше получать около времени наблюдений, а не рассчитывать по формуле (121).

Внутренние причины колебаний хода в основном зависят от качества изготовления хронометра и его наладки.

Дата	Радиостанция и вид сигнала	T_{BK}	$T_{ХР}$	n'	ΔT_K	$n_{ХР}$	ω	$\Delta\omega$	Подпись
17.06.1985	РВМ 6 точек	4°00'00"	3°59'21,5"	+38,5"	0,3°	0°38,8"	-3,3"	0,5"	Иванов

Для второго хронометра надо иметь второй журнал.

Мы рассмотрели поправку и ход механического хронометра. У кварцевого хронометра поправка определяется также по радиосигналам времени автоматически или как у обычного хронометра.

После записи поправки в журнал она выводится до нуля, а эта операция проверяется приемом поправки снова при первой возможности. По записям в журнале проверяют суточный ход кварцевого хронометра за интервалы по 10 дней и за 30 дней.

Нередко, особенно у хронометров МХ второго класса, они проявляются после длительной качки и резкой смены условий, в результате чего суточный ход резко меняется, вариация возрастает и хронометр оказывается непригодным для наблюдений. Поэтому штурману следует определять поправку, ход и вариацию каждый день и следить за их изменением.

Журнал поправок хронометра. Поправка, величина ΔT_K , суточный ход, вариация записываются в хронометрический журнал, форма которого, принятая на морском флоте (Э-6а), в настоящее время пересматривается. Можно в качестве временной предложить следующую форму, которую можно вычертить в тетради от руки:

Надо отметить, что в настоящее время производится непрерывная подача сигналов точного времени, что дает возможность не предъявлять слишком высоких требований к хранителям времени на судне. При наличии приемника поправку теоретически можно принимать в любой час суток, однако практически это часто не удается, поэтому и сохранены точные хранители времени. Если в момент подачи сигнала пустить выверенный секундомер, то в интервале 10—15" можно получить точное $T_{гр}$ по секундомеру, минуя хронометр (добавив к моментам ΔT_K).

§ 36. РАБОТА С ХРОНОМЕТРОМ И ЧАСАМИ ОБРАЩЕНИЕ С НИМИ

Расчет поправки хронометра (часов) на момент наблюдений. Поправка хронометра обычно определяется один раз в сутки, наблюдения же могут производиться несколько раз и не во время приема поправки, поэтому поправка должна быть приведена к моменту наблюдений, для чего последняя принятая поправка с помощью ω экстраполирует-

ся на момент наблюдений, при этом предполагается, что вариация равна 0.

Расчет поправки n на данный момент производят по формуле (119) в виде

$$n = n_{ж} + \omega \Delta T^A, \quad (122)$$

где $n_{ж}$ — последняя поправка хронометра (из журнала);

ω — последний суточный ход (из журнала);

ΔT^A — промежуток времени в сутках (до 0,01д) от момента получения поправки $u_{ж}$ до данного момента; переводится в доли суток по таблице 43-а МТ—75. Промежуток ΔT^A определяется по гринвичско-му времени.

Пример 33. 13.09 в $T_{гр} = 14^ч$ определена $u_{ж} = -0^м57,5^с$; $\omega = -2,4^с$ (из журнала). Определить u в $T_{гр} = 6^ч 14.09$.

Решение.

$$1. \Delta T^A = 6^ч + 24^ч - 14^ч = 16^ч = 0,67^д.$$

$$2. \omega \Delta T^A = -1,6^с.$$

$$3. u = -0^м57,5^с + (-1,6^с) = -0^м59,1^с \approx -0^м59^с.$$

Расчет поправки на данное время производят перед всеми наблюдениями. При расчете времени пуска секундомера по хронометру полученную поправку u вводят в намеченное $T_{гр}^n$, т. е. $T_{гр}^n - u_{хр} = T_{хр}^n$.

Сличение. Ввиду того что хронометр на судне из своего ящика никогда не вынимают и наблюдения обычно производят с часами или секундомерами, то необходимо уметь сличать идущие часы или секундомер с хронометром.

Сличением (сл) называется разность одновременных показаний хронометра ($T_{хр}$) и часов ($T_{ч}$), т. е.

$$сл = T_{хр} - T_{ч}. \quad (123)$$

Сличение имеет знак «+», если часы позади хронометра, и «-», если впереди.

Получив сл, можно по моментам часов, замеченным при наблюдениях, рассчитать соответствующие моменты хронометра:

$$T_{хр} = T_{ч} + сл. \quad (124)$$

Кроме того, при известном сл можно по известной поправке хронометра $u_{хр}$ рассчитать $u_{ч}$, и наоборот. Для одного и того же момента имеем

$$T_{гр} - T_{хр} = u_{хр}; \quad T_{хр} - T_{ч} = сл.$$

Складывая, получим

$$T_{гр} - T_{ч} = u_{хр} + сл = u_{ч},$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} u_{ч} &= u_{хр} + сл; \\ u_{хр} &= u_{ч} - сл. \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

Пример 34. В момент $T_{хр} = 10^ч55^м20^с$ получим $T_{ч} = 8^ч14^м45^с$. Поправка $u_{хр} = +3^м45^с$. Определить $u_{ч}$.

Решение.

$T_{хр}$	$10^ч55^м20^с$	$u_{хр}$	$+0^ч13^м45^с$
$T_{ч}$	$8 \ 14 \ 45$	$+сл$	$+2 \ 40 \ 35$
$сл$	$+2^ч40^м35^с$	$u_{ч}$	$+2^ч44^м20^с$

Сличение часов с хронометром выполняется проще всего следующим путем. Наблюдатель намечает по хронометру момент $T_{хр}$ вперед на 30—40^с, кратный 5 или 10-й секунде, и записывает его. За 15^с до намеченного момента наблюдатель прислушивается к ударам хронометра, отсчитывая секунды, «и раз», «и раз», ..., причем счет «и» падает на полсекунды, а «раз» — на целые. За 10^с до намеченного момента начинают счет секунд по циферблату хронометра: «и раз», «и два», «и три»,.... а при счете «пять» глаза переводят на циферблат часов и продолжают счет на слух. При счете «десять» замечают и записывают момент часов, сначала показания секундной (до 0,5^с), затем минутной и часовой стрелок. Это показание часов $T_{ч}$ и будет одновременным с записанным $T_{хр}$.

Сличить часы с хронометром также можно с помощью секундомера, пустив его в намеченный и записанный момент хронометра и остановив в намеченный момент по часам. Тогда, вычитя из момента по часам показания секундомера, получим одновременные показания $T_{ч}$ и $T_{хр}$.

Работа с часами или секундомером и хронометром при наблюдениях. При измерении высот светил наблюдатель должен одновременно с высотой заметить и записать момент хронометра или часов.

В море измеряют не одну, а три—пять высот каждого светила, так что при наблюдении, например, четырех звезд нужно заметить до 12 моментов.

Если наблюдения производят два наблюдателя, то момент замечают либо непосредственно по хронометру (один из наблюдателей находится в рубке), либо по секундомеру или часам — на месте наблюдений. Момент замечают по команде «товсь — ноль», причем исполнительная команда «ноль» подается наблюдателем в момент касания светил

горизонта, а «товсь» — за несколько секунд до этого.

Одному наблюдателю лучше фиксировать моменты по идущему секундомеру (пущенному в $T_{\text{кр}}^{\text{п}}$). При двухстрелочном секундомере это просто: стопорится вторая стрелка и записывается $T_{\text{снм}}$ до $0,5^{\circ}$; при однострелочном — надо научиться считать секунды вслух: «и раз», «и два» ... от момента касания до намеченного момента на секундомере. Вычитая из него сосчитанные секунды, получим нужный момент. Так же выполняется отсчет и по палубным часам.

Обращение с хронометром. *Хранение хронометра.* Хронометр в футляре должен храниться плотно расклиненным, в специальном ящике штурманского стола. Из ящика его не вынимают, за исключением особых случаев: размагничивание судна, отстой и т. п. Стопор карданова подвеса корпуса хронометра освобождают. Следует проследить, чтобы около места хранения хронометра не было паропроводов, водяных магистралей, сильных магнитных или электромагнитных полей и вибрирующих деталей. В месте хранения следует поддерживать постоянную температуру порядка $+20^{\circ}$.

При работе с хронометром открывают только верхнюю деревянную крышку футляра и наблюдения ведут через внутреннюю стеклянную.

Завод хронометра. Хронометр заводят ежедневно до определения поправки, обычно между 7 и 8 ч утра, третий помощник капитана. Для завода корпус хронометра левой рукой осторожно поворачивают в кардане циферблатом вниз или наклоняют влево, отодвигают заслонку и ключ, надетый на ось, медленно поворачивают против часовой стрелки на $7,5$ полуоборота, так как каждый полуоборот дает завод на 3° . Желательно заводить хронометр не до упора, а до отметки 8° , тогда нет опасности сорвать цепь с барабана. Завод производят всегда до одних и тех же отметок так, чтобы хронометр работал в течение суток всегда при одном и том же натяжении пружины.

Транспортировку хронометра на небольшие расстояния осуществляют

на руках, закрепляя стопор карданова подвеса. При перевозке или пересылке хронометра специально закрепляют балансир во избежание возможных его поломок. Для этого корпус хронометра вынимают из ящика, свинчивают крышку и, удерживая механизм за края циферблата, переворачивают корпус и снимают его с механизма. После этого устанавливают механизм на корпус циферблатом вниз и с помощью пинцета осторожно подсовывают под балансир с двух концов баррета два клина (см. рис. 56; 15-а, б), заранее вырезанные из чистой сухой пробки длиной $9-10$ мм, шириной 4 мм, толщиной $1,2$ мм. После окончания транспортировки клинья вынимают. Эту операцию в обратном порядке проделывают при пуске нового хронометра и хронометра, присланного из ремонта. При разборке и сборке хронометра ни в коем случае нельзя касаться пальцами деталей механизма.

Пуск хронометра. Для пуска хронометра, остановившегося вследствие окончания завода, его следует завести, поставить на стопор и повернуть весь ящик не очень быстро примерно на $1/4$ оборота по азимуту. Пуск лучше выполнить, подождя, когда показания хронометра сравняются с $T_{\text{кр}}$, которое рассчитывается по другим часам или по сигналам времени.

Перед тем как завести и пустить новый хронометр или хронометр после ремонта, предварительно удаляют стопорные клинья.

Неисправности хронометра. Если хронометр получил механические повреждения, прослушивается нечеткая работа механизма хода, или изменения суточного хода велики, его следует сдать в навигационную камеру для проверки и ремонта. Ни в коем случае не следует пытаться исправить его самому.

Если неисправности у хронометра обнаружены в рейсе, то его следует остановить и пользоваться вторым или заменить его палубными часами, однако в этом случае поправку часов нужно определять несколько раз в сутки, по возможности — около времени наблюдений. Официальный срок перепрестации хронометра — через три года, но если он работает хорошо, то лучше

его не трогать и сдавать только при постановке судна в ремонт.

Точность получения $T_{гр}$ при судовых наблюдениях определяется в основ-

ном ходом хронометра, его вариации и точностью фиксации момента. При расчете $T_{гр}$ в пределах суток от приема и с учетом ΔT_k точность его около $\pm 0,5^c$.

§ 37. ОРГАНИЗАЦИЯ СЛУЖБЫ ВРЕМЕНИ НА СУДНЕ

Судовая служба времени должна обеспечить выполнение следующих задач: хранение точного времени на судне; распространение его по объектам; получение точного времени на любой момент (что требуется для навигационных и астрономических наблюдений, связи с берегом, для судовой службы и нужд экипажа и пассажиров); выполнение различных расчетов, связанных со временем, например перестановка часов, освещенность, эксплуатационные расчеты времени и т. п.

Для выполнения этих задач на судне имеются измерители времени, радиоаппаратура для приема сигналов времени, а также осуществляются организационные мероприятия — служба времени. Судовая служба времени находится в ведении третьего помощника и контролируется старшим помощником и капитаном. Рассмотрим порядок выполнения основных задач службы времени.

Наблюдение за хранением точного гринвичского времени $T_{гр}$. Хранение точного времени обеспечивается хронометрами: механическим или кварцевым, а в некоторых случаях и палубными часами. На судах дальнего плавания должны быть два хронометра, на судах малого плавания — один. Желательно иметь также одни палубные часы. Хронометры должны быть поставлены по $T_{гр}$ идти непрерывно и при соблюдении рекомендаций обеспечивать расчет $T_{гр}$ до $\pm 0,5^c$. Хронометры нельзя вынимать из штурманского стола, следует следить, чтобы не нарушались условия хранения (температура $+ 20^\circ$, отсутствие сильных магнитных полей, вибраций, ударов). При сильном повышении влажности следует накрыть ящик дополнительным шерстяным чехлом. Все наблюдения по хронометру осуществляются через верхнюю стеклянную крышку. Работа хронометра проверяется ежесуточно по его ходу — он не

должен превышать 4^c и по изменению хода — вариации, которая должна быть порядка $\pm 0,5^c$ и не более $2,3^c$. При нарушении этих условий или при порче хронометра его останавливают и сдают на ремонт в навигационную камеру. Ремонт хронометра или его регулировка на судне запрещается.

П р и м е ч а н и е. При длительной стоянке или отстое судна хронометр можно остановить, но за 3 сут до выхода в рейс его следует пустить и проверить работу.

Прием радиосигналов времени, ведение хронометрического журнала. При приеме сигналов времени отметку момента лучше производить непосредственно по хронометру, а не по секундомеру, для чего сигналы должны транслироваться к месту хранения хронометров.

Поправку хронометра принимают ежедневно, как показано в § 34, и вносят в журнал. В журнал также заносят вычисленные суточный ход, вариацию и ΔT_n .

Хранение хронометра, его завод, переноску, а также работу с ним производят, как показано в § 36.

Наблюдение за хранением судового времени (T_c). Судовые часы, установленные в штурманской рубке и машинном отделении, должны показывать T_c с точностью до $0,5^m$ без введения поправки и не рассогласовываться больше, чем на эту величину. Часы в других помещениях должны показывать T_c до 1^m . Часы в радиорубке идут по московскому времени с точностью до 6^c . Проверку показаний судовых часов производит третий помощник.

Проверка показаний и согласование судовых часов. Проверку часов производят с помощью «контрольных часов» — хороших часов с центральной секундной стрелкой, выверенных по хронометру до 5^c . Судовые часы должен проверять ежедневно третий помощник. Результаты проверки и регулировки записывают

в «журнал (блокнот) часов», где указывают поправку, ход и смещение регулятора: в сторону П — прибавить ход или У — убавить ход. Завод часов производят раз в неделю. За показаниями часов в штурманской рубке должны следить все вахтенные помощники. Согласование показаний часов в штурманской рубке и машинном отделении производят (кроме общей проверки) перед отходом и приходом, перед проходом узкостей, выполнением маневров и входом в туман.

Перевод стрелок судовых часов при пересечении границ пояса. Стрелки всех судовых часов (кроме хронометров и часов в радиорубке) переставляют при переходе границ пояса на 1 ч вперед при следовании к Е и назад — при следовании к И. Переставляют часы по указанию капитана в зависимости от обстоятельств плавания. Перестановку выполняют с помощью контрольных часов и сразу на 1°. Переставляют часы удобнее вечером или ночью (см. § 26).

Перестановку часов на стандартное время порта производят при подходе к нему по указанию капитана. О перестановке часов производится запись в судовом журнале.

Смена даты при пересечении линии смены дат. При пересечении линии смены дат (см. рис. 50) судно продолжает следовать до полуночи, не меняя ее. Для астрономических наблюдений в это время долгого считают сверх 180° в прежнем направлении. В полночь, следующую за переходом, при следовании Е курсами дату повторяют, при следовании W курсами дату увеличивают сразу на два дня.

Проверка секундомеров. Проверку производят пуском секундомера по хронометру на 0° любой минуты и остановкой через 15^м, также на 0°. Для секундомеров, применяемых в астрономических наблюдениях, расхождения не должны превышать 0,6°.

Отметка времени на лентах самописцев. При выходе в рейс третий штурман делает отметку даты и времени на ленте курсографа (до 1^м), согласует ленту барографа с днями недели и помечает на ней дату и время. Отметки на лентах делаются в конце каждой вахты, а на курсографе также при проходе через

узкости и перед входом в туман. Все изменения в счете времени также отмечаются на лентах самописцев.

Ежесуточный «штурманский бюллетень». На некоторых бассейнах и судах (по хорошей традиции) принято вывешивать во время рейса в штурманской рубке ежесуточный бюллетень, составляемый третьим помощником. В бюллетене обычно указываются: дата, номер пояса, время начала утренних навигационных сумерек, время восхода Солнца, время кульминации его, захода и конца навигационных сумерек, φ и λ на полдень, высота глаза наблюдателя, последняя поправка хронометра и суточный ход. При необходимости дают и другие сведения.

Выполнение эксплуатационных расчетов времени. Расчеты времени, связанные с переходом, например поясное время прибытия или отхода судна, входят также в задачи службы времени. Если пункты отшествия и пришествия лежат в разных часовых поясах, и особенно если при этом пересекается линия смены дат, то при расчете времени прибытия удобнее все расчеты вести в гринвичском времени, а затем перейти на поясное.

Пример 35. Предстоит переход Рига — Монреаль, средняя скорость 14 уз, время выхода 7^ч = 10^ч 25.10. Определить время прибытия по поясному времени Монреаля.

Решение 1. Из таблиц расстояний: Рига—Монреаль — 4246 миль. С карты часовых поясов имеем: для Риги пояс ЛБ = -3^ч, для Монреаля ЛБ = +5^ч. По метеорологических условиям на маршруте и из предшествующего опыта принимаем потерю времени на переходе +8^ч.

$$2. \text{Время перехода в среднем } \frac{4246}{14} = 303,3^{\text{ч}} \approx 303^{\text{ч}} = 12^{\text{д}} 15^{\text{ч}}.$$

$$\text{Время перехода с учетом задержек } \Delta T = 12^{\text{д}} 23^{\text{ч}}.$$

3.	T_{-3}	10 ^ч	25.10 — время выхода
	ЛБ	3	
	$T_{\text{гр}}$	7	25.10
	+		
	ΔT	12 ^д 23 ^ч	Дата: 25 ^д + 13 ^д - 31 ^д = 7.11
	$T_{\text{гр}}$	6	7.11
	—		
	ЛБ	5	
	T_{+6}	1 ^ч	7.11 — время прибытия

§ 38. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЕЗД, СОЗВЕЗДИЯ
ОПЗНАВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ СОЗВЕЗДИЙ И ЗВЕЗД

Классификация звезд по их блеску и расположению. Видимая звездная величина m . Блеск звезды определяется освещенностью E зрачка глаза, создающей субъективное ощущение яркости звезды, которую принято характеризовать видимой звездной величиной m . Оценка блеска по звездной величине введена в древности Гиппархом. Наиболее яркие звезды (их около 20) были отнесены им к первой величине, в 2,5 раза более слабые — ко второй и т. д. В дальнейшем установлено, что в основе такого разделения лежит психофизический закон Вебера — Фехнера: «... когда раздражение возрастает в геометрической прогрессии, ощущение возрастает в арифметической прогрессии», или в применении к звездным величинам

$$m_1 - m_2 = C \lg \frac{E_1}{E_2}.$$

При коэффициенте $C = -2,500$ имеем:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg \frac{E_1}{E_2}$$

или

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{-(m_1 - m_2)}. \quad (125)$$

Следовательно, при уменьшении звездной величины на 1^м освещенность E , создаваемая звездой в глазе наблюдателя, возрастает в 2,512 раза, так как $\lg 2,512 = \frac{1}{2,500}$.

Таким путем получается логарифмическая шкала звездных величин, в которой чем слабее светит звезда, тем больше ее величина m . Яркие звезды и другие светила могут иметь и отрицательную величину $-n$. Получается ряд видимых звездных величин (в порядке убывания яркости): $-n^m$; $\dots - 2^m$; $- 1^m$; 0^m ; $+ 1^m$; $+ 2^m$; $\dots + n^m$. Обычно величины звезд и других объектов в этой шкале оказываются дробными. Например, близкая к нулю величина звезды Вега $+0,1^m$; β М. Пса $+3,1^m$; Сириуса $-1,6^m$; Венеры

(в среднем) $-3,8^m$. Солнца — $26,8^m$ и т. д. Наиболее слабые звезды, видимые простым глазом, имеют величину около $+5^m$, а через телескопы — до $+23^m$. Для установления «нуль пункта» шкалы звездных величин какой-либо звезде или группе звезд приписывают определенное m , например звезде α Тельца приписывается $+1,0^m$ или Полярной $+2,15^m$ и т. п. Звездные величины получаются измерением блеска звезд путем сравнения с такими звездами-эталоном или с искусственными источниками и указываются в таблице «Звезды» МАЕ. Отметим, что эти величины не учитывают поглощение света атмосферой, зависящее от высоты светила (звезды на малых высотах видны хуже). В действительности звездные величины надо увеличить для $h = 10^\circ$ на $+1,2^m$; для 20° — на $+0,5^m$; для 30° — на $+0,2^m$, и только после 40° звездные величины практически совпадают с МАЕ.

Примечание. Звездные величины связаны с физическими единицами. 1 люкс (лк) на уровне моря имеет $-14,1^m$. Одна международная свеча с расстояния 1 км имеет величину $+0,8^m$.

Солнце создает освещенность около 100 000 лк, полная Луна — около 0,25 лк, а все ночное небо — 0,0003 лк.

Классификация звезд по их расположению (по созвездиям). Созвездиями называются точно ограниченные участки небесного свода (небесной сферы), охватывающие характерно расположенные звезды, включая и невидимые простым глазом. Созвездия облегчают ориентировку на звездном небе. Границы созвездий в настоящее время расположены вдоль меридианов и параллелей сферы с учетом границ, установленных в древние времена (см. рис. 59).

Большинство названий созвездий древние и связаны с различными легендами и мифами. Например, Цефей, Кассиопея, Андромеда и Персей — имена персонажей одной из легенд. В южной части неба встречаются названия созвездий, данные в XIX в., например

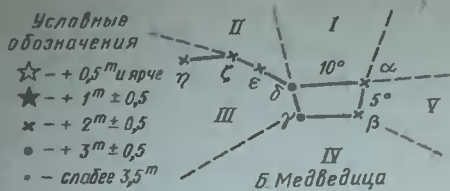


Рис. 58

Корма, Телескоп и т. п. Обычно применяются международные (латинские) названия созвездий, например Taurus — Телец и т. п. Всего созвездий 88, из них в мореходной астрономии применяют около 50. Звезды по их месту в созвездии обозначаются буквами греческого алфавита, как правило, в порядке их яркости: α Возничего (α Auriga), β Возничего и т. д. Если букв не хватает, а многие созвездия содержат более сотни видимых простым глазом звезд, то вводится порядковый номер звезды в созвездии. Почти все наиболее яркие звезды неба имеют и собственные имена, большинство которых дано древними греками, римлянами и арабами, например, собственное имя звезды α Возничего — Капелла. α Овна — Хамаль и т. п.

Звезды различаются также по цвету. Есть белые, желтые, оранжевые, красноватые, голубоватые; например Арктур — оранжевый, Спика — голубоватая и т. д.

Навигационные звезды. В мореходной астрономии применяются звезды с наибольшим блеском, примерно до величины $+3,5^m$ (кратко — яркие звезды). Всего их по списку в МАЕ 160, из них 119 имеют собственное имя. Наиболее яркие звезды, применяемые обычно в морских наблюдениях, называются «навигационными звездами». Этих звезд немного — порядка 60, и полезно уметь опознавать их на небе и знать названия.

Звездные карты. Для изучения звездного неба и для справок к МАЕ и табл. ВАС—58 прилагаются «Карты звездного неба», составленные в равнопромежуточной проекции полярных районов и экваториального пояса. На них нанесены наиболее яркие звезды, приведенные в МАЕ, но в некоторых случаях и более слабые—

до $+4^m$; схематически помечены также основные созвездия.

Опознавание навигационных созвездий и звезд. Для распознавания звезд можно использовать следующие признаки: принадлежность звезды к определенному легко опознаваемому созвездию; взаимное расположение звезд; яркость и цвет звезд.

Ориентировку на звездном небе удобно производить относительно отчетливо обрисованных, хорошо заметных на небе созвездий, которые следует знать на память и быстро находить в любое время ночи. Выберем для этой цели созвездия Большой Медведицы и Ориона.

Основным для ориентировки среди созвездий северного неба является созвездие Большой Медведицы (Ursa Major, сокращенно *U. Ma*), имеющее вид ковши с длинной, несколько изогнутой рукояткой (рис. 58, 59). Звезда α *U. Ma* называется Дубхе, она желтого цвета, последняя в «рукоятке» η *U. Ma* — Бенетнаш — голубоватого. Все семь основных звезд созвездия Б. Медведицы (всего в созвездии 125 звезд ярче $+6^m$) имеют приблизительно одинаковую величину около 2^m и пригодны для морских наблюдений.

Основные созвездия северного неба можно отыскать по их положению относительно Б. Медведицы, разбивая мысленно небосвод как бы на секторы: I — вверх от «ковша»; II — над «рукояткой»; III — в сторону «рукоятки»; IV — под дном «ковша» и V — в сторону края (обратную «рукоятке»). Для отыскания отдельных звезд, расположенных в этих секторах, следует соединить отдельные звезды Б. Медведицы прямыми (дугами больших кругов на сфере) и продолжить их на указанные расстояния. Для этого следует хорошо запомнить все звезды созвездия Б. Медведицы.

1. Созвездия и звезды вверх от «ковша» Б. Медведицы (рис. 59). Здесь расположены созвездия М. Медведицы с Полярной звездой (α М. Медведицы) — в 5 расстояниях α — β *U. Ma*, Кассиопея — в виде буквы W (в таком же расстоянии за Полярную) и менее яркие Дракон и Цефей. Эти созвездия называются околополярными и для широт СССР явля-

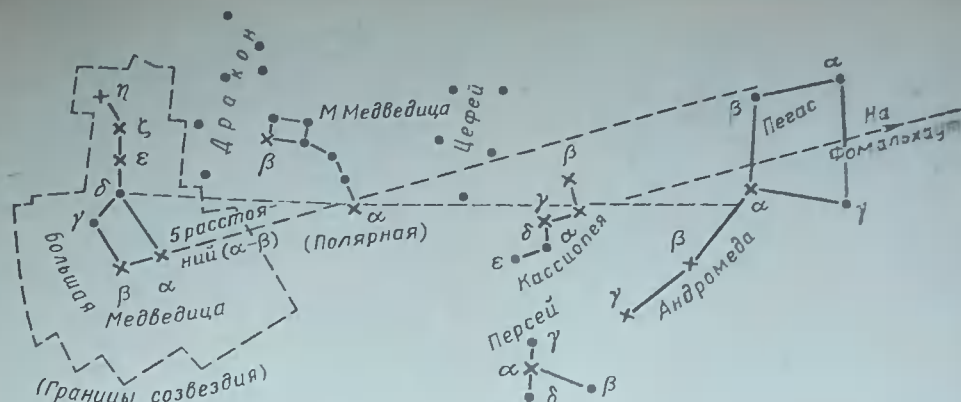


Рис. 59

ются незаходящими. Дальше за Кассиопеей, охватывая ее, находятся созвездия Андромеды, Пегаса (имеющее форму квадрата с α Андромеды в одной вершине) и Персея в другом конце Андромеды. Далеко в направлении Кассиопея — Пегас (в двух расстояниях между ними) расположена яркая белая звезда Фомальхаут (α Ю. Рыбы).

II. Созвездия и звезды над рукояткой «ковша» Б. Медведицы (рис. 60). Вдалеке от $U. Ma$ расположены навигационные созвездия Лебеда, Лиры и Орла с яркими звездами α , расположенными как бы в вершинах треугольника, называемого по его видимости «летним». В 6—7 расстояниях γ — δ $U. Ma$ на Млечном Пути находится созвездие Лебеда в виде лебеда или креста (с яркой белой звездой α — Денеб) сзади. В 5 расстояниях α — δ $U. Ma$ находится яркая белая звезда Вега (α Лиры) — самая яркая звезда (0,1^m) северного неба. Дальше — в 9 расстояниях α — δ

$U. Ma$ находится созвездие Орла, напоминающее реактивный самолет, летящий навстречу Лебедю, с яркой белой звездой α — Альтаир, расположенной «впереди».

III. Созвездия и звезды в сторону «рукоятки ковши» и ниже (рис. 61). Здесь расположены Северная Корона, Волопас, Дева и далеко южнее — Скорпион. В трех расстояниях α — δ $U. Ma$ находится созвездие Северной Короны с заметной звездой α — Альфакка (или Гемма — «жемчужина»). Продолжив дугу, которую образуют звезды ϵ — ζ — η «рукоятки» на 3 расстояния α — δ $U. Ma$, увидим яркую (0,2^m), светло-оранжевую звезду Арктур (α Волопаса), постоянно применяемую в наблюдениях. Продолжив эту дугу дальше за Арктур на такое же расстояние, находим созвездие Девы с яркой звездой α — Спикой. На прямой, проходящей между Северной Коронай и Волопасом, — дальше в 9 расстояниях α — $U. Ma$

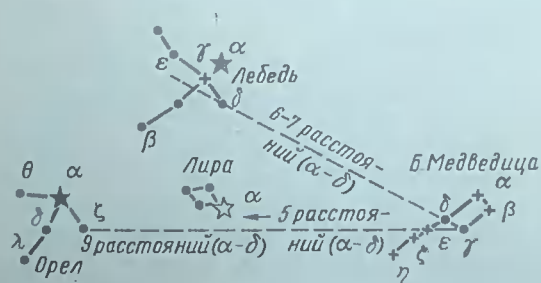


Рис. 60

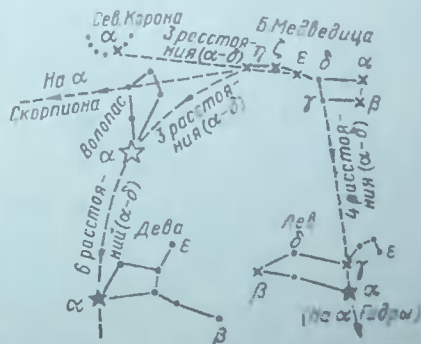


Рис. 61



Рис. 62

находится скопление ярких звезд — созвездие Скорпиона с яркой красной звездой α — Антарес.

IV. Созвездия под «дном ковши» (см. рис. 61). В этом секторе расположены созвездия Льва и Гидры. В 4 расстояниях $\alpha - \delta$ U. Ma находится созвездие Льва, имеющее вид лежащего льва, с расположенной на «передней лапе» яркой желтоватой звездой α — Регул и звездой β — Денеболя в другом конце. Продолжая эту линию дальше на два расстояния $\alpha - \delta$, увидим неяркую звезду α Гидры — Альфард.

V. Созвездия в сторону «края» и нижнего угла «ковша» (рис. 62). В этом секторе в 5–7 расстояниях $\alpha - \delta$ U. Ma расположены созвездия Персея, Возничего, Тельца, Близнецов, Малого Пса, Ориона, Большого Пса — это самый богатый звездами район неба. В 4–5 расстояниях $\alpha - \delta$ находится созвездие Возничего (в виде пятиугольника) с яркой



Рис. 63

(0,2^m) желтой звездой α — Капелла. Еще дальше в двух расстояниях $\alpha - \delta$ находится Телец с яркой оранжевой звездой α — Альдебаран. Южнее — в 5 расстояниях $\alpha - \delta$ находится созвездие Близнецов с двумя яркими звездами α — Кастор и β — Поллукс (1,2^m). Это созвездие состоит из двух цепочек слабых звезд, в конце северной цепочки расположена в настоящая время точка Рака (♋). Продолжив прямую еще на 4 расстояния $\alpha - \delta$, найдем созвездие Ориона, описываемое ниже. Проведя прямую $\epsilon - \gamma$ U. Ma на 7 расстояний $\alpha - \delta$, найдем яркую (0,5^m) желтоватую звезду Процион (α Малого Пса); еще дальше на 4 расстояния расположено созвездие Большого Пса со звездой α — Сириус.

Если запомнить расположение созвездий относительно Б. Медведицы, то, взглянув на небо, можно сразу определить, в какой его части расположено данное созвездие. Кроме того, по положению Б. Медведицы относительно Полярной можно определить приближенно звездное время (см. приложение 3.4).

В малых и средних широтах в качестве исходного для отыскания созвездий и звезд этого района неба удобнее использовать созвездие Ориона (рис. 63). Оно имеет характерную форму трапеции, перетянутой посередине «поясом» из трех звезд. (Древние олицетворяли в этом созвездии мифического героя Ориона; три звезды обрисовывали его пояс.) Наиболее яркая звезда этого созвездия Ригель (β Ориона, 0,3^m) — белого цвета, вторая по яркости — Бетельгейзе (α Ориона, 0,9^m) — оранжевого.

Применяя направления, показанные на рис. 63, в 4 расстояниях $\alpha - \gamma$ Ориона найдем уже известное созвездие Близнецов; в 3 расстояниях $\gamma - \alpha$ — созвездие Малого Пса; в 5 расстояниях — созвездие Возничего. Соединив звезды «пояса» Ориона дугой, в 3 расстояниях $\alpha - \gamma$ к северу найдем Альдебаран (α Тельца), а в 4 — звездное скопление Плеяд. По той же дуге, но к югу находится самая яркая звезда неба — Сириус (α Б. Пса, — 1,6^m), в Древнем Египте почитавшаяся священной («божественная Сотис»).

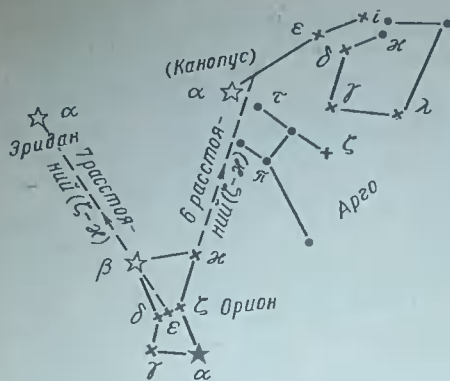


Рис. 64

Рассмотрим приемы опознавания главных созвездий и звезд южного неба, не видимых в широтах Советского Союза. При отыскании будем исходить из созвездий Ориона и Южного Креста.

1. Если соединить Звезды ζ и κ Ориона прямой и продолжить ее на 4—6 расстояний $\zeta - \kappa$ в южном направлении (рис. 64), то найдем район созвездия Аргос, звезда α которого — Канопус (-0.9^m) — зеленоватого цвета является второй по яркости после Сириуса звездой всего неба. Созвездие Аргос, или, как его иногда называют, Корабль Аргоса, разбито на четыре более мелких созвездия: Киль, Корма, Компас и Парус. (Канопус является α созвездия Киль, но в МАЕ сохранено название Аргос.)

2. Соединив звезды ϵ и β Ориона прямой и продолжив ее на 7—8 расстояний $\epsilon - \beta$ Ориона к югу (см. рис. 64), увидим яркую звезду Ахернар (α Эридана, 0.6^m). Остальные звезды этого созвездия слабее.

Среди созвездий другой части юж-

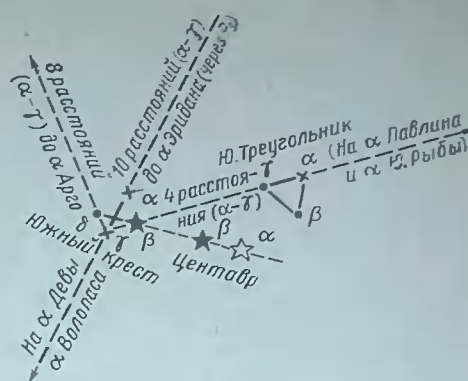


Рис. 65

ного неба исходным для ориентировки может служить созвездие Южного Креста (рис. 65), имеющее форму небольшого креста из четырех довольно ярких (от 1.5 до 3^m) звезд. В малых широтах его можно отыскать, соединив прямой известные нам звезды Арктур и Спика и продолжив ее к югу на 1.5 расстояния между ними.

3. В двух расстояниях $\delta - \beta$ Южного Креста в сторону звезды β расположены две бросающиеся в глаза своей яркостью (0.9^m и 0.3^m) звезды β и α Центавра.

4. Соединив звезды γ и β Южного Креста прямой и продолжив ее на 4 расстояния $\alpha - \gamma$, увидим созвездие Южного Треугольника, звезда α которого — Аtria пригодна для наблюдений.

5. Продолжив эту линию дальше до 8 расстояний $\alpha - \gamma$, увидим звезду α Павлина (2.1^m). Еще дальше на 11 расстояний $\alpha - \gamma$ находятся две звезды одинаковой (2.2^m) яркости — α и β Журавля, а еще в двух этих расстояниях — α Южной Рыбы.

§ 39. УСТРОЙСТВО ЗВЕЗДНОГО ГЛОБУСА, ЕГО УСТАНОВКА. ПОНЯТИЕ О ДРУГИХ ПОСОБИЯХ

Устройство звездного глобуса. Звездным глобусом называется прибор, представляющий модель небесной сферы, предназначенный для приближенного решения задач мореходной астрономии, изучения звездного неба и движения светил. У нас применяются две модели звездного глобуса: старая модель ЗГ (с положениями звезд на эпоху 1968 г. и

ранее) и модернизированная ЗГ — ОМ1.1 (на эпоху 1990 г.). Звездный глобус (рис. 66) состоит из собственно глобуса 1, нескольких колец и ящика (футляра). Глобус представляет пустотелый шар из металла или пластмассы диаметром 168 мм, на который наклеены карты звездного неба по участкам в таких проекциях, что искажения практи-

бота с ними аналогична работе с нашим глобусом.

Нанесение на глобус планет. Требуемые для нанесения координаты α и δ планет приведены в ежедневных таблицах МАЕ (α на среднюю гринвичскую дату). Прямое восхождение выбирают в градусах внизу колонки эфемерид, а склонение выбирают на $T_{гр} = 12^h$ и округляют до $0,1^\circ$, например планета Юпитер 11 мая 1985 г. имеет $\alpha = 318,6^\circ$ и $\delta = 16,6^\circ S$ (см. прил. 4).

Для нанесения планеты по верхней шкале на экваторе откладывают $\alpha_{пл.}$, например 318, и, подведя к этому отсчету подвижный меридиан, по нему отсчитывают δ к N или S , например 17° к S , т.е. от Полярной звезды. С помощью воскового карандаша место планеты отмечают крестиком и знаком планеты, например $+4$ (см. рис. 67). Места навигационных планет всегда расположены вблизи эклиптики (до $3,5^\circ$). Это служит хорошим контролем при их нанесении.

Нанесение на глобус Луны и Солнца. Для Луны и Солнца прямые восхождения в МАЕ не даны, поэтому их следует вычислять по формуле (69) в виде

$$\alpha = t_{гр}^V - t_{гр}^{св} \quad (127)$$

где величины $t_{гр}^V$ и $t_{гр}^{св}$ выбирают из МАЕ на данный час $T_{гр}$ (для Луны), или просто на $T_{гр} = 12^h$ (для Солнца).

Полученное α округляют до $0,1^\circ$. Склонение Луны выбирают в той же

строке $T_{гр}$ и округляют до $0,1^\circ$. Склонение Солнца получать не требуется, так как место Солнца будет на эклиптике, в пересечении ее с меридианом, проведенным по α ; однако для контроля лучше выбрать и $\delta_\odot$.

Если требуется уточнить α и δ планеты, например Венеры, на данную дату и время, то они получаются таким же путем.

Прямые восхождения светил откладывают по верхней шкале экватора в градусах, после чего по шкале меридиана (у новых — шкала на торце) откладывают δ к N или S . Место Луны будет не далее чем на $5,3^\circ$ от эклиптики. Аналогично на глобус можно нанести места любых объектов, например комет, спутника или космического корабля, выбрав их α и δ из составленных для них эфемерид. Для подбора звезд и планет при регулярных астрономических наблюдениях полезно периодически наносить планеты на глобус: Юпитер и Сатурн — через месяц, Марс — через две недели, Венера — каждую неделю.

Пример 36. 12.05.85 г. около $T_c = 16^h$ ($\mathcal{M} = 3W$) нанести на глобус Венеру, Сатурн, Солнце и Луну.

Решение.

1. Получение координат планет (см. приложение 4) Венера: $\alpha = 9,5^\circ$; $\delta = 4^\circ 30,2' \approx 4,5^\circ N$ (α приведено на 11.05); Сатурн: $\alpha = 233,4^\circ$; $\delta = 16,7^\circ S$.

2. Координаты Солнца и Луны (формула $\alpha = t_{гр}^V - t_{гр}^{св}$).

T_c	16^h	На $T_{гр} = 19^h$	Солнце		Луна	
	$\mathcal{M}$	3	$t_{гр}^V$	$155^\circ 29,3'$	$t_{гр}^{св}$	$155^\circ 29,3'$
$T_{гр}$		$19^h 12,05$	$t_{гр}^{св}$	105 55,5		177 32,4
Приблизительно	α		α	$49^\circ 33,8'$		$337^\circ 56,9'$
	α		α	$49,6^\circ$		337,9
	δ		δ	$18,3^\circ N$		$14,7^\circ S$

3. Уточнение α Венеры. Так как α Венеры быстро изменяется, его надо уточнить на 12.05 аналогично п. 2. На $T_{гр} 19^h 12,05$ $\alpha = 155^\circ 29,3' - 145^\circ 01,9' = 10^\circ 27,4' \approx 10,5^\circ$.

4. Нанесение светил на глобус. По α (на экваторе) и δ (на меридиане) карандашом «Стеклогрaф» наносим светила на глобус, пометив их места знаками: $\odot$, $\bullet$, $\circ$, $\circ$.

Выверка глобуса. Перед работой с глобусом полезно произвести его приблизенную выверку.

1. Совместив с точкой N отсчет 0° меридианного кольца у точки S также должны получить 0° (у новых глобусов — отсчеты 90°), а экватор должен совпадать с горизонтом. В этом положении выполняются проверки по пп. 2 и 3. Если совпадения нет, между колодками опоры прокладывается картон или делается выемка.

2. При отсчете 360° на центре меридианного кольца (у новых — на его *W* срезе) противоположный отсчет должен быть точно 180°.

3. Градусы высот на вертикалах должны соответствовать градусам склонений на кольце меридиана при $\varphi = 90^\circ$ (у новых глобусов $h = 90^\circ - \delta$).

Установка глобуса по месту и времени наблюдений. Чтобы глобус воспроизвел ту картину неба, которую видит наблюдатель на небесном своде в данный момент, необходимо установить меридианное кольцо глобуса в прорези горизонта и повернуть его шар по данной широте и по звездному времени S_M наблюдений. Для установки глобуса по широте надо повысить полюс, соответствующий широте, поднять над горизонтом на угол, равный широте (на рис. 66 и 67 имеем $\varphi_S = 30^\circ$ и $\varphi_N = 50^\circ$), причем, если φ_N , то над точкой *N* поднимается P_N (около него на глобусе написано «Полярная» или «Polaris»), если же φ_S , то над *S* поднимается противоположный P_S (у старых глобусов отсчет на меридиане у горизонта равен $90^\circ - \varphi$, а у зенита — φ). После этого глобус поворачивают вокруг оси, пока на середину кольца меридиана в его полуденной части не придет отсчет экватора, равный заданному $t_M^* = S_M$ (см. рис. 67). Если теперь глобус ориентировать по компасу так, чтобы линия *N* — *S* глобуса совпала с компасным направлением, то расположение светил и направления на них будут соответствовать наблюдаемым на небесном своде. Подводя крестовину вертикалов к на-

меченому светилу, можно считать его *h* и *A*. Точность полученных координат зависит от состояния глобуса и того его изготовления; в среднем для отечественных глобусов $m_h = \pm 0,5^\circ$, $m_A = \pm 0,8^\circ$.

Понятие о пособиях, заменяющих глобус. Звездный глобус, несмотря на небольшие размеры шара, все же несколько громоздок и работа с ним в стесненных условиях (на малых судах, в авиации) неудобна. В этих случаях применяют плоские изображения небесной сферы в виде специальных карт и сеток или специальные таблички для опознавания звезд. Эти пособия не обладают универсальностью глобуса; в решают лишь узкий круг задач: опознавание звезд и иногда получение *h* и *A* звезд грубо приближенно. Главное их достоинство — компактность.

Бортные карты неба представляют собой звездные карты, помещенные в футляр с прорезью, соответствующей истинному горизонту и средней широте зоны (приняты три зоны по 14° от 30° до $76^\circ N$). Карты устанавливаются в футляр совмещением его с датой в прорези сверху и применяются для опознавания и подбора ярких звезд.

Опознаватели звезд (Star Identifier, HO-2102 С и др.) широко применяются за рубежом вместо глобусов. Опознаватель состоит из карт северного и южного звездного неба (на двух сторонах листа пластмассы) и набора прозрачных пластинок с изображением горизонты и сетки вертикалов и альмукантаратов (через 10°) для широт также через 10° . Позволяют опознавать яркие звезды и производить их грубый подбор.

Таблицы для опознавания и подбора звезд. По *h* и *A* звезды можно с помощью обычных численных таблиц определить δ , λ , затем α , и по МАЕ опознать звезду. Выпускались также специальные таблицы для этой цели (на пример, в известных таблицах HO-214), но они оказались неудобными. В настоящее время для подбора звезд широко применяют таблицы типа HO-249 (см. § 82), где даны δ и *A* ярких звезд по φ и S_M через 1°.

§ 40. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ ЗВЕЗДНОГО ГЛОБУСА

С помощью звездного глобуса можно приближенно решить любую задачу переходной астрономии, но практически решаются три типа задач: определение названия неопознанной звезды или планеты; получение *h* и *A* звезд или планет на заданное время и варианты этой задачи (подбор звезд для наблюдений, определение ΔA , ΔK); определение времени прихода светила в заданное положение, например времени восхода светила, прихода на заданную высоту и т. п.

Определение названия неопознанной звезды или планеты. На практике часто бывают случаи, когда небо покрыто облаками с просветами, в которые видны лишь отдельные звезды. В этом случае определить, какая именно звезда наблюдалась, довольно трудно и приходится прибегать к помощи звездного глобуса. Кроме того, подобные задачи решаются при изучении звездного неба. Порядок решения этой задачи следующий:

1. Измерить высоту звезды (или $T_{\text{сп}}$)

определить ее пеленг по компасу и за-
метить T_c . Снять с карты φ_c и λ_c .

2. Рассчитать $T_{гр}$, выбрать из МАЕ
 $t_{гр}^V$ и рассчитать по формуле (94):

$$t_m^V = S_m = t_{гр}^V \pm \lambda_w^E.$$

3. Установить глобус по φ и S_m .
При установке S_m его значение приво-
дят на середину кольца меридиана (у но-
вых глобусов — на его W срез).

4. Перевести пеленг в азимут чет-
вертного счета. Установить дугу вер-
тикала по азимуту и индекс вертика-
ла по высоте.

5. Найти под индексом звезду по ее
месту в созвездии, которое приведено в
латинском или русском написании, на-
пример из созвездия Taurus (Телец).
С помощью списка звезд в конце МАЕ
определить номер звезды. По названию

Решение.

1.

T_c	20°50'	T	9°45'50"	t_T	183°35,9'	$KП$	137°
λ_c	1	u	+	Δt	11 43,7	ΔK	- 2
$T_{гр}$	24°50' 10.05	$T_{гр}$	21°46'47"	$t_{гр}^V$	195 19,6	$ИП$	135°
				λ	35 15	A	45° SE
				t_m^V	160°04,6'		

2. Устанавливаем глобус по $\varphi =$
 $= 41,7^\circ N$, поднимая P_N над точкой N на
 $41,7^\circ$. Для установки по времени поворачи-
ваем глобус до отсчета $160,1^\circ$ на полуденной
части меридианного кольца. Крестовину вер-
тикалов устанавливаем по $A = 45^\circ SE (135)^\circ$,
а индекс — на $h = 25^\circ$.

3. Под индексом читаем Virgo α (α Де-
вы); по списку МАЕ — $\lambda_c = 92$, Спика.

1.

T_c	5°10' 12.05	T	6°10'55"	t_T	139°27,7'	$KП$	50°
λ_c	11	u	- 20	Δt	2 39,2	ΔK	+ 1
$T_{гр}$	18°10' 11.05	$T_{гр}$	18°10'35"	$t_{гр}^V$	142 06,9	$ИП$	51
				λ	153 31		
				t_m^V	295°37,9'		

2. Устанавливаем глобус по $\varphi = 35,3^\circ S$
(над точкой S) и по $S_m = 295,6^\circ$. Вертикал
устанавливаем по $A = 51^\circ NE$ и $h = 61,8^\circ$.
Под индексом ничего нет, но точка близка к

и номеру выбрать координаты из МАЕ).
Так, Телец α — номер 24 (Альдебаран).

6. Если под индексом не окажется
звезды, то либо сделан промах при ре-
шении задачи, либо наблюдалась пла-
нета. Первым признаком планеты явля-
ется ее расположение около эклиптики,
а также ее яркость. Проверив решение
и установив его правильность, опозна-
ют планету. Для опознавания планеты
с глобуса снимают α и δ точки под ин-
дексом. С полученными данными и да-
той входят в ежедневные таблицы МАЕ
и отыскивают, у какой планеты δ и α
будут наиболее близкими к данным.

Пример 37. 10.05.85 г. около $T_c =$
 $= 20^\circ 50'$ ($\lambda_c = +1$), $\varphi = 41^\circ 40' N$; $\lambda_c =$
 $= 35^\circ 15' W$; наблюдали светило $\alpha = 25^\circ 25'$,
 $T_{гр} = 9^\circ 45' 50"$; $u_{гр} = +57^\circ$; $KП = 137^\circ$
(-2°) Опознать светило.

Пример 38. 12.05.85 г. около $T_c = 5^\circ 10'$
($\lambda_c = 11E$); $\varphi_c = 35^\circ 16' S$; $\lambda_c = 153^\circ 31' E$ наблю-
дали яркое светило $\alpha = 61^\circ 50,5'$; $KП =$
 $= 50^\circ (+1^\circ)$; $T_{гр} = 6^\circ 10' 55"$; $u = -20^\circ$. Оп-
знать светило.

Решение.

эклиптике. Снимаем координаты ее $\alpha = 319^\circ$,
 $\delta = 17^\circ S$. Из МАЕ на 11.05 внизу подходит
планета Юпитер ($\alpha = 318,6^\circ$, $\delta = 16^\circ 34' S$).

Получение высоты и азимута светила на заданное время. 1. Рассчитать $T_{гр}$ и T_c для момента предполагаемых наблюдений и снять с карты φ_c и λ_c на это время. Звезды обычно наблюдают в сумерки так, что рассчитывается время середины сумерек.

2. Рассчитать t_m^V на это $T_{гр}$ по формуле (94).

3. Установить глобус по φ и S_m .

4. Установить крестовину так, чтобы оцифрованный вертикал касался светила (звезды), направить индекс на место светила, снять и записать отсчеты его h и A .

5. Если требуется получить h и A планеты, Солнца или Луны, то их места предварительно наносят на глобус по α и δ , как показано в § 39.

Пример 39. 11.05.85 г. в Тихом океане, $\varphi_c = 54^\circ 25' N$, $\lambda_c = 153^\circ 32' W$, $\lambda_0 = 9^\circ W$, в утренние сумерки $T_c = 3^h 47^m$. Определить h и A звезды α Волопаса.

Решение.

1.	T_c	$3^h 47^m$	t_T^V	$49^\circ 12,9'$
	$+ \lambda_0$	9	Δt	11 46,9
	$T_{гр}$	$12^h 47^m$ 11.05	$t_{гр}^V$	$60^\circ 59,8$
			λ	153 32
			t_m^V	$267^\circ 27,8'$

2. Устанавливаем глобус по $\varphi_N = 54,4^\circ$ и $S_m = 267,5^\circ$.

3. Находим на глобусе созвездие Bootes — α (α Волопаса) и снимаем $h = 36^\circ$, $A = 70^\circ SW$ (по новому глобусу $h = 36,5^\circ$; $A = 251^\circ$).

Примечание. Если одновременно требуется получить h и A планеты или Луны, то они наносятся на глобус, как показано выше, и при той же установке по φ снимаются их h и A . Например, для Луны на $T_{гр} = 13^h 11,05^m$ $\alpha = 307^\circ 41,2'$, $\delta_0 = 20^\circ 17'$ и с глобуса $h = 5^\circ$, $A = 37^\circ SE$.

Подбор звезд для определения места. Первой операцией является выбор времени наблюдений. Для сумеречных наблюдений вечером начало наблюдений планируют на середину гражданских сумерек, утром — на середину навигационных. После этого рассчитывают S_m и, если надо, время пуска секундомера. Далее по φ и S_m (для каждой последующей звезды прибавляется 1°) устанавливается глобус.

При определении места по двум звездам разность азимутов их должна быть по возможности близка к 90° . При определении по трем звездам разность азимутов в каждой паре должна быть близкой к 120° , а для четырех звезд разность азимутов в каждой паре близка к 180° , между парами — к 90° . Кроме того, должна учитываться освещенность горизонта и видимость звезд. Первой подбирают самую яркую звезду вечером, слабую — утром (наблюдения лучше начинать с Е). Высоты звезд подбирать в пределах от 10° до 73° . Результаты подбора записываются в записную книжку.

Пример 40. 12.05.85 г. в Индийском океане, подобрать звезды для вечерних наблюдений. На $T_c = 18^h$ имеем $\varphi_c = 27^\circ 52' S$, $\lambda_c = 108^\circ 45' E$, $\lambda_0 = 8^\circ E$.

Решение.

1. Определение времени начала наблюдений

Заход $\odot$, $\varphi = 20^\circ$	ST_T	17 33	$T_{гр} = 10^h$...
За $\Delta\varphi = 7^\circ 52'$	ΔT_φ	12 (-16^m)	$\Delta T = 18^m$...

T_m	17 21
λ	7 15

Заход Солнца	$T_{гр}$	10 06
	$+ \Delta T/2$	12

Начало наблюдений $T_{гр}$ $10^h 18^m$ 12.05 ($T_c = 18^h 18^m$).

2. Определение звездного времени

t_1^V	$20^h 07,5'$
Δt	4 30,7

$t_{гр}^V$	24 38,2
λ	108 45

t_m^V	$133^\circ 23,2'$
---------	-------------------

3. Устанавливаем глобус по $\varphi = 27,9^\circ S$ и $S_m = 133^\circ, 134^\circ, \dots$ и с помощью вертикалов

подбираем звезды, начиная с самой яркой — Сиренуга.

Звезда	α Б. Пса	α Аргс	α Дельт	α Лямб
h ; ИП	58° ; 284°	52° ; 220°	27° ; 88°	47° ; 21°
По новому глобусу	$58,5^\circ$; 284°	53° ; 218°	25° ; 89°	47° ; 24°

Определение времени прихода светила в заданное положение (восход, кульминацию, заданную высоту или разность азимутов и т.п.).

1. Снять с карты φ_c и λ_c на предполагаемое T_c явления (на вечер, ночь, утро).

2. Установить глобус по широте.

3. Поворотом сферы привести наметченную звезду или планету в требуемое положение (на горизонт, на первый вертикал и т. п.).

4. Снять отсчет $S_M = t_M^Y$ у полученной части кольца меридиана наблюдателя.

5. Рассчитать $t_{TP}^Y = t_M^Y \mp \lambda_c^E$ и с помощью МАЕ получить T_{TP} и затем T_c явления (см. § 30, пример 26).

Если T_c значительно отличается от предполагаемого, то координаты φ и λ уточняют и, если нужно, решение выполняют во втором приближении.

Глава 10. СЕКСТАН

§ 41. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАВИГАЦИОННОГО СЕКСТАНА

Морские угломерные инструменты должны быть приспособлены к работе на подвижном основании, и измерение угла должно выполняться просто и быстро. Эта задача решается легче всего с помощью отражательной оптической схемы, состоящей из двух зеркал или призм. Поворачивая одно из зеркал, наблюдатель может увидеть одновременно оба предмета, между которыми измеряется угол, причем положение зеркал соответствует величине угла; подобная схема осуществлена в секстанах и наклономерах.

Секстаном называется угломерный инструмент, построенный на принципе отражательной схемы и предназначенный для измерения углов на подвижном основании. Название «секстан» связано с величиной его дуги лимба, равной приблизительно $\frac{1}{6}$ окружности (по латыни sextantis—шестая часть); в авиации применяется термин «сексатант». В настоящее время применяются следующие конструкции секстанов: навигационные секстаны типов СНО-М, СНО-Т, секстаны с искусственным

горизонтом типов ИМС, ГИМС и перископические.

Принципиальная схема навигационного секстана. Пусть ДО (рис. 68) — направление луча от верхнего (или правого) предмета, ПО — от нижнего (или левого) предмета. Требуется измерить угол h между направлениями на эти предметы. На пути луча ПО установим зеркало А, на пути луча ДО — зеркало

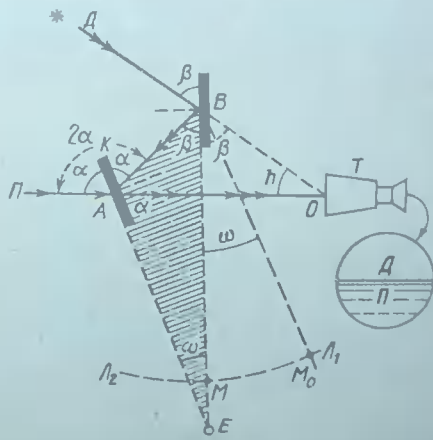


Рис. 68

В так, чтобы их плоскости были перпендикулярны плоскости угла h , а отражающие поверхности направлены внутрь. Поворачивая зеркало B вокруг оси, перпендикулярной чертежу, можно добиться такого его положения, при котором луч от предмета D , отразившись от поверхностей зеркал (т. е. дважды отраженный), пойдет в направлении AO ; луч же от предмета P (прямовидный) будет виден поверх зеркала A . Совмещая эти изображения в поле зрения трубы T , получим определенное, единственное для данного угла, положение зеркала B относительно A . Установим зависимость между измеряемым углом h и углом ω пересечения плоскостей зеркал.

На основании закона отражения света «угол падения луча равен углу отражения его» имеем равные углы β , β и α , α между плоскостями зеркал и лучами DO и PO . Применим теорему геометрии «внешний угол треугольника равен сумме внутренних, с ним не смежных» к $\triangle OAB$, включающему угол h , и к $\triangle EAB$, включающему угол ω , получим $\angle BAP = 2\alpha = 2\beta + h$ и $\angle BAK = \alpha = \beta + \omega$, откуда

$$h = 2(\alpha - \beta), \quad (128)$$

$$\omega = \alpha - \beta. \quad (129)$$

После подстановки этого выражения в (128) получим

$$h = 2\omega, \quad (130)$$

т. е. измеряемый угол равен двойному углу между плоскостями зеркал секстана при таком их положении, когда оба изображения предметов (прямовидное P и дважды отраженное D) совмещены в поле зрения трубы (см. рис. 68).

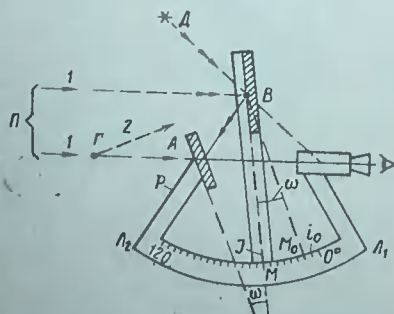


Рис. 69

Выражение (130) можно записать в виде

$$\omega = \frac{h}{2}, \quad (131)$$

т. е. угол между зеркалами равен половине измеряемого.

Принцип измерения угла секстаном. Измерение угла h осуществляется совмещением изображений предметов D и P в середине поля зрения, например — светила и горизонта (см. рис. 68). Заменяем угол h на основании формулы (131) углом ω ; его и надо теперь измерить. Проведем из центра вращения зеркала B дугу J_1J_2 произвольного радиуса (см. рис. 68) и линию BM_0 параллельную плоскости зеркала A . Получим $\angle M_0BM = \omega$ и дугу M_0M , также равную ω . Если теперь $\sphericalangle M_0M$ разделить на 0,5°, а пометить целыми градусами [см. формулу (130)], то $\sphericalangle M_0M = h$ в принятых делениях. Чтобы не получать ω или h как разность отсчетов M и M_0 , на дуге J_1J_2 наносится отсчет $M_0 = 0$, соответствующий параллельному положению зеркал A и B (при этом $\omega_0 = 0$; $h_0 = 0$), тогда $h = M$. В принципе, конструкция секстана выполняется так (рис. 69). Поместим зеркало B , называемое подвижным или большим, на металлическую линейку BM , называемую алидадой; зеркало вместе с алидадой может вращаться около оси B . Зеркало A , называемое малым, закрепим неподвижно на раме p . Другой конец алидады с индексом (штрихом) J перемещается вдоль металлической дуги лимба J_1J_2 . При изготовлении секстана на месте M_0 , где зеркало $B \parallel A$, наносится штрих 0° , называемый нуль-пунктом делений лимба. Влево от него по лимбу наносятся деления (0,5°) до 120—150°, а вправо — до 355°, через 1°. Для увеличения точности совмещения предметов D и P и улучшения видимости устанавливается труба T (6—8×). Теоретически конструкция должна обеспечивать совпадение центра вращения зеркала B и центра дуги лимба, перпендикулярность зеркал плоскости лимба, устойчивость зеркала A (оно «держит» нуль) и точность отсчета угла $\pm 0,1'$.

Поправка места нуля. Поправка индекса. Местом нуля на лимбе

M_0 называется отсчет, получаемый при параллельном положении зеркал B и A . На практике его можно получить, совмещая два изображения удаленного предмета Π (см. рис. 69), лучи PB и PA от которого параллельны. В принципе, M_0 должно совпадать с нуль-пунктом $0'$, но линия BM_0 параллельна плоскости зеркала A , поэтому отсчет M_0 зависит от положения зеркала A . В процессе работы от сотрясений и при касании малое зеркало смещается и место M_0 отходит от нуль-пункта делений $0'$. Эти смещения, если они велики, можно устранить поворотом плоскости зеркала A с помощью специального винта, однако полностью они не устраняются. Поэтому практически в отсчет M , произведенный по лимбу, следует ввести поправку. В теории различают поправку места нуля и поправку индекса. Поправка зависит от положения M_0 и от того, относительно какого предмета измерялся сам угол — далекого Π или близкого Γ , т. е. как от внутренних, так и от внешних причин. В этом одна из особенностей секстана: начальный отсчет зависит от расстояния до прямолинейного предмета.

Поправка места нуля. Если предмет Π расположен в бесконечности или практически достаточно далеко, то лучи PA и PB (1 на рис. 69), идущие от этого предмета к зеркалам секстана, параллельны. При этом $h = 0'$ и $\omega = 0'$, т. е. зеркала также параллельны; отсчет на лимбе при этом равен M_0 (см. рис. 69).

Поправкой места нуля i_0 называется разность между $0' (360)$ и отсчетом места нуля на лимбе M_0 , т. е.

$$i_0 = 0' (360) - M_0 \quad (132)$$

Например, на рис. 69 поправка отрицательна ($-i_0$). Отсчет M_0 получают при параллельном положении зеркал, т. е. при совмещении двух изображений предмета Π . Поправка i_0 зависит только от внутренних причин: положения зеркала A , устойчивости его и других деталей, и применяется при измерении угла между далекими предметами.

Однако секстаном часто измеряют углы над близкими предметами, тогда на отсчете скажется расстояние до предмета.

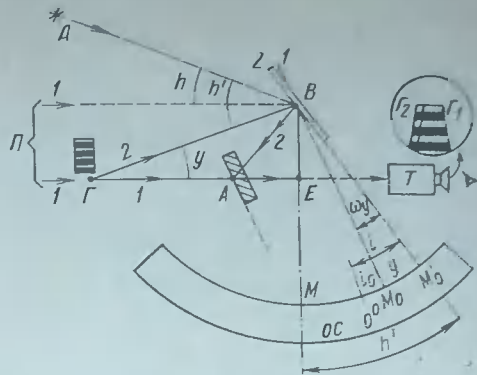


Рис. 70

Поправка индекса. Если прямолинейный предмет Γ (рис. 70) расположен близко к наблюдателю, то лучи GB и GA , идущие от этого предмета к зеркалам, не параллельны, а образуют угол y (под этим углом видны зеркала A и B секстана со стороны предмета, его называют иногда параллаксом зеркал). Поэтому наведение зеркала B на предмет Γ для получения начального отсчета даст на лимбе не отсчет M_0 , а M_0' . Этот отсчет соответствует углу ω_y , измеряемому углом y при предмете Γ . В делениях лимба угол y равен дуге M_0M_0' . Появление этого угла объясняется тем, что центр B измеряемого угла не совпадает с линией визирования $ТАГ$, поэтому угол h надо привести к центру большого зеркала.

Угол y зависит от расстояния $ГЕ$ до предмета, поэтому определим, при каком расстоянии этот угол будет меньше $0,1'$. Из прямоугольного треугольника $ГВЕ$, в котором $BE \approx 5$ см, имеем

$$\operatorname{tg} y = \frac{BE}{ГЕ}, \quad (133)$$

откуда, принимая $\operatorname{tg} y = y' \operatorname{arc} 1'$, получим

$$ГЕ = \frac{5 \text{ см}}{y' \operatorname{arc} 1'} = 1,72 \text{ км} \approx 1 \text{ миля}.$$

Следовательно, угол y (параллакс) имеет существенное значение, если прямолинейный предмет будет на расстоянии ближе 1 мили.

Отсчет, получаемый при совмещении двух изображений одного прямо-

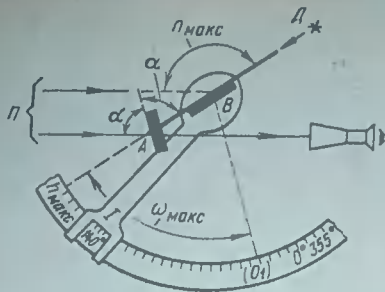


Рис. 71

видимого предмета Γ , называется отсчетом поправки индекса oi .

Поправкой индекса i называется алгебраическая разность между 0° (360°) и отсчетом поправки индекса oi , т. е.

$$i = 0^\circ (360^\circ) - oi. \quad (134)$$

Поправка индекса может иметь знак «+», если oi меньше 360° , и «-», если oi больше 0° (360°). Так как угол $y = \sphericalangle M_0 M'_0$, а $\sphericalangle 0^\circ M'_0 = i_0$, то $\sphericalangle 0^\circ M_0$ включает углы y и i_0 , т. е.

$$i = i_0 + y,$$

т. е. поправка индекса включает в себя поправку места нуля и параллакс зеркал. Если же предмет Γ удален более чем на 1 милю, то $y \approx 0$ и $i = i_0$, т. е. поправка индекса равна поправке места нуля.

Из сказанного видно, что поправка индекса в отличие от поправки нуля зависит не только от внутренних причин, но и от расстояния до наблюдаемого предмета, почему она и должна определяться сразу же после (или до) наблюдений.

Следовательно, при измерении углов или высот между предметами, удаленными более чем на 1 милю, поправка индекса равна поправке места нуля и может определяться по любому удаленному предмету. Принято и в этом случае поправку i_0 называть поправкой индекса i , а определять ее по более удобному предмету — светилу. Если же прямо-видимый предмет Γ расположен близко, например при наблюдении высот над береговой чертой, над ватерлинией соседнего судна или при измерении высоты маяка, поправку индекса следует определять по прямовидному (близкому) предмету, совмещая его прямовидное

и дважды отраженное изображения сразу же после измерения угла.

Обозначив отсчет M секстана при измерении угла h' через os , получим

$$h' = os - i. \quad (135)$$

В большинстве случаев на практике $i = i_0$ и определяется по наблюдениям светил. При этом теоретически нет необходимости определять i одновременно с наблюдением угла (высоты), но вследствие неустойчивости зеркала A практически рекомендуется определять i близко ко времени наблюдений.

Пределы измеряемых углов. Линия PB (см. рис. 70), при наведении на которую зеркала B получается место нуля M_0 , служит как бы разграничительной «нулевой линией» углов: вверх от нее измеряются углы от 0° до предельного, а вниз — углы, заканчивающие полную окружность (359° , 358°).

Наибольший возможный для наблюдения угол $h_{\max}$ (рис. 71) получается при таком положении большого зеркала, в котором луч от предмета D уже не отражается, а скользит по поверхности зеркала, но все же попадает на малое зеркало A . При этом угол $\beta = 0^\circ$, и по формуле (128) получим

$$h_{\max} = 2\alpha. \quad (136)$$

Из этого выражения видно, что предельный измеряемый угол зависит от установки малого зеркала. У современных секстансов угол α равен 60° — 75° и, следовательно, предельный угол $h_{\max} = 120^\circ$ — 150° . У новых отечественных секстансов $h_{\max} = 140^\circ$, у старых — 150° , у иностранных — обычно 120° , реже 145° . Чтобы алидада не мешала приведению зеркала B в крайнее левое положение, большое зеркало помещается под углом α продольной оси алидады BI (см. рис. 71), поэтому нуль-пункт делений 0° сдвинут на тот же угол правее теоретического положения (O_1).

Деления от 0° вправо относятся к углам 359° , 358° и т. д. Они предназначены для отсчетов при смещении места нуля, а также для измерения углов, расположенных в секторе BGA (см. рис. 70), которые могут получаться при определении поправки индекса. Так как угол y , входящий в поправку индекса, зависит от расстояния GE , то из формулы (133) можно определить предельную ве-

личину y , принимая, что предмет Γ не будет ближе 50 см к наблюдателю; тогда $\operatorname{tg} y = \frac{5}{50} = 0,1$; $y = 5^\circ 43'$. Из этого вытекает, что вправо от 0° достаточно нанести пять градусных делений, т.е. до 355° , и это практически обеспечит измерение углов при любых расстояниях до предмета Γ . Следовательно, секстаном можно измерять углы от 355° (-5°) до 120° — 150° в зависимости от образца секстана.

Основным достоинством секстана, благодаря которому он уже 250 лет применяется в навигации, является возможность просто и точно (до $\pm 0,5'$) измерить угол с подвижного основания. Недостатки, вытекающие из его принципа и теории, это: ограничение измеряемого угла, зависимость i от расстояния до предмета, большие требования к конструкции и точности изготовления, чем у «круговых» приборов, и усложнение методики наблюдений.

§ 42. УСТРОЙСТВО НАВИГАЦИОННЫХ СЕКСТАНОВ

В настоящее время имеются секстаны следующих типов: навигационные — для измерения углов и высот на судах; промерные — для измерения углов при гидрографических работах; секстаны с искусственным горизонтом типов ИМС, ГИМС; перископические секстаны — на самолетах и подводных лодках; автоматизированные секстаны (оптические и радиоастрономические) в составе автоматических навигационных систем.

На судах морского флота применяются главным образом отечественные навигационные секстаны марок СНО (секстан навигационный с осветителем), СНО-2М, СНО-М (модернизированный), представляющие усовершенствованные модели одного секстана СН, а также секстан СНО-Т (тропикоустойчивый), выпускаемый нашей промышленностью с 1972 г. На некоторых судах встречаются зарубежные секстаны в основном моделей VEB из ГДР и «Плат» из ФРГ.

Навигационный секстан состоит из следующих основных узлов: рама, алидада с осью вращения, оптическая система и отсчетное устройство.

Общий вид и название отдельных частей секстана СНО-Т показаны на рис. 72: 1 — рама секстана; 2 — планка рамы; 3 — ручка; 4 — лимб; 5 — зубчатая рейка; 6 — алидада; 7 — отсчетно-стопорное устройство; 8 — отсчетный барабан; 9 — лупа-осветитель; 10 — светофильтры малого зеркала; 11 — малое зеркало; 12 — светофильтры большого зеркала; 13 — большое зеркало; 14 а — ночная труба; 14б — астрономическая (дневная) труба; 15 а —

регулируемые винты малого зеркала; 15 б — регулировочный винт большого зеркала. Разные модели секстанов отличаются главным образом устройством рамы, алидады с осью и отсчетного устройства. Так, в секстане СНО-Т алидада расположена под рамой и имеет ось вращения в виде втулки. В секстанах СНО-М алидада расположена сверху, а ось вращения — в виде тонкого штыря; это устройство менее совершенно. Известно три типа отсчетных устройств секстана: отсчетный барабан (микрометрический винт) верньер и оптическое отсчетное устройство. В прошлом применялся исключительно верньер, представляющий пластинку с делениями меньшей длины, чем на основной шкале лимба. Эта пластинка крепилась к алидаде и служила для снятия минут угла и их десятых (отсчет делался по совпавшему штриху). Как дополнительное устройство верньер встречается и теперь, например в секстанах ИМС-3 и в зарубежных. Были по-

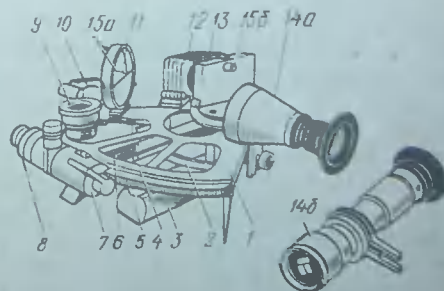


Рис. 72

№ п/п	Данные	СНО-М	СНО-Т
1	Диапазон измеряемых углов	0—140°	0—140°
2	Точность отсчета	0,1'	0,1'
3	Параметры труб (увеличение, поле зрения, изображение): дневной (астрономический)	Универсальная труба 7,5×; 8° обратное	6×; 4°30' обратное
	ночной (Галилея)	Нет	4×; 8° прямое
4	Суммарная инструментальная поправка s , не более	2'	30"
5	Мертвый ход	—	±6"
6	Масса секстана без ящика	1,35 кг	1,5 кг
7	Средняя точность измерения высот (по данным экспериментов): Солнца	±0,6'	±0,4'
	звезды	±0,7'	±0,5'

пытки внедрить оптическое отсчетное устройство, например в ВЕВ ГДР, но его конструкция оказалась недостаточно точной.

В настоящее время в секстанах применяется отсчетно-стопорное устройство, состоящее из микрометрического винта с отсчетным барабаном (на алидаде) и зубчатой рейки (на лимбе). Это червячное зацепление может разъединиться нажимом на лапки стопора (см. рис. 72) и переставляться на новое значение угла. Зубчатое зацепление рассчитано так, что за один полный оборот винта алидада переместится ровно на одно градусное деление лимба, поэтому барабан разделен на 60 частей, равных минутам измеряемого угла. Устройство имеет два индекса: градусный на алидаде у лимба и минутный — у отсчетного барабана. Он

показывает минуты; десятые доли минут оцениваются на глаз. Подобное устройство позволяет производить отсчет угла проще и быстрее, чем другими устройствами, однако обладает рядом недостатков, присущих зубчатым зацеплениям: «мертвым ходом» винта и зависимостью отсчета от механического состояния зубчатой рейки и винта. Секстаны с отсчетным барабаном требуют более тщательного ухода и специальной методики наблюдений.

В настоящее время рядом фирм разрабатываются устройства автоматического съема и дистанционной передачи измеренного угла на записывающее устройство, а также для ввода угла в ЭВМ (угол регистрируется одновременно с моментом).

Основные технические данные секстанов приведены в табл. 6.

§ 43. ПОНЯТИЕ ОБ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЯХ СЕКСТАНА И ИХ УЧЕТЕ

Ошибки в отсчете угла, возникающие от погрешностей изготовления и конструкции, называются инструментальными погрешностями секстана. Некоторые из них являются систематическими; они компенсируются введением поправки s или методом наблюдений. Другие относятся к случайным и оцениваются точностью m_s поправки. Рассмотрим основные источники погрешностей секстанов с отсчетным барабаном.

Нарезка зубчатой рейки. У большинства современных секстанов основ-

ным источником погрешностей являются ошибки делений зубчатой рейки. Они возникают от дефектов изготовления секстана, а также в процессе эксплуатации от износа и небольших повреждений. По данным нашего исследования, эти погрешности у секстанов СНО выпуска до 1965 г. достигали 1,5', более новых — до 0,8'; у секстанов СНО-Т — не превышали 0,4'. Вследствие того что эта погрешность изменяется, а также может возникнуть при эксплуатации, секстан через каждые три года сдают на

проверку; по этой же причине его поправка должна определяться через $5''$.

Эксцентриситет алидады. Эксцентриситетом алидады называется несовпадение центра дуги лимба с осью вращения алидады, т. е. с точкой вращения большого зеркала, при которой измеряются углы. Вследствие этого дефекта изготовления в отсчетах секстана появляются погрешности, возрастающие с увеличением угла. Поправка отсчетов за эксцентриситет выражается формулой

$$\Delta h_a = 2\varepsilon'' \left[\sin \left(\frac{\alpha}{2} - p \right) + \sin p \right], \quad (137)$$

где $\varepsilon'' = \frac{e}{R \operatorname{arc} 1''}$ — угловая величина эксцентриситета;

e — линейная величина его, мм;

p — направление его от линии нуль-пункта;

R — радиус дуги лимба, мм.

Погрешности от эксцентриситета у различных марок секстанов неодинаковы. У секстанов СНО встречается значительный эксцентриситет, дающий погрешности до $1-1,5''$; у большинства секстанов СНО-Т они невелики или отсутствуют, что объясняется хорошей конструкцией втулки. Ошибки от эксцентриситета у секстанов СНО могут появиться в процессе эксплуатации — от ударов или сильного нажима на ось зеркала.

Клиновидность зеркал. Призматичностью или клиновидностью называется непараллельность поверхностей зеркала; она приводит к отклонению отраженного луча. Клиновидность большого зеркала вызывает погрешность в отсчетах, возрастающую с увеличением угла, и раздвоение изображений, заметное при больших углах. У секстанов СНО и зарубежных эта погрешность иногда встречается; у секстанов СНО-Т зеркало с передним покрытием — и этой ошибки нет. Клиновидность малого зеркала вызывает постоянную ошибку, компенсируемую поправкой индекса.

Инструментальная поправка секстана. Рассмотренные погрешности делений рейки, эксцентриситета и клиновидности действуют совместно и вносят общую погрешность в отсчет угла, зависящую от его величины. Для компен-

сации ее в ос вводится инструментальная поправка s , приводимая в аттестатах секстана через $5''$. Ее определение рассмотрено ниже. У секстанов СНО поправка достигает иногда $2''$; СНО-Т — не более $0,5''$. Почти все зарубежные марки секстанов также имеют значительные величины s (от $30''$ до $2''$), за исключением секстанов предприятия ВЕВ из ГДР, у которых суммарная поправка не превышает $20''$. К сожалению, фирмы часто пишут $s = 0$ вместо действительных поправок.

Технический формуляр секстана (аттестат). Навигационный секстан снабжается техническим формуляром, в котором приводятся его технические характеристики и результаты определения поправки s в лаборатории завода. Приводится также мертвый ход. Поправки s действительны не более трех лет, после чего необходимо произвести перепроверку секстана (он сдается в навигационную камеру парокходства).

Определение инструментальных поправок s секстана на поверочном приборе. Получение поправок s секстана выполняют путем сравнения угла, измеренного секстаном, с точным значением угла, снятым с эталонного круга.

Прибор для проверки секстанов (рис. 73) состоит из точно разделенного круга 1 с отсчетным устройством 6, платформы и консолей 4 для установки проверяемых секстанов, коллиматоров 3, дающих изображение удаленного пред-

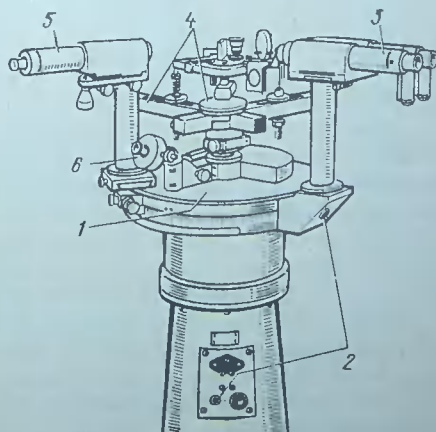


Рис. 73

мета (креста нитей — миры), зрительной трубы 5 и осветительной системы 2.

Секстан подготавливают к проверке, т. е. его зеркала выверяют, зубчатую рейку смазывают, отсчетный барабан прокручивают от 0 до 120° . После этого секстан без трубы закрепляют в середине прибора и вращением барабана на нем через 5° последовательно ставят углы от 0 до 120° . Эти углы сравнивают с углами на эталонном круге с помощью отсчетного устройства 6, где и снимают поправки s'' с их знаками. Поправки получают несколько раз, и из них берут среднее арифметическое; это и будет s . Аналогично можно получить поправки барабана. Полученные поправки заносят в аттестат секстана.

Показанный на рис. 73 прибор выпускается предприятием VEB Präzision Mechanik (Freiberg DDR) и применяется у нас для проверки секстанов; сходные приборы выпускаются фирмой «Плат».

Погрешности секстана, не компенсируемые поправкой s . Секстанам с отсчетным барабаном свойственны следующие дополнительные погрешности: погрешности отсчетного барабана, нестабильность отсчета (ошибка поправки); погрешности от мертвого хода отсчетного устройства. Иногда у всех марок секстанов встречаются ошибки светотеневых.

Ошибки в отсчетах барабана вызываются погрешностями червячного зацепления, для компенсации которых следовало бы вводить поправки на минуты угла (поправку s_1). Однако в заводских формулярах ее нет, поэтому у секстанов СНО возможна эта погрешность до $0,5-0,8'$; у секстанов СНО-Т она не превышает $0,1'$. Ее можно обнаружить сравнением поправки индекса, определенной по Солнцу (на отсчете $30'$) и по звезде (на 0°).

Погрешность «нестабильности отсчета» вызывается недостаточно высоким качеством изготовления отсчетного стопорного устройства. Она свойственна как секстанам СНО, так и СНО-Т, и в среднем составляет $\pm 0,2'$.

Мертвый ход отсчетного устройства. Вследствие несовершенства изготовления отсчетного узла прямое и обратное вращения барабана дают разные смещения алидады, т. е. разные отсчеты, при этом люфта обычно не бывает. Эта погрешность называется мертвым ходом и оценивается разностью показаний барабана при его прямом и обратном вращении. У секстанов СНО мертвый ход в среднем около $0,4'$, но встречается (особенно у бывших в работе секстанов) до $1,5'$; есть мертвый ход и у секстанов СНО-Т (до $0,6'$), несмотря на то, что по техническим условиям он не должен превышать $0,1'$. Устранение этой погрешности требует для всех секстанов с барабаном специальной методики наблюдений, а именно: при наблюдениях высот и при определении i требуется вращать отсчетный барабан в сторону увеличения отсчетов (если перевел, то отвернуть назад и подводить снова).

Из обзора погрешностей секстана вытекает, что для повышения точности при работе с секстаном надо соблюдать следующие рекомендации:

сдавать секстаны в переаттестацию каждые три года и при повреждении; периодически прочищать зубчатую рейку секстана щеткой и смазывать маслом; после этого следует прокрутить барабан от 0 до 140° ;

избегать ударов по какой-либо части секстана;

измерение высот и поправки индекса следует заканчивать вращением барабана всегда в сторону увеличения отсчетов — для компенсации мертвого хода.

§ 44. ПОНЯТИЕ О СЕКСТАНАХ С ИСКУССТВЕННЫМ ГОРИЗОНТОМ

Применение искусственного горизонта в море. В условиях, когда светила видны, а естественный горизонт не виден (ночью, в тумане, во льдах), в принципе, можно применить любой искусственный горизонт (ртутный, масля-

ный, зеркальный) или теодолит. Делались попытки применять и в открытом море приставки к секстану в виде уровня или гироскопа (или масло в ведре). Однако одиночное измерение в море дает высоту относительно равнодействую-

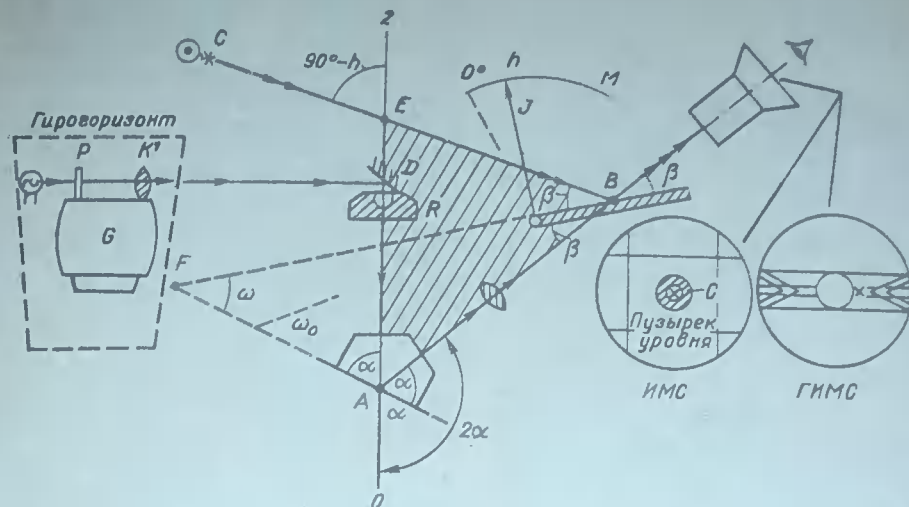


Рис. 74

щей сил тяготения и качки — «ложной вертикали» — до $2-3^\circ$. Для получения точной вертикали необходимо непрерывное наблюдение с автоматическим осреднением результатов. Такое осреднение выполняется фрикционным полуавтоматом — интегратором. Только с его введением (в 40-е годы) стало возможным применение секстана с искусственным горизонтом. Позже появились гировертикали, стабилизирующие по вертикали автоматические установки, но это уже область астросистем.

В настоящее время имеются: интегрирующий морской секстан (ИМС) с пузырьковым уровнем, такой же гироскопический секстан (ГИМС) и панорамные перископические секстаны с гирогоризонтом — в авиации и подводном флоте.

Принципиальная схема секстанов ИМС и ГИМС. В интегрирующих секстанах применена та же отражательная схема, что и в навигационном, но для искусственного горизонта.

Пусть на рис. 74 zO — отвесная линия, даваемая пузырьком R или гироскопом G ; CB — направление луча от светила. Угол zEC — зенитное расстояние светила, равное $90^\circ - h$, которое надо измерить.

Поместим на пути луча CB плоское стекло B , наполовину прозрачное (большое зеркало), а на пути луча DO , от вертикали — неподвижное зеркало A (пря-

тиугольная призма); угол между их плоскостями — ω . Поворачивая зеркало B , можно совместить лучи от светила и вертикали. Установим соотношение между углами ω и $90^\circ - h$.

Из $\triangle ABE$ на основании теоремы о внешнем угле (см. § 41) получим

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

или

$$90^\circ - h = 2(\alpha - \beta). \quad (*)$$

Аналогично из $\triangle ABF$ получим $\omega + \beta = \alpha$, или

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

Подставляя эту формулу в (*), получим

$$90^\circ - h = 2\omega,$$

или

$$\omega = \frac{90^\circ - h}{2} = \frac{z}{2}, \quad (138)$$

т. е. измеряемый угол между отвесной линией и направлением на светило равен двойному углу между зеркалами при совмещении изображений пузырька уровня и светила в поле зрения трубы. Полученное соотношение (138) аналогично выведенному для навигационного секстана.

Установим, как расположится зеркало B относительно A при высотах светила $h = 0$ и 90° .

Из выражения (138) при $h = 0$ получаем $\omega_0 = 45^\circ$, а при $h = 90^\circ$ $\omega = 0^\circ$,

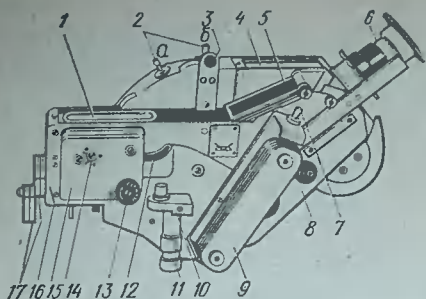


Рис. 75

т. е. угол между зеркалами меняется от 45° до 0° . Следовательно, если при угле $\omega_0 = 45^\circ$ на шкале 0° М поместить ноль (см. рис. 74), а полуградусные деления ее пометить целыми градусами, то угол поворота индекса J , равный углу поворота зеркала B , даст отсчет высоты светила. Поворот зеркала B осуществляется угломерным барабаном.

Особенности устройства секстанов ИМС и ГИМС. Интегрирующие секстаны состоят из следующих основных узлов: оптической системы, искусственного горизонта (уровень, гироскоп), угломерного устройства, осредняющего механизма (интегратора), осветительной системы, корпуса прибора и вспомогательных деталей (рис. 75).

Оптическая система и искусственный горизонт секстанов показаны на принципиальной схеме (см. рис. 74). Общий вид секстана ИМС показан на рис. 75. Секстан состоит из следующих деталей: 1 — интегратор; 2а, б — кнопки включения и выключения фиксатора; 3 — серьга подвески; 4 — угломерный барабан; 5 — светофильтры; 6 — зрительная труба; 7 — выключатель освещения; 8 — корпус прибора; 9 — рукоять; 10 — уровень; 11 — регулятор уровня; 12 — пусковой рычаг; 13 — заводная головка; 14 — переключатель интервалов работы интегратора; 15 — часовой механизм интегратора; 16 — объектив для определения i ; 17 — матовое стекло и фильтры.

Наблюдения с секстанами ИМС и ГИМС. Подготовка секстана ИМС заключается в установке трубы и регулировке пузырька уровня головкой 11 (см. рис. 75), секстана ГИМС — в пуске умформера, подвеске секстана, запуске

и разгоне гироскопа. Для наблюдений секстан берут в обе руки, поворачивают в вертикаль светила, угломерным барабаном устанавливают высоту светила, вводят фиксатор и заводят часовой механизм.

Для измерения высоты секстаном ИМС изображение пузырька уровня в поле зрения трубы (см. рис. 74) должно быть приведено путем наклона прибора в центр квадрата сетки и совмещено вращением угломерного барабана с изображением светила, после чего пускают интегратор и секундомер. При измерениях пузырек должен оставаться в пределах квадрата сетки, а изображение светила должно находиться во время наблюдений в центре пузырька — это называется длительным совмещением. Это достаточно трудно, и для получения надежных результатов требуется твердое усвоение приемов работы (по инструкции) и тренировка.

В поле зрения секстана ГИМС (см. рис. 74) горизонтальные полосы (биссекторы) указывают положение гироскопического горизонта: внешние полосы предназначены для измерения изображения Солнца, внутренние — звезды.

Полосы нанесены на пластине p наверху гироскопа G и удаляются в бесконечность колиматорной линзой K' ; эта система вращается вместе с ротором (см. рис. 74).

Правильное положение секстана ГИМС относительно гироскопического горизонта устанавливается по уголкам, нанесенным на неподвижной линзе. На рис. 74 показано правильное положение уголков и Солнца, которое должно выдерживаться все время наблюдений. Полный отсчет измеренной высоты получается как сумма четырех отсчетов, например:

Шкала десятков градусов	10°
Отсчет фиксатора на угломерном барабане	6
Градусная шкала интегратора	3
Минутный барабан интегратора	53'
$\alpha = 19^\circ 53'$	

При пуске интегратора (см. рис. 75, рычаг 12) замечают T_{xp}^n и момент середины наблюдений получают по формуле

$$T_{xp} = T_{xp}^n + \frac{\Delta T}{2}.$$

где ΔT — период работы интегратора (40, 120, 200 с); период устанавливается переключателем 14 (см. рис. 75) в зависи-

мости от условий: чем хуже условия, тем больше период осреднения. Точность измерения высот в среднем $\pm 2,5'$.

Глава 11. НАБЛЮДЕНИЯ С НАВИГАЦИОННЫМ СЕКСТАНом

§ 45. ВЫВЕРКА НАВИГАЦИОННОГО СЕКСТАНА НА СУДНЕ

При работе с секстаном его труба и зеркала должны занимать правильное положение, т. е. визирная ось трубы должна быть параллельна плоскости лимба, а плоскости зеркал — ей перпендикулярны. В процессе работы эти положения могут быть нарушены, вследствие чего в отсчетах секстана появятся ошибки. Рассмотрим действие этих ошибок и выверку секстана.

Непараллельность визирной оси трубы плоскости лимба. Аналитическое исследование погрешности в угле от наклона оси трубы показывает, что отсчет измеряемого угла будет больше действительного, а погрешность зависит от величины измеряемого угла. Величины их при небольших углах наклона (до $10'$) не превышают $0,1'$, и ими можно пренебречь. Если же угол наклона оси трубы будет порядка 1° , то они могут достигнуть $1,5-3'$. Поэтому перед наблюдениями следует периодически проверять параллельность оси трубы и устранять замеченный наклон. Этой выверке подвергаются трубы, имеющие сетку нитей, т. е. дневная труба секстана СНО-Т, труба секстана СНО-М и др.

Выверка положения трубы. Для выполнения выверки трубы отыскивают удаленный не менее чем на 50 м предмет, на который направляют трубу, причем секстан и избранный предмет должны иметь общее жесткое основание, например при наблюдениях на судне предмет также должен быть на судне (детали мачт, кранов и т. п.); при наблюдениях на стоянке, если предмет на берегу, то и секстан надо вынести на берег. Секстан с отфокусированной трубой устанавливают на устойчивое основание и на края лимба ставят два диоптра¹ а и б (рис. 76) так, чтобы пря-

мая, проходящая через их верхние срезы, была параллельна визирной оси трубы. Глаз направляют на диоптры и секстан поворачивают так, чтобы какая-либо горизонтальная линия $С_1$ намеченного предмета пришла на створ верхних срезов диоптров (положение глаза Γ_1 на рис. 76), затем глаз переводят к трубе (положение Γ_2). Если горизонтальная линия предмета видна в середине квадрата нитей трубы, то визирная ось трубы параллельна плоскости лимба. В противном случае следует исправить установку трубы, действуя на кольцо ее стойки верхним в и нижним винтом. Ослабляя один винт и настолько же поджимая другой, изображение замеченного предмета можно привести в середину квадрата нитей. Остаточная непараллельность будет не больше $5'$ и при условии совмещения изображений предметов в середине квадрата ошибки в углах практически не вызовут. При отсутствии диоптров линию на предмет можно располагать в плоскости самого лимба.

Для проверки трубы секстана можно применить другой метод, пригодный в морских условиях. После выверки обоих зеркал установить две нити трубы параллельно лимбу, найти две звезды с угловым расстоянием около 90° и совместить их изображения с нижней нитью. Наклоном секстана перевести их изображения на верхнюю нить; если

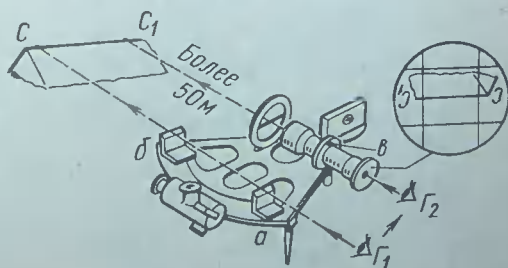


Рис. 76

¹ Диоптрами называют одинаковые по размерам угольники, предназначенные для проверки секстана и входящие в его комплект.

изображения не разошлись, то визирная ось трубы параллельна плоскости лимба.

Неперпендикулярность большого (подвижного) зеркала плоскости лимба. При нарушении перпендикулярности большого зеркала луч, отраженный от его поверхности, выходит из плоскости параллельной плоскости лимба, что заставляет наблюдателя для совмещения предметов выводить лимб из плоскости измеряемого угла, и в отсчете появляется погрешность.

Исследование влияния наклона зеркала показывает, что ошибка в отсчете увеличивается с уменьшением измеряемого угла, и при угле 0° изображения не совмещаются, т. е. при передвижении алидады около нуля прямовидное и отраженное изображения будут проходить одно мимо другого.

Выверка перпендикулярности большого зеркала плоскости лимба производится в следующем порядке: снять с секстана трубу, поставить его горизонтально, установить алидаду на отсчет около 40° и откинуть светофильтры большого зеркала. Повернуть секстан большим зеркалом к себе (рис. 77, а), поставить диоптры около отсчетов 0 и 130° и смотреть мимо внутреннего края большого зеркала на диоптр 1, стоящий около 0° ; диоптр 2 двигать по лимбу, пока отражение его не будет видно в большом зеркале. Верхние срезы прямовидного и отраженного диоптров должны совпадать без излома (рис. 77, б). Наличие излома (рис. 77, в) показывает, что большое зеркало не перпендикулярно плоскости лимба. Исправление его поло-

жения производят поворотом регулировочного винта 3 вверх большого зеркала с помощью ключа 4 до совпадения верхних срезов диоптров. С помощью диоптров большое зеркало можно установить с точностью $\pm 0,6'$ (предельная ошибка $\pm 2'$), при которой ошибки в угле меньше $0,1'$.

При отсутствии диоптров или бегой проверке большого зеркала совмещают внутренний край лимба около 0° с отражением его около 130° в зеркале, причем проверку производят непосредственно на руках. Точность определения наклона зеркала этим приемом ниже (около $\pm 1'$). Его следует рассматривать как приближенный прием.

Неперпендикулярность малого (неподвижного) зеркала плоскости лимба. Исследование этой погрешности показывает, что наклон малого зеркала вызывает ошибку в угле приблизительно того же порядка, что и для большого зеркала, за исключением больших углов, при которых ошибка меняет знак. При угле 0° эта ошибка равна ∞ , что указывает на невозможность совмещения прямовидного и отраженного изображения при определении поправки индекса по удаленному предмету.

Выверка перпендикулярности малого зеркала производится после того, как уже проверена установка трубы и большого зеркала.

Для выверки малого зеркала выбирают отдельный и резко ограниченный предмет: ночью — неяркую звезду на небольшой высоте; днем — Солнце или отдаленный предмет. Далее рассмотрим выверку по Солнцу. Накинув перед обоими зеркалами светофильтры (лучше разного цвета) и установив алидаду на отсчете около 0° , наводят трубу на Солнце. В поле зрения будут видны два его изображения: прямовидное S и дважды отраженное S_1 (рис. 78, а). Если при небольшом перемещении алидады изображение S_1 точно перекрывает S , сливаясь с ним (SS_1 на рис. 78, а), то зеркала параллельны, следовательно, малое зеркало установлено правильно. Если же изображения Солнца неточно перекрывают друг друга (S_1 и S на рис. 78, б) или проходят совсем в стороне друг от друга (S_2 и S), то малое

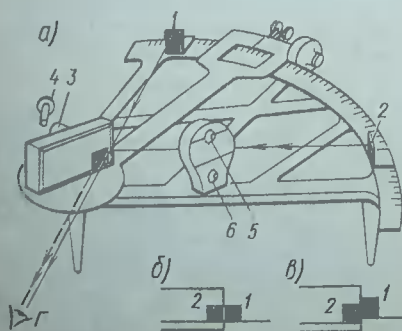


Рис. 77

зеркало не перпендикулярно плоскости лимба, причем чем больше наклон его, тем дальше отходит отраженное изображение и может даже выйти из поля зрения.

Для исправления неперпендикулярности малого зеркала располагают оба изображения в ближайшем положении (S_1S , S_2S на рис. 78, б) и, поворачивая с помощью ключа верхний регулировочный винт 5 малого зеркала (см. рис. 77), изменяют наклон последнего до совмещения изображений. При этом отраженное изображение S_1 может перейти в положение выше или ниже прямовидного, и поправка индекса изменится. Поэтому после правильной установки малого зеркала надо заново определить поправку индекса. Выверка малого зеркала производится с точностью до $\pm 0,8'$.

После выверки и тщательной уста-

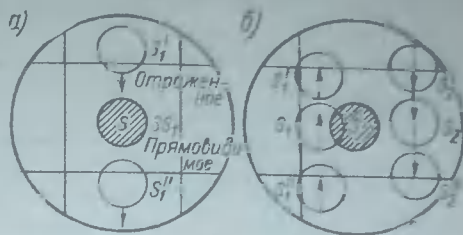


Рис. 78

новки зеркал и трубы остаточные ошибки в отсчетах будут меньше $0,1'$, и ими можно пренебречь.

Выверка установки трубы производится периодически во время стоянок в порту или на рейде; большого и малого зеркала — перед каждым наблюдением, особенно если они производятся редко.

§ 46. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ИНДЕКСА СЕКСТАНА И ЕЕ УМЕНЬШЕНИЕ

Величина i изменяется при изменении условий наблюдений: от температуры, легких толчков по раме и расстояния до прямовидного предмета. Поэтому надо принять за правило определять поправку индекса при каждом наблюдении как среднюю из трех наблюдений (или наведений).

Определение поправки индекса по звезде. При сумеречных и ночных наблюдениях поправка индекса определяется по звезде. Для этого выбирается яркая звезда, расположенная невысоко — 20 — $30'$ над горизонтом, так как яркие звезды дают расплывчатые изображения в трубе секстана. Секстан приготавливается к ночным наблюдениям, алидада устанавливается около $0'$ и труба направляется на звезду. В поле зрения ее будут видны два изображения звезды: прямовидное и дважды отраженное (C и C_2 , рис. 79, а). Совместив их в центре поля зрения вращением барабана в сторону увеличения отсчетов, получим отсчет поправки индекса oi , после чего по формуле (134) получим

$$i = 360^\circ - oi.$$

Совмещение изображений особенно удобно делать при очень малой остаточной неперпендикулярности малого

зеркала, когда изображения звезды проходят рядом, почти сливаясь друг с другом. При определении i по звезде контроль наблюдений отсутствует.

Пример 41. При совмещении изображений звезды снят отсчет $oi = 359^\circ 57,8'$. Определить i .

Решение.

$$i = 360^\circ - oi = +2,2'.$$

Определение поправки индекса по горизонту или предмету. Если расстояние до прямовидного предмета меньше 1 мили, то поправка индекса определяется по прямовидному предмету. При определении i по горизонту в поле зрения трубы совмещают дважды отраженное и прямовидное его изображения

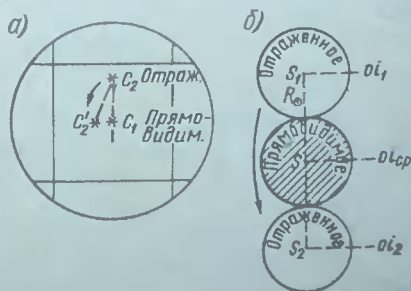


Рис. 79

и производят отсчет oi . При определении i по предмету на нем выбирается резкая черта, причем если она вертикальная, то секстан держат горизонтально, и наоборот. Отсчет секстана при совмещении прямовидимого и дважды отраженного изображений предмета дает oi , после чего i получают по формуле (134). По горизонту поправка индекса определяется менее точно, чем по звезде.

Определение поправки индекса днем по Солнцу. Изображения Солнца, наблюдаемые в трубу, представляют собой диски довольно большого диаметра, и совместить их центры, как то требуется для определения i , нельзя достаточно точно. Поэтому при определении i по Солнцу совмещают последовательно края изображений его диска в следующем порядке:

алидаду секстана, приготовленного к дневным наблюдениям, с наброшенными перед обоими зеркалами светофильтрами разного цвета, устанавливают около 0° ;

наводят трубу на Солнце и вращением отсчетного барабана приводят дважды отраженное изображение в соприкосновение с прямовидимым сначала одним краем (S_1 , рис. 79, б), затем, переводя S_1 через S , — другим краем (S_2). При каждом совмещении производится отсчет: соответственно oi_1 и oi_2 . Очевидно, что средний отсчет $(oi_1 + oi_2):2 = oi_{cp}$ соответствует отсчету при совмещении центров изображений S_1 и S , т. е. представляет отсчет поправки индекса i . Вычитая этот отсчет из $360^\circ (0^\circ)$, получим поправку индекса

$$i = 360^\circ - \frac{oi_1 + oi_2}{2} = 360^\circ - oi_{cp}. \quad (139)$$

Знак поправки получается из этой же формулы. При совмещении изображений вращение отсчетного барабана следует производить в обоих случаях в одну сторону — к увеличению отсчетов.

При определении i по Солнцу возможен контроль наблюдений. Действительно, из рис. 79, б видно, что разность отсчетов $oi_2 - oi_1$ равна $4R_0$. Величина R_0 (в среднем $16.0'$) выбирается из МАЕ. При сравнении разности отсчетов $oi_2 - oi_1$ с $4R_0$ допустимы расхождения не больше $\pm 0.4'$, что служит

контролем правильности наблюдений; если расхождения больше, то наблюдения повторяются. Для начинающих такой контроль служит хорошей проверкой умения совмещать изображения.

Примечание. Подобный контроль справедлив при высотах Солнца, больших $15-17^\circ$; при меньших высотах наблюдения следует производить при горизонтальном совмещении изображений Солнца, т. е. при горизонтальном положении секстана, чтобы исключить действие рефракции.

Пример 42. $5.05.85$ г. $oi_1 = 359^\circ 32.4'$, $oi_2 = 360^\circ 35.8'$. Определить i с контролем.

Решение.

1. Контроль: $oi_2 - oi_1 = 63.4'$, R_0 (из МАЕ) = $15.9'$; $4R = 63.6'$; наблюдения хорошие.

$$2. oi_{cp} = \frac{359^\circ 32.4' + 360^\circ 35.8'}{2} = 360^\circ 04.1';$$

$$i = 360^\circ - 360^\circ 04.1' = -4.1'$$

Для облегчения расчета i по Солнцу существует практическое правило: находим в каждом отсчете избыток сверх $30'$ или дополнение до $30'$, причем избытку сверх $30'$ приписывается знак «—», недостатку «+». Полусумма этих величин дает i с ее знаком. Так, для примера 42 имеем:

$$i = \frac{-2.4' - 5.8'}{2} = \frac{-8.2'}{2} = -4.1'.$$

Существует и другое (зарубежное) правило: дополнения до и сверх 360° сложить и разделить пополам, например:

$$i = \frac{1}{2} (+27.6' - 35.8') = -4.1'.$$

Определение i по Солнцу производится более точно, чем другими способами (до $\pm 0.1'$).

Уменьшение поправки индекса. Поправку индекса (точнее, i_0 см. § 41) практически удобнее иметь малой; если поправка превышает $3'$, ее следует уменьшить.

Уменьшение поправки индекса производится поворотом малого зеркала в положение, параллельное большому при совпадении индекса алидады с нуль-пунктом делений лимба. Для этого после выверки перпендикулярности обоих зеркал следует установить алидаду точно на 0° , а барабан — на $0.0'$ и навести трубу на звезду. Солнце или удаленный предмет. В поле зрения будут видны

два изображения — прямовидное C_1 и и дважды отраженное C_2 , не совпадающие по вертикали (см. рис. 79, а). Поворачивая ключом боковой винт 6 (см. рис. 77) малого зеркала, следует привести эти изображения в совпадение, или, точнее, на одну горизонталь ($C_2 - C_1$ на рис. 79, а). При этом может появиться неперпендикулярность малого зеркала ($C_2 - C_1$). Поэтому после уменьшения поправки индекса обязательно надлежит устранить неперпендикулярность

малого зеркала (винтом 5), после чего определить новое значение поправки индекса. Стремиться уменьшить i до нуля не следует, так как излишние повороты могут привести к ослаблению винтов малого зеркала.

У секстана СНО-Т уменьшить поправку i можно также, сдвигая до нуля шкалу отсчетного барабана (ослабив ее предварительно торцовым ключом), однако это вызывает неудобства с отсчетом градусов.

§ 47. ПРИЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ СВЕТИЛ НАД ВИДИМЫМ ГОРИЗОНТОМ. ОСОБЫЕ ПРИЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Измеренной, или наблюдаемой, высотой h' называется вертикальный угол между направлениями на центр (или край) светила и видимый горизонт, с учетом поправок s и i секстана, т. е.

$$h' = \omega + i + s, \quad (140)$$

где ω — отсчет секстана, полученный в результате измерения высоты.

Измерение высоты разделяется на три операции: приведение изображения светила к горизонту в поле зрения трубы; отыскание вертикала светила и расположение в нем секстана; точное совмещение изображений. Две последние операции выполняются совместно.

Приведение изображения светила к горизонту. Эта предварительная операция выполняется несколькими приемами в зависимости от условий.

Прием «установки приближенной высоты». Если наблюдения запланированы и с помощью глобуса, таблиц НО-249 или расчетом получены высоты и азимуты светил, то отыскание данного светила в поле зрения выполняют следующим путем:

установив на секстане приближенную высоту светила и отыскав по компасу азимут светила, следует направить трубу в найденную точку горизонта;

покачивая секстан и слегка вращая барабан, найти изображение звезды или планеты и горизонта.

Этот прием незаменим при отыскании звезд в ранние сумерки, когда они простым глазом еще не видны, а также для отыскания днем Венеры и Луны (в фазе малого серпа). Применяется этот

прием и при наблюдении секстанами с искусственным горизонтом; удобен он и при наблюдениях Солнца. В настоящее время этот прием является основным.

Прием «разведения» изображений от нуля. Установив алидаду секстана на 0° , наводят зрительную трубу на светило и находят его прямовидное и дважды отраженное изображения. Освободив алидаду, двигают ее к увеличению отсчетов, одновременно опуская трубу к горизонту. При этом прямое изображение светила исчезает, а отраженное должно оставаться в поле зрения. Движение продолжают, пока в поле зрения с отраженным светилom не появится горизонт: при этом алидаду stopят. Для Солнца движение продолжается до горизонтального положения трубы; при этом прямовидные фильтры, закрывающие горизонт, убирают. Этот прием чаще применяют при наблюдениях с трубой большого увеличения и малого поля зрения, особенно при наблюдении слабых звезд. Применяется он также при наблюдениях, выполненных экспромтом, по неопознанным светилам. Вариантом этого приема является подведение горизонта к звезде при переворотом секстане.

Прием «поиска». Направив трубу секстана в точку горизонта под светилom, двигать алидаду от себя, одновременно покачивая секстан и перемещая трубу по горизонту, пока не покажется изображение светила. Этот прием можно применять при наблюдениях ярких светил слабой трубой с большим полем зрения. Обычно он применяется при незаплани-

ропанных наблюдениях Солнца, причем для ускорения его есть следующие приемы:

перед большим зеркалом набрасывают слабый фильтр, пока в поле зрения не покажется «зарев», тогда фильтр заменяют на обычный;

мимо трубы наблюдают светофильтр большого зеркала, пока на нем не появится солнечный «зайчик».

Отыскание вертикала и совмещение изображений. В этих двух операциях, выполняемых одновременно, наиболее трудной является отыскание правильного — вертикального положения секстана.

На рис. 80 высота h_1 , измеренная вне вертикала, больше действительной h' . В элементарном сферическом ΔSLL_1 разность Δh гипотенузы h'_1 и катета h' определится по формуле (7) приложения 1.3, которая приводится к углу отклонения от отвеса j :

$$\Delta h = \frac{j^2}{4} \arcsin 1' \sin 2h' = \frac{i^2}{2} \arcsin 1' \operatorname{tg} h', \quad (141)$$

где из $\Delta zSDj \cong \frac{i}{\cos h'}$:

Формула показывает, что ошибка от наклона секстана из вертикала светила возрастает с высотой; так, при угле наклона $i = 1'$ и $h = 73^\circ$ $\Delta h = 1.7'$. По-

добные ошибки — частое явление у нетренированных штурманов.

Правильное положение секстана устанавливается покачиванием, при котором светило описывает в поле зрения дугу aa' (см. рис. 80). К горизонту проводится ближайшая точка L дуги; она и указывает, что секстан находится в вертикале светила. Если отсчет на секстане больше высоты, то дуга проходит «по воде» (изображение S_1), если отсчет меньше — «по небу» (S_2).

Покачивание секстана. Притягивание светила движением по дуге может производиться тремя способами: покачиванием секстана вокруг отвесной линии Oz ; вокруг оси трубы OL и вокруг луча OS , падающего на большое зеркало.

1. Покачивание вокруг отвесной линии Oz осуществляется движением трубы секстана по азимуту на небольшие углы, удерживая ламб секстана в вертикальной плоскости, т. е. поворотом корпуса наблюдателя вокруг отвесной линии. Изображение светила при этом будет описывать в поле зрения параболу, точка касания которой с горизонтом находится как раз в вертикале светила. Этот прием применяется при измерении высот «через зенит».

2. Покачивание секстана вокруг оси OL трубы является одним из наиболее

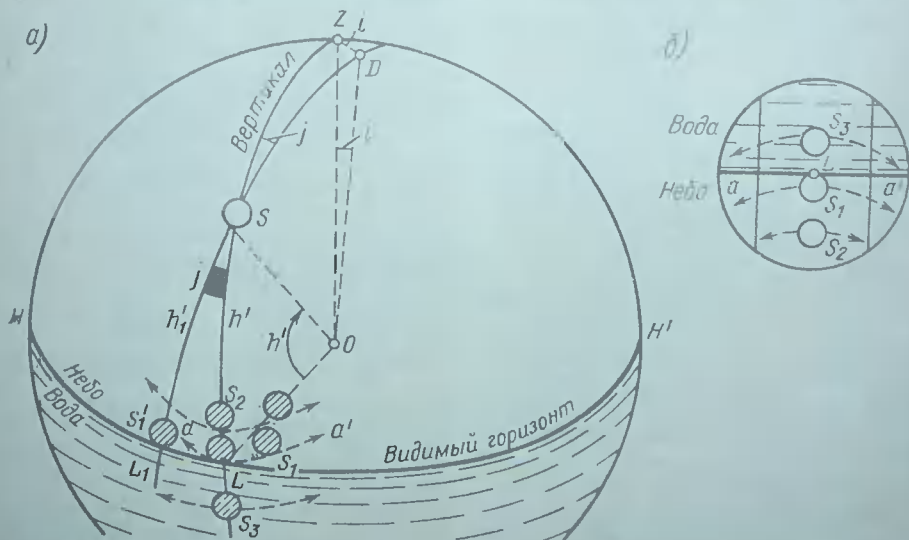


Рис. 80

давно применяемых методов и выполняются движением секстана около оси трубы с одновременным малым перемещением трубы по горизонту около вертикала светила для того, чтобы совмещение изображений светила и горизонта произошло в середине поля зрения трубы. При этом, как показывает исследование, дважды отраженное изображение светила описывает в поле зрения трубы также параболу, но с большей кривизной, чем в первом приеме. При небольших поворотах секстана изображение быстро отходит от горизонта, поэтому второй прием является наиболее точным. Однако он более труден в исполнении и требует тренировки, так как при повороте секстана отраженное изображение светила легко выходит из поля зрения и «теряется».

3. Покачивание секстана вокруг луча, падающего на большое зеркало, выполняется вращением секстана вокруг направления на светило, причем труба его движется вправо и влево по азимуту, т. е. секстан движется по кругу с радиусом, равным h' , и центром в светиле. При этом изображение светила будет находиться все время в середине поля зрения трубы, а горизонта — «отходить». Это выполняется наклонами наблюдателя в поясе вправо и влево, прием наиболее прост в исполнении, но точность его ниже, чем второго.

Наиболее распространен и точен второй прием — покачивание секстана около оси трубы с движением по горизонту, который и рекомендуется применять.

Измерение высоты края светила. При измерении высот Солнца обычно измеряют высоту нижнего края (S_1 на рис. 81, а), так как на фоне неба касание видно лучше. При измерении высоты верхнего края (S_2 на рис. 81, а) Солнце погружается «в воду». У Луны измеряются высоты и верхнего, и нижнего краев.

Приемы совмещения изображений. Для точного сведения изображений края или центра светила и горизонта, которое производится одновременно с покачиванием секстана, можно применить два приема:

непосредственное сведение изображений вращением микрометрического

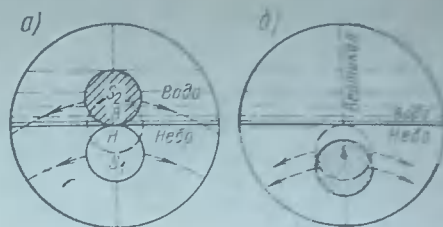


Рис. 81

винта, как при измерении углов (см. рис. 81, а);

на заранее установленных отсчетах с последующим ожиданием касания изображений (см. рис. 81, б).

Второй из этих приемов точнее и применяется при измерении высот «вне меридиана», обычно Солнца; для этого предварительно определяют интервал перестановки — 5' или 10' (см. пример 44).

После освоения всех рассмотренных приемов для правильного измерения высоты требуется тренировка.

Измерение высот «через зенит». Измерение высот светил через зенит представляет собой прием измерения вертикального угла — в обратном азимуте. В настоящее время рекомендуется измерять этим приемом высоты Солнца и других ярких светил в дополнение к обычным измерениям с целью исключения систематических ошибок в полученной паре линий. Кроме того, в противозимуте Солнца горизонт четче и точность измерения высот выше.

Через зенит измеряется дуга SzS_1 (рис. 82), которая и называется высотой, измеренной через зенит; приблизительно она равна $180^\circ - h'$. Теоретически через зенит нашим секстаном можно измерять высоты от 40° ($180^\circ - 140^\circ$), но практически только высоты от $45^\circ - 50^\circ$ измеряют-

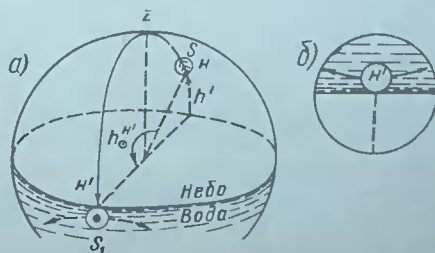


Рис. 82

ся достаточно хорошо. Как правило, через зенит следует измерять высоту обычного нижнего края (n). Через зенит этот край n' является верхним (рис. 82, б). При этом изображение Солнца опускается «в воду», и при покачивании легче удерживать вертикаль светила.

Измерение через зенит выполняют следующим образом: измерив высоту h' обычным путем, образовать разность $180 - h'$, поставить ее на секстане; повернуться в обратный азимут (по тени или по компасу) и, осторожно двигая трубой по горизонту и покачивая секстан, отыскать изображение светила и горизонт; вращением барабана совместить эти изображения. После этого покачиванием секстана вокруг отвесной линии отыскать положение вертикаля и, уже покачивая около этого места, свети изображения и зафиксировать момент. Измерение через зенит несколько труднее обычного, поэтому следует предварительно научиться правильным движениям и потренироваться.

При высотах Солнца, больших 60° , измерения через зенит в дополнение к обычным надо применять обязательно. Очень полезны они и в сумерки, когда видны (в трубу секстана) только две яркие звезды на большой высоте; по ним можно получить четыре линии.

Измерение высот светил над береговой чертой. Днем или в сумерки высоты Солнца, Луны, яркой планеты или звезды, если горизонт под ними закрыт берегом, могут измеряться над береговой чертой (точнее, над урезом воды). В некоторых случаях роль береговой черты может играть ватерлиния другого судна, расположенного в вертикале светила. Следует иметь в виду, что при этих наблюдениях расстояние до береговой черты или вспомогательного судна выгоднее выбирать большим, а высоту глаза наблюдателя — меньшей. При отсутствии качки расстояние не должно быть меньше 1 мили при высоте глаза 10 м и 0,5 мили при высоте глаза 5 м; при качке же это расстояние не должно быть менее 1,5 — 2 миль. Ограничения вызваны неточностью исправления этих высот. Измерения высот в этом случае производят совершенно так же, как и над видимым горизонтом, но после наблюдений определяют расстояние от береговой черты с помощью локуатора, дальномера или по вертикальному углу. Поправка индекса определяется обязательно по береговой черте. Сказанное не относится к случаю, когда берег расположен за видимым горизонтом; при этом наблюдения выполняются как над обычным видимым горизонтом.

§ 48. ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ ВЫСОТ. ЧИСЛО НАБЛЮДЕНИЙ, ИХ КОНТРОЛЬ И ОСРЕДНЕНИЕ

Приготовление к наблюдениям. Заключается в выборе места и приготовлении секстана и секундомера. Место наблюдений на ходовом или верхнем мостике должно быть защищено от резкого ветра и с меньшей вибрацией. При сильном волнении лучше наблюдать с верхнего мостика, при плохой видимости горизонта (туман и др.) — с нижней палубы. При качке место лучше выбрать ближе к диаметральной плоскости судна.

У секстана перед наблюдением протирается оптика, выверяются зеркала, определяется i ; перед наблюдением Солнца подбираются фильтры, перед ночными наблюдениями засвечивается лупа-осветитель 9 (см. рис. 72). Секундомер, лучше двухстрелочный, проверяют по хронометру.

Организация наблюдений. Обычно на морском флоте вахтенный помощник работает один, поэтому особое значение для качества и быстроты наблюдений имеет правильная их организация. Следует иметь записную книжку штурмана (ЗКШ), где вписаны подобранные светила, их h и A , и эскиз их расположения. Секундомер подвешивают на шнуре, готовят компас, ночью — фонарик. Все наблюдения и записи производят, не сходя с места, чаще «на руках». Место меняют только для наблюдения светил, не видных с него, например две звезды с одного борта, две — с другого. Это позволяет измерять высоты с регистрацией момента и записью через 35—50° одному наблюдателю. Если есть возможность привлечь помощника, на-

пример матроса, для регистрации моментов и записей, то скорость наблюдений повышается до 20—25%, улучшается их качество, так как наблюдатель не отвлекается от основной задачи — измерения высот.

«Астрономическая бригада». Если есть возможность составить «астрономическую бригаду», например, из старшего и четвертого помощников, то наблюдения можно организовать двумя способами.

Первый способ применяется для получения наиболее надежного места. Один наблюдатель измеряет высоты, другой — регистрирует моменты и ведет записи, затем они меняются. Каждый наблюдает со своими инструментами; второй секундомер пускают по другим часам. Обработка выполняется отдельно, а осервованные места осредняют.

Второй способ используется для быстройшего получения места. Предварительно осваивают ускоренные приемы определения места (см. § 81, 82). При наблюдении звездными приемами первый наблюдатель измеряет высоты (по одной высоте пяти звезд), второй — регистрирует моменты и обрабатывает наблюдения на карте или планшете; здесь наблюдения и обработка их совмещены. При некоторой тренировке к концу наблюдений, занимающих 10—15", место уже нанесено на карту.

Выполнение наблюдений. В намеченный момент $T_{\text{хр}}$ запускают секундомер, наблюдатель выходит на намеченное место, устанавливает на секстане подобранную высоту светила, по компасу или курсовому углу направляет секстан и, непрерывно покачивая его, вторым приемом (см. § 47) совмещает изображения; при касании изображений регистрируют момент по второй стрелке секундомера (по однострелочному — счетом секунд) и по схеме (пример 43) записывают результат: $ос$ до $0,1'$, моменты $T_{\text{хр}}$ или $T_{\text{скм}}$ до $0,5^c$. Так же измеряются вторая и третья высоты, после чего наблюдают следующее светило. Навигационная информация: T_c ; $ол$; φ_c ; λ_c ; $ПУ$, V ; e — фиксируется при пуске секундомера или в конце наблюдений. После конца наблюдений секундомер останавливают в $T_{\text{хр}}'$ и проверяют момент его пуска:

$$T_{\text{хр}}' - T_{\text{скм}} = T_{\text{хр}}''.$$

Если этот момент отличается от момента пуска $T_{\text{хр}}''$ на ΔT^c , то в моменты наблюдений $T_{\text{скм}}^i$ вводится поправка, получаемая по формуле

$$\Delta T_{\text{скм}} = \frac{\Delta T^c}{T_{\text{скм}}} T_{\text{скм}}^i$$

Для гарантии от промаха в $T_{\text{хр}}$ останков секундомера лучше сделать по второму хронометру и с учетом его поправки сравнить $T_{\text{хр}}''$.

Измерения высот светил днем и ночью имеют особенности, отмеченные ниже при определении места по соответствующему светилу.

О числе наблюдений, их контроле и осреднении. Из теории ошибок вытекает, что действие случайных ошибок уменьшается при увеличении числа наблюдений. При пяти наблюдениях ошибка в среднем из них уменьшается в два раза, при девяти — в три. Кроме того, появляется возможность исключить промахи. Отсюда следует, что надо измерять несколько высот. Однако в обычной практике большие серии высот невыполнимы, да практически и не нужны. На основании опыта рекомендуется измерять обычно по три высоты светила: при одновременных наблюдениях Солнца — пять. Три высоты дают возможность приближенного контроля на промах (это главное), из них легко вывести среднее, что трудно при большом числе измерений.

Об осреднении наблюдений. При измерениях серий из нескольких высот и моментов вычисления можно вести по каждому измерению или обрабатывая средние арифметические из $ос$ и $T_{\text{хр}}$. Второй прием проще, кроме того, при осреднении можно выявить промах, почему этот прием и рекомендуется.

Для применения осреднения требуется выяснить теоретическую допустимость вывода среднего арифметического из изменяющихся $ос$ и $T_{\text{хр}}$ или, конкретнее, — соответствует ли средний $ос_{\text{ср}}$ осредненному $T_{\text{ср}}$ и при каких условиях? Из формулы (46) видно, что приращения высоты содержат ускорения, которые при осреднении исказят результат, так как меняются не пропорционально T . Суммируя ряд приращений через интервалы 30^c после преобразования¹ для самого неблагоприятного случая пяти высот около меридиана получим формулу ошибки $\Delta h'$ в среднем:

$$\Delta h' = \frac{0,0163}{\text{tg } \varphi - \text{tg } \delta}.$$

¹Вывод формулы приведен в «Курсе кораблеводства», т. II, § 44.

Исследуя эту формулу, выясняем, что осреднение пяти $ос$ в морских условиях допустимо при любых азимутах, и только при близмеридиональных высотах, больших 85° , возможны ошибки $\Delta h \geq 0,2'$.

Вывод среднего и предварительный контроль производятся по разностям ΔT и $\Delta ос$: из данного наблюдения вычесть второе и т. д. (см. пример 43). Расчет среднего производится сложением разностей и делением их на три; результат придается ко второму (среднему) наблюдению.

Контроль на промахах осуществляется так: большему ΔT должна соответствовать и большая $\Delta ос$; небольшие отклонения показывают неточность измерения, большие — на промахах. Более точно разности можно сравнить с теоретическим Δh из табл. 17 МТ — 75.

Пример 43. 23.09.85 г. в $\varphi_0 = 37^\circ 30' N$; $\lambda_0 = 9^\circ 22' E$; ИК = 315° ; $V = 15$ уз, наблюдали в сумерки звезду Арктур; $A = 271^\circ$. Проконтролировать наблюдения и получить среднее арифметическое.

Решение

ΔT	$T_{срм}$	$ос$	$\Delta ос$
-45°	10 ⁰⁴ °	31 ^{07,3'}	+8,3'
00	10 49	30 59,0	0,0
+36°	11 25	30 52,4	-6,6'
$\frac{-9^\circ}{3} = -3$	10 ⁴⁶ °	30 ^{59,6'}	$\frac{+1,7'}{3} \approx$ $\approx +0,6'$

Контроль на промахах показывает, большему $\Delta T = 45^\circ$ соответствует и большая разность $\Delta ос = +8,3'$, соответствуют и знаки, следовательно, промаха нет. Проверка по табл. 17 дает Δh , равные 8,9' и 7,1' — это в пределах точности измерений.

При измерении высот Солнца имеет смысл применить «сведение на заранее установленных отсчетах». При этом точность измерения повышается и резко упрощается контроль (ΔT должны быть равны) и вывод среднего из пяти; однако наблюдения эти более трудны.

Пример 44. 29.05.85 г. в $\varphi_0 = 55^\circ 51' N$, $\lambda_0 = 21^\circ 32' E$. $T_с = 18^\circ (+1)$ измерили высоту Солнца на заранее установленных отсчетах. Проконтролировать и вывести среднее.

Решение

ΔT	$T_{срм}$	$ос$
-78°	1 ¹⁵ °	22 ^{50,0'}
-40	1 53	45,0
00	2 33	40,0 (промахов нет)
+36	3 11	35,0
+75	3 46	30,0
$\frac{-5^\circ}{5} = -1^\circ$	2 ³² °	22 ^{40,0'}

Глава 12. ИСПРАВЛЕНИЕ ВЫСОТ СВЕТИЛ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ И ПОПРАВОК

§ 49. НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТ.

ПОПРАВКИ ВЫСОТ

ЗА АСТРОНОМИЧЕСКУЮ РЕФРАКЦИЮ, ПАРАЛЛАКС И ПОЛУДИАМЕТР

Необходимость исправления высот. Измерив в море высоту, предположим, края Солнца и исправив ее поправками $i + s$ данного секстана, получим так называемую измеренную высоту h' . Эта высота измерена над видимым горизонтом BB' (рис. 83), различным для каждого наблюдателя; относится h' к видимому направлению AF на край светила без учета влияния атмосферы (т.е. рефрак-

ции) и измерена с поверхности Земли (топоцентрическая высота). Применять высоту h' при решении задач нельзя, так как другие координаты, полученные из МАЕ, являющиеся истинными геоцентрическими, т.е. освобождены от влияния рефракции, приведены к центру Земли и центру светила. Поэтому измеренная высота должна быть предварительно приведена к истинной геоцент-

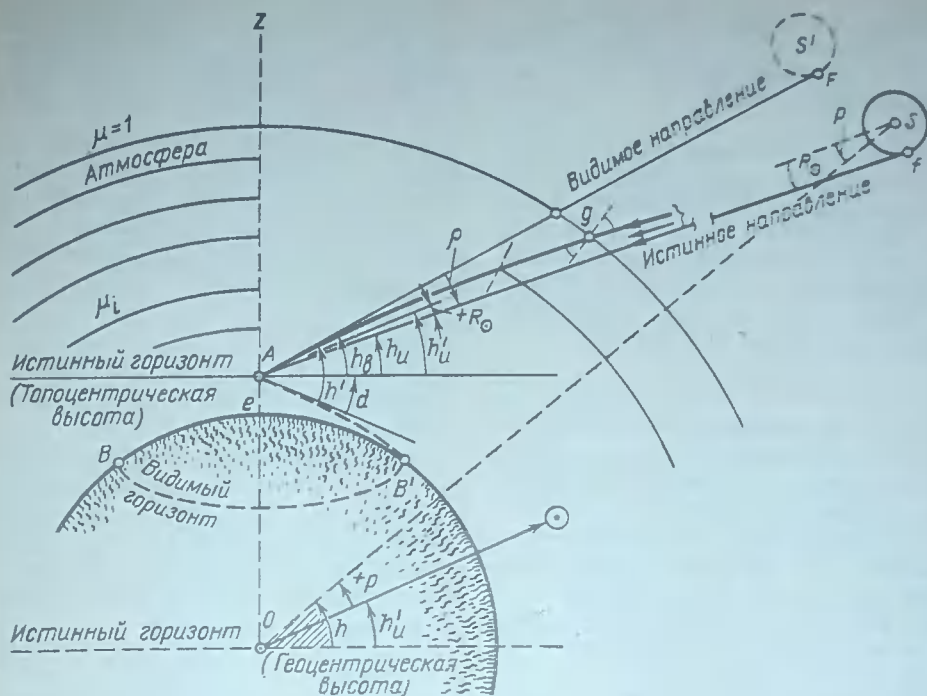


Рис. 83

рической добавлением теоретически вычисленных или измеренных поправок.

Исправлением высот называется переход (путем введения поправок) от измеренных высот h' к истинным геоцентрическим (или обсервованным) высотам h (h_0).

На рис. 83 показано исправление высоты h' нижнего края F Солнца S' , измеренной над видимым горизонтом BB' . Вычитая из измеренной высоты h' наклонение горизонта d , получим видимую высоту h_v ; вычитая из h_v угол ρ — астрономическую рефракцию, получим истинную топоцентрическую высоту $h_{и}$ нижнего края Солнца; прибавляя к $h_{и}$ видимый угловой радиус R , получим истинную высоту $h'_{и}$ центра Солнца. Наконец, для приведения к центру Земли к $h'_{и}$ надо прибавить p — суточный параллакс; получим истинную геоцентрическую или обсервованную высоту h , которая и применяется в вычислениях.

Поправка за астрономическую рефракцию обязательна для всех светил (другие поправки зависят от светила и

способа измерения). Например, для звезд не нужны поправки за полудиамер и суточный параллакс; при измерении в искусственный горизонт отсутствует поправка d за наклонение горизонта и т. п. Следовательно, исправление высот различно для разных светил и способов измерения, поэтому штурман должен хорошо представлять, какие поправки действуют в данном случае.

Атмосферная рефракция. Явление преломления лучей какой-либо средой называется *рефракцией*. Вследствие того что Земля покрыта атмосферой, луч f от края Солнца S (см. рис. 83) преломляется и описывает в атмосфере кривую fgA , приближаясь к отвесной линии zO . Точно так же луч от точки B' горизонта описывает в атмосфере кривую $B'A$. Явление преломления луча в земной атмосфере называется *атмосферной рефракцией*. Преломление луча от светила в земной атмосфере называется *астрономической рефракцией*, а преломление луча от удаленных земных предметов — *земной рефракцией*.

Поправка высоты за астрономическую рефракцию. Наблюдатель в точке A (см. рис. 83) видит край Солнца в направлении касательной AF к кривой луча Agf .

Астрономическая рефракция ρ равна вертикальному углу между истинным направлением Af на светило и видимым направлением AF на то же светило. Высота светила h_v для получения истинной высоты должна быть уменьшена на угол $\rho = \Delta h_\rho$, т. е. на величину поправки высоты за рефракцию:

$$h_{\text{и}} = h_v + (-\Delta h_\rho). \quad (142)$$

Вводя эту поправку, мы как бы лишаем Землю атмосферы.

Если считать атмосферу состоящей из концентрических слоев воздуха, каждый из которых имеет свой показатель преломления μ (от приземного μ_0 до предельного $\mu = 1$), то угол ρ зависит от величин μ и угла i падения луча на данный слой атмосферы. По дифференциальному уравнению рефракции в бесконечно малом слое можно получить полную рефракцию как интеграл вида

$$\rho'' \text{ arc } 1'' = \int_1^{\mu_0} \frac{d\mu}{\mu} \text{tg } i.$$

Известен ряд гипотез (Ньютона, Лапласа, Гюльдена и др.) о зависимости μ от оптической плотности воздуха, меняющейся с высотой слоя и в результате воздействия метеофакторов. Решая интеграл на основе какой-либо из этих гипотез, можно получить рефракцию в виде ряда

$$\rho'' = A \text{tg } z' - B \text{tg}^3 z' + C \text{tg}^5 z', \quad (143)$$

где z' — видимое зенитное расстояние.

По таким рядам, с конкретными значениями коэффициентов, вычисляются таблицы рефракции, а также составляются алгоритмы рефракции для ЭВМ. Первый член ряда дает приближенное значение рефракции по формуле

$$\rho'' = 60,2'' \frac{B}{760} \cdot \frac{273^\circ}{273^\circ + t^\circ} \text{tg } z'. \quad (144)$$

При средних значениях $t^\circ = +10^\circ$ и $B = 760$ мм получаем приближенную формулу *средней рефракции*

$$\rho'_0 = 0,97' \text{ctg } h'. \quad (145)$$

Из этой формулы, справедливой только для значений свыше $10'$, видно, что рефракция зависит от высоты светила: при $h = 90^\circ$ $\rho = 0$, но при $h = 0$ из таблицы $\rho = 34,5'$.

На практике применяют таблицы рефракции, составленные по ряду (143) в соответствии с принятой гипотезой. Так, в «Таблицах рефракции Пулковской обсерватории» издания 1956 г. начальный член ряда выражается формулой

$$\lg \rho_0 = \mu + \lg \text{tg } z'. \quad (146)$$

где μ выбирается из специальной табл. I. К этому члену добавляются поправки за температуру, давление и др.

По Пулковским таблицам рефракции для $t^\circ = +10^\circ$ и $B = 760$ мм вычислена табл. 9-а МТ-75 («Поправка высоты звезды или планеты за рефракцию»), дающая среднюю рефракцию ρ_0 по аргументу h_v . Эти же значения поправок за рефракцию введены в табл. 8 для Солнца и табл. 10 для Луны, но в сумме с другими поправками.

Поправки высоты за температуру и давление, представляющие поправки к средней рефракции за отклонения температуры и давления от принятых в таблицах, вычислены также по Пулковским таблицам. Эти поправки с их знаками приведены в табл. 14-а и 14-б МТ-75 для температур от -40 до $+40^\circ$, давлений от 720 до 790 мм и высот от 0 до $50'$. Аналогичные таблицы рефракции и ее поправок приведены на внутренней обложке табл. ВАС-58.

Следовательно, высоты светил исправляются тремя поправками за рефракцию: средней рефракцией Δh_ρ , за температуру Δh_t и за давление Δh_B по формуле

$$h_{\text{и}} = h_v + (-\Delta h_\rho) + \Delta h_t + \Delta h_B. \quad (147)$$

Поправка высоты за суточный параллакс. При наблюдении светила S' (рис. 84), расстояние D до которого сопоставимо с размерами Земли, направления на это светило из центра O Земли и от наблюдателя A , находящегося на ее поверхности, отличаются на угол ρ .

Угол ρ , под которым из центра светила виден радиус Земли данного наблюдателя, называется *суточным параллаксом*; точнее, параллакс ρ — это дуга

$C_0 C_2(1;3)$ небесной сферы между геоцентрическим местом светила C_0 , которое приводится в МАЕ, и местом светила $C_2(1;3)$, видимым с поверхности Земли. Из рис. 84 видно, что параллакс меняется с изменением высоты светила (C' , C''). Наибольшей величины, называемой горизонтальным параллаксом p_0 , суточный параллакс достигает, когда светило расположено на истинном горизонте наблюдателя (C' на рис. 84). Для наблюдателя, расположенного на экваторе, $R_3 = a$, поэтому горизонтальный параллакс будет наибольшим, он называется горизонтальным экваториальным параллаксом p_0 и приводится в МАЕ для Луны и планет. Суточный параллакс обнаруживается только у светил солнечной системы, так $p_{\odot} = 8,79''$, $p_{\oplus}$ — от 5 до $33''$; $p_{\text{Марс}}$ — от 4 до $24''$; $p_{\text{Юпитер}}$ — от $53,9'$ до $61,5'$.

Поправка за параллакс. Наблюдатель A (см. рис. 84), измерив высоту h' светила C'' , должен привести ее к направлению $AC_0 \parallel OC_0$, так как в МАЕ приводятся геоцентрические координаты места C_0 , и высота также должна быть геоцентрической (h). Для этого к высоте h' следует добавить p , т. е.

$$h = h' + p. \quad (148)$$

Из треугольника OAC'' по формуле синусов получим

$$\frac{R_3}{\sin p} = \frac{D}{\sin(h' + 90^\circ)},$$

откуда

$$\sin p = \frac{R_3}{D} \cos h'.$$

Но из прямоугольного треугольника OAC' имеем

$$\frac{R_3}{D} = \sin p_0.$$

Следовательно,

$$\sin p = \sin p_0 \cos h', \quad (149)$$

где p_0 — горизонтальный параллакс светила.

При малых величинах p (для планет) имеем

$$p = p_0 \cos h'. \quad (150)$$

По формуле (150) для планет составлена таблица 9-б МТ — 75 и таблица в ВАС — 58, куда входят с горизонтальным экваториальным параллаксом p_0

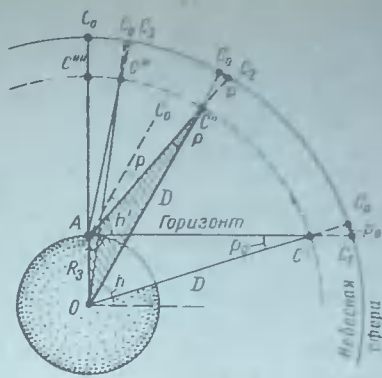


Рис. 84

из МАЕ, пренебрегая его малым изменением с широтой наблюдателя. По этой же формуле составлена поправка за p в табл. 8 МТ — 75 для Солнца.

Формула (149) применена для вычисления поправки за параллакс Луны в табл. ВАС — 58 и МТ — 63, причем входят в них также с горизонтальным экваториальным параллаксом и с h_0 .

При расчете поправки за $p_{\text{Л}}$ в табл. 10 МТ — 75 вместо R_3 принят радиус-вектор эллипсоида $p = a(1 - \alpha \sin^2 \varphi)$. Учитывая, что $\frac{a}{D} = \sin p_0$ и принимая вместо h' топоцентрическую высоту $h_{\text{тц}} = h_0 \pm R - p_0$, получим

$$\sin p = (1 - \alpha \sin^2 \varphi) \sin p_0 \cos h_{\text{тц}}. \quad (151)$$

По этой формуле для широты, равной средней широтного пояса, где возможна данная высота Луны, вычислены p для табл. 10 МТ — 75. Вывод этой формулы приведен в § 53 [9].

Видимый угловой полудиаметр (радиус) светила. Видимым условным полудиаметром (или радиусом) светила называется угол, под которым радиус светила виден с поверхности Земли (топоцентрический радиус R'). В ежегодниках же проводятся геоцентрические полудиаметры R (видимые из центра Земли O , рис. 85). Для Солнца разность $R' - R$ мала и в поправках не учитывается, для Луны же достигает $0,26'$ и введена в таблицы при исправлении высот. Угловые полудиаметры планет при исправлении высот не учитываются, так как рекомендуется измерять высоту центра диска, видимого как светлое пятно.

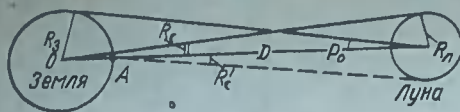


Рис. 85

При измерении высот Солнца и Луны с горизонтом совмещают край диска светила. Для получения высоты его центра необходимо к высоте нижнего края (h) прибавить угловой полудиаметр светила, а из высоты верхнего края (h) — вычесть, т. е.

$$h = h_{\text{в}}^{\text{н}} \pm R. \quad (152)$$

Угловой полудиаметр Солнца изменяется в течение года от $15,8'$ до $16,3'$ и приводится в МАЕ, в ВАС — 58, ТВА — 57 и МТ — 63 по датам. В МТ — 75 табл. 8 для Солнца составлены по датам, в них приводится общая поправка, включающая и полудиаметр.

Учет полудиаметра Луны. Угловой радиус светила и его параллакс за-

висят от расстояния D между Землей и светилом, поэтому радиус можно выразить через параллакс, что принято при исправлении высот Луны. Из рис. 85 видно, что

$$\sin R_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}}}{D} \text{ и } D = \frac{R_{\text{з}}}{\sin p_{\text{л}}},$$

откуда

$$\sin R_{\text{л}} = 0,2725 \sin p_{\text{л}}. \quad (153)$$

где $\frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{з}}} = 0,2725$ — отношение линейных радиусов Луны и Земли, величина постоянная.

Формула (153) применяется при составлении таблиц поправок Луны, чтобы получить один аргумент — $p_{\text{л}}$.

При составлении табл. 10 МТ — 75 R' вычислялся по формуле

$$R' = \frac{R}{1 - 2 \sin \frac{p}{2} \sin \left(h - \frac{p}{2} \right) \sec (h - p)}, \quad (153')$$

вывод которой приведен в § 53 [9]. Величина R берется из формулы (153), а $\sin p$ — из формулы (151).

§ 50. НАКЛОНЕНИЕ ВИДИМОГО ГОРИЗОНТА. НАКЛОНЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОГО ЛУЧА

Земная рефракция. Наблюдатели (рис. 86) A и B на Земле (высоты их над уровнем моря e_1 и e_2) удалены друг от друга на небольшое расстояние D . Луч, идущий от B к A , от преломления в атмосфере опишет кривую AaB , и наблюдатель A увидит точку B в направлении касательной AB' , т. е. точка B приподнята на угол r . Угол r между истин-

ным и видимым направлениями на удаленный земной предмет называется *земной рефракцией*.

Для наблюдателя B аналогично получим угол r' , отличающийся в общем случае от r . Однако в рассматриваемых задачах e_1 мало отличается от e_2 , поэтому практически $r = r'$; при этом кривая AaB принимается за окружность радиуса R_1 , а угол при O_1 равен $2r$. Выражая его в радианах, имеем

$$2r = \frac{\sim AB}{R_1}.$$

Для угла C между отвесными линиями AO и BO получим:

$$C = \frac{D}{R_3} \text{ или } D = CR_3.$$

Но по малости e расстояние D практически равно $\sim AB$, поэтому

$$2r = \frac{CR_3}{R_1} = \chi C$$

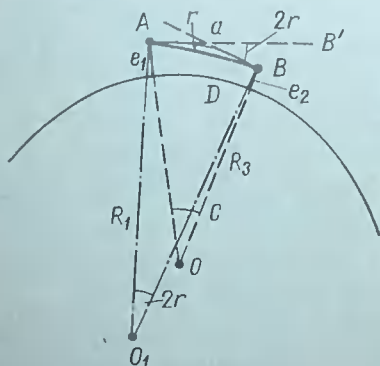


Рис. 86

или

$$r = \frac{1}{2} \chi R, \quad (154)$$

где $\chi = \frac{R_2}{R_1}$ — коэффициент земной рефракции, равный отношению радиуса R_2 к радиусу R_1 луча зрения.

Из опыта установлено, что в среднем $\chi = 0,16 \div 0,20$, т. е. R_1 луча примерно в 7 раз больше R_2 .

Коэффициент χ зависит от изменения оптической плотности воздуха в нижних слоях атмосферы вдоль траектории луча, а так как условия изменяются, то меняется и коэффициент χ .

Кроме колебаний, зависящих от местных условий (разность температур воды и воздуха), коэффициент χ имеет довольно правильные суточные и годовые изменения, изученные главным образом для суши. В течение суток χ от наибольшего значения при восходе Солнца изменяется к середине дня до среднего значения, затем снова увеличивается и достигает максимума при заходе Солнца. Поэтому при восходе и заходе Солнца видимость удаленных низких предметов может быть лучше, что рекомендуется использовать судоводителями при подходе к низким берегам. Изменяемость χ в морских и океанских условиях еще мало изучена: наблюдались колебания χ от 0,01 до 0,60. За среднее значение χ в наших таблицах принимают 0,16.

Вывод формулы наклона горизонта. Видимый горизонт представляет малый круг на поверхности моря, описанный лучом зрения AaB (рис. 87), по которому наблюдатель A с возвышения глаза e увидит наиболее удаленную точку B поверхности моря; дуга A_1B — дальность видимого горизонта D .

Наклоном видимого горизонта d называется вертикальный угол HAB' между плоскостью истинного горизонта HN' и касательной AB' к лучу, направленному от видимого горизонта к глазу наблюдателя. Вследствие действия рефракции r видимый горизонт B располагается дальше геометрического (точка E), т. е. образованного касательной к земной поверхности, а наклонение его оказывается меньше геометрического (d_0). Чем больше высота e глаза наблю-

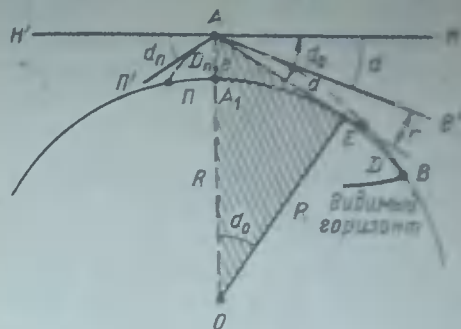


Рис. 87

дателя (см. рис. 87), тем больше наклонение горизонта. Если же $e = 0$, то $d = 0$, и видимый горизонт совпадает с истинным.

Если луч направлен к глазу наблюдателя не от видимого горизонта, а от более близкой точки моря, положим P , то угол d_p между касательной AP к лучу, направленному от близкой точки моря, и плоскостью HN' истинного горизонта называется наклоном зрительного луча. Очевидно, наклонение зрительного луча представляет более общий случай; наклонение же горизонта — его частный случай, когда точка P удалена на предельную дальность видимости горизонта. При этом наклонение зрительного луча примет минимальное значение и станет равным наклонению горизонта, т. е. $(d_p)_{\min} = d$. Основанный на этом точный вывод формулы d приведен в [7, с. 473].

Для упрощенного вывода формулы наклона на рис. 87 пометим угол $EАН$, равный геометрическому наклонению d_0 ; угол при центре сферы также равен d_0 по взаимной перпендикулярности сторон. Из рис. 87 видно, что

$$d = d_0 - r.$$

Но r по формуле (154) равно $\frac{1}{2} \chi d_0$, поэтому

$$d = d_0 - \frac{1}{2} \chi d_0 = \left(1 - \frac{1}{2} \chi\right) d_0 \quad (1)$$

Из прямоугольного треугольника AEO (где R — радиус Земли) имеем

$$\cos d_0 = \frac{R}{R + e}$$

По малости угла d_0 заменим $\cos d_0$ двумя членами ряда Тейлора:

$$1 - \frac{d_0^2}{2} = \frac{R}{R+e},$$

откуда

$$d_0 = \sqrt{\frac{2e}{R+e}}.$$

Пренебрегая в знаменателе величиной e , меньшей точности определения радиуса R (± 80 м), и подставляя это выражение в (*), получим теоретическую приближенную формулу для d :

$$d = \left(1 - \frac{\chi}{2}\right) \sqrt{\frac{2e}{R}}. \quad (155)$$

В зависимости от принимаемого χ и R получаются несколько различные рабочие формулы для d . В таблицах поправок d при ВАС — 58 (и в МТ — 63) принят $\chi = 0,16$, а радиус $R = \frac{1852}{\text{arc } 1'}$ (т. е. радиус R шара, длина минуты меридиана которого равна стандартной морской миле). Выражая d в минутах, т. е. $d' \text{ arc } 1'$, и подставляя эти значения, получим

$$d = 1,766 \sqrt{e_{\text{м}}}. \quad (156)$$

По этой формуле вычислены таблицы наклонения в МТ — 63 и в ВАС — 58. В МТ — 75 принят радиус земного шара, поверхность которого одинакова с поверхностью принятого эллипсоида, т. е. $R = 6\,371\,116$ м, $\chi = 0,16$, а также коэффициент $1 + k = 1,00069$ для приведения мили данного эллипсоида к международной. С этими данными, и принимая $d \text{ arc } 1'$ получим

$$d = 1,760 \sqrt{e_{\text{м}}}. \quad (157)$$

По этой формуле вычислена табл. 11-а МТ — 75 для возвышений глаза от 0,3 до 44,5 м. Она составлена как безынтерполяционная, т. е. d дано между значениями e , например для $e = 12,6 \div 13,0$ м $d = -6,3'$. Аналогичная таблица в ВАС — 58 составлена до 20,8 м, и так же безынтерполяционная, например для $e = 12,52 \div 12,93$ м $d = -6,3'$.

Из этого примера, а также из анализа таблиц видно, что расхождения в d никогда не превысят $0,1'$, поэтому эти

таблицы можно считать практически равноценными.

Исследование формулы наклонения горизонта. Дифференцируя формулу (155) по d , χ и e , получим

$$\partial(d) = -\frac{\partial\chi}{2} \sqrt{\frac{2e}{R}} + \frac{1 - \frac{\chi}{2}}{\sqrt{\frac{2e}{R}}} de.$$

Принимая значение χ и R , как и в МТ — 75, переходя к конечным приращениям и выражая $\Delta d' \text{ arc } 1'$, получим

$$\Delta d' = -0,96 \sqrt{e} \Delta\chi + 0,89 \frac{\Delta e}{\sqrt{e}}. \quad (158)$$

где $\Delta\chi$ — погрешность в коэффициенте земной рефракции,
 Δe — погрешность в принятой высоте глаза.

Анализ этой формулы показывает, что:

для уменьшения ошибки в наклоне от $\Delta\chi$ надо уменьшать возвышение глаза, например наблюдать с нижней палубы;

ошибка от принятой высоты глаза уменьшается с увеличением e , поэтому наблюдения в сильную качку надо вести с верхнего мостика. Кроме того, при качке измерения ведутся над линией, лежащей выше видимого горизонта на $\frac{1}{3}$ высоты волны, поэтому при входе в таблицы надо уменьшать e на $\frac{1}{3}$ высоты волны.

Из формулы (158) следует также, что требования к точности измерения высоты глаза понижаются с увеличением e . Для получения d с ошибкой меньше $0,1'$ высота глаза должна быть получена с точностью до 20 см при высотах до 5 м, с точностью до 35 см — при высотах до 10 м, с точностью до 0,5 м — при высотах до 20 м.

Исследования показали, что наклонение горизонта зависит еще и от разности температур воздуха и воды, влажности, давления воздуха, ветра, местных условий и др. Многочисленные попытки создать эмпирическую формулу, учитывающую главную причину — разность температур воздуха и воды, не дали хороших результатов, и полученные фор-

мулы иногда не улучшают, а ухудшают результаты по сравнению с табличными относительно наблюдаемого d .

На основании опытных данных в настоящее время установлено:

наклонение горизонта в открытом море при установившихся условиях приблизительно соответствует табличному, а отклонения находятся в пределах до $\pm 0,6'$;

в прибрежных районах иногда встречаются отклонения d от табличного (в среднем не более $2'$);

имеются районы Земли, где замечались частые отклонения: на границах течений, в Красном море, у западного побережья Африки и Южной Америки, у Ньюфаундленда, Лопотенских островов и др.;

замечались отклонения d от табличного после прохода экватора, а также в полярных морях.

Таким образом, табличное значение наклона горизонта иногда может вызывать ошибку в исправленной высоте. Для избежания этой ошибки в ответственных случаях следует определить действительное значение наклона горизонта в данный момент с помощью наклономера. Ошибка от наклона может быть также исключена из конечного результата совместно с другими систематическими погрешностями наблюдениями «через зенит» и при четырех линиях.

Наклонение, получаемое из таблицы всегда вычитается из измеренной высоты светила. т. е.

$$h_n = h' - d \quad (154)$$

Наклонение зрительного луча. Если высота светила измерена над предметом, расположенным ближе видимого горизонта (береговой чертой, ватерлинией соседнего судна), то при исправлении высоты вводится наклонение зрительного луча d_n , т. е.

$$h_n = h' - d_n \quad (160)$$

Величина d_n выбирается из табл. 11-б МТ — 75 (или 11-а МТ — 63) по D и e (см. рис. 87).

Наклонение зрительного луча представляет общий случай наклона луча к плоскости H , причем d_n меняется от d до 90 . Вывод формулы для d_n приведен в курсах [7; 9]. Табл. 11-б МТ — 75 вычислена по формуле

$$d = 0.0414 D_n + 18.56 \frac{e}{D_n} \quad (161)$$

где D_n — расстояние до предмета, км;
 e — высота глаза наблюдателя, м

Таблица 11-б рассчитана для e от 2 до 45 м и D_n от 10 до 140 км. На практике величина D_n получается по докатору, e — с чертежа или замеряется лотом. На морском флоте этот случай исправления применяется редко.

§ 51. УСТРОЙСТВО НАКЛОНОМЕРОВ И РАБОТА С НИМИ

Наклономером называется угломерный инструмент, предназначенный для измерения величины наклона горизонта в море. Принцип его основан на следующем: при измерении вертикального угла $H_1 A H_1'$ (рис. 88, а) между направлениями на противоположные части H_1 и H_1' видимого горизонта «через зенит» получаем $(180 + 2d)$, а при измерении «через надир» — $(180 - 2d)$; отсюда может быть получено значение d . При этом предполагается, что наклонение в противоположных точках горизонта одинаково. Это предположение, как показывает опыт, не всегда справедливо, однако в открытом море замеченные изменения наклона по азимуту

находясь в пределах точности измерения d .

Наклономеры, как приборы, предназначенные для наблюдений в море, должны позволять измерять наклонение непосредственно «с руки». Для этого в накломерах применена отражаемая оптическая схема, в которой лучи от противоположных частей горизонта, отразившись от граней двух призм, попадают в поле зрения наблюдателя одновременно под углом $2d$ друг к другу (рис. 88, б). Установив около неподвижной призмы шкалу, отградуированную непосредственно в величинах d , и поворачивая одну призму относительно другой до совпадения лучей 1 и 2,

можно по шкале отсчитать значение наклона d . Такой принцип применен, например, в наклонном, предложенном в конце XIX в. Пульфрихом.

Наклономер Каврайского. В наклонном НК советского ученого проф. Каврайского (внедренном в конце 40-х годов) перемещение лучей достигается не поворотом призмы, а поворотом прибора относительно продольной оси. При этом изображения правой и левой частей горизонта в поле зрения прибора перемещаются на разную величину, что является следствием разного увеличения левого и правого объектов наклонного. Наклонение отсчитывается по шкале, видимой в поле зрения прибора НК, в том месте, где изображения горизонтов сойдутся (см. рис. 89, в).

Наклономер Каврайского не имеет подвижных основных частей, поэтому он долговечнее и надежнее других марок.

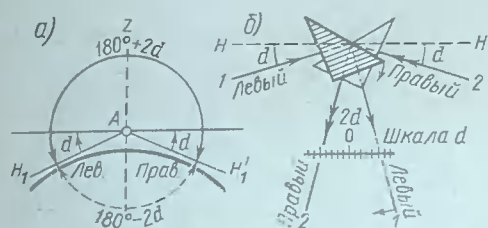


Рис. 88

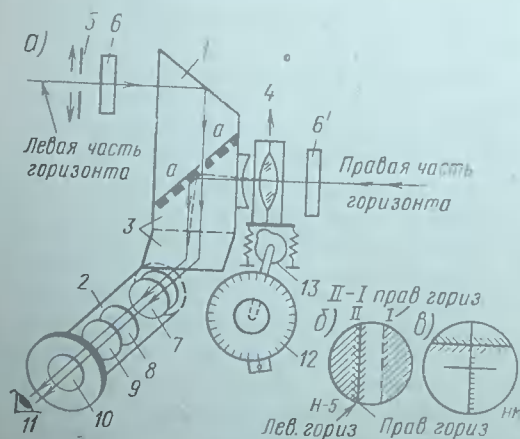


Рис. 89

Наклонение измеряют на двух отсчетах, выполненных как показано ниже:

$$d = \frac{d_1 - d_2}{2}$$

В наклонном НК-1, выпущенном после НК, сводят изображения горизонта, поворачивая не весь прибор, а только блок призмы с помощью микрометрического барабана. Значение наклона отсчитывается на шкале барабана при совмещении горизонтов.

Наклономер Н-5. Выпускается нашей промышленностью. Схема наклонного Н-5 показана на рис. 89, а. Оптическая система его состоит из призмы — «крыши» 1 (аналогичной призме в наклонных НК и НК-1), закрепленной неподвижно; зрительной трубы 2; комбинационной призмы 3, изменяющей направление лучей; компенсатора 4, который состоит из двух линз и играет роль оптического клина, поворачивающего правый луч.

Лучи света от левой части горизонта (одна стрелка на рис. 89, а), пройдя через диафрагму 5 выравнивающую яркости частей горизонта, и защитное стекло 6, преломляются в призме 1 и, пройдя через полупрозрачную (полупосеребренную) грань ad , отражаются от нижней грани призмы 3 и через объектив 7, диафрагму 8, окуляр 9 и светофильтр 10 (если он поставлен) зрительной трубы попадают в глаз наблюдателя 11. Лучи света от правой части горизонта (две стрелки на рис. 89, а), пройдя стекла 6, оптический клин 4 и зрительную трубу, также попадают в глаз наблюдателя. Части горизонта будут видны в поле зрения несовпадающими (рис. 89, б, в). Для совмещения частей горизонта следует поворачивать накатанное кольцо со шкалой 12, которое через кулачок 13 сместит линзу 4; при этом луч от правого горизонта (пунктир на рис. 89, а) поворачивается до совмещения с левым горизонтом (11 на рис. 89, б). В приборе (рис. 90) кольцо надето на трубу 2. Отсчет наклона выполняется по шкалам 12: черная шкала дает обычное наклонение, которое считается положительным ($+d_1$), красная шкала — отрицательное наклонение ($-d_2$).

Измерение наклоения горизонта.

Перед наблюдениями зрительная труба фокусируется по глазу наблюдателя, а на окуляр надевается светофильтр, если это увеличивает контрастность горизонта, например, при дымке. Измерение наклоения производят до или после измерения высот и с той же высоты глаза; с места измерения должны быть видны противоположные части горизонта. Наклономер помещают у глаза наблюдателя горизонтально, объектив с диафрагмой — вверх и направляют в сторону более яркой части горизонта; с помощью диафрагмы видимость горизонтов уравнивается. Вращением накатанного кольца изображения двух горизонтов совмещают и производят отсчет $+d_1$ по шкале; при обычном наклонении — это черная шкала. После этого для исключения ошибки нуля производят второе наблюдение — при обратном положении прибора. Наблюдатель поворачивается на 180° , чтобы объектив с диафрагмой снова был направлен на яркий горизонт, переворачивает наклонномер и производит второе совмещение и отсчет ($-d_2$), обычно по красной шкале. Наклонение определяют из двух отсчетов по формуле

$$d = \frac{+d_1 - (-d_2)}{2} \quad (163)$$

Если же первый отсчет при прямом положении наклонмера произведен по красной шкале, что бывает только при возвышении горизонта над истинным,

§ 52. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ИСПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТ СВЕТИЛ, ИЗМЕРЕННЫХ НАД ВИДИМЫМ ГОРИЗОНТОМ

Общая формула исправления высот. Высоты, измеренные в море над видимым горизонтом, исправляются в общем порядке, вытекающем из рис. 83 и формул (147), (148), (152), (159). Сводя вместе поправки, получим общую формулу исправления высот:

$$h = oc + i + s + (-d) + (-\Delta h_p) + \Delta h_p + (-\Delta h_t, v \pm R, \quad (164)$$

где d — наклонение горизонта из таблиц или по наклонмеру;

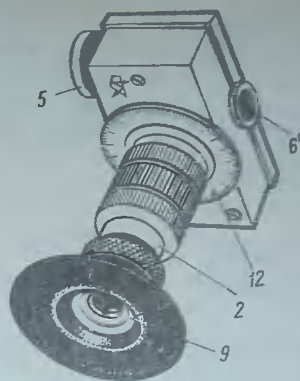


Рис. 90

получим общий знак «—», т. е. при исправлении высоты это наклонение суммируется с h' .

Примечание. Для проверки значения d в этом случае следует установить шкалу на 0 и в прямом положении посмотреть, как расположатся части горизонта. Если они перекроют друг друга и образуют темную полосу, то наклонение следует прибавлять к h' , так как горизонт возвышен.

Измерение наклоения другими марками наклонмеров производится аналогично, меняется только выполнение отсчета. Точность измерения наклоения приборами НК и Н-5 обычно порядка $\pm 0,2'$. Наклономеры дают значительно более достоверный результат, чем таблицы d , включая случаи, когда наклонение прибавляется к h' .

Δh_p — поправка за среднюю астрономическую рефракцию;

Δh_p — поправка за суточный параллакс;

$\Delta h_{t, v}$ — поправки за температуру и давление (поправки астрономической рефракции);

R — видимый угловой полудиаметр светила.

После инструментальных поправок первой всегда вводится поправка за наклонение и получается «видимая высота» $h_v = h' + (-d)$. Все остальные поправки получают по аргументу «видимая высота».

Применяются два приема введения поправок: по таблицам «раздельных поправок» и по таблицам «общих поправок».

В настоящее время для исправления высот применяют в основном таблицы при ВАС — 58, где приведены таблицы раздельных поправок; этот прием и является теперь основным. Исключения составляют таблицы поправок Луны, где всегда применяются «общие поправки».

Исправление высот по таблицам раздельных поправок. *Исправление высот звезд и планет.* При исправлении высоты звезды, измеренной над видимым горизонтом, в общей формуле $\Delta h_p = 0$ и $R = 0$, поэтому

$$h = oc + i + s + (-d) + (-\Delta h_p) + \Delta h_{t.B.} \quad (165)$$

При определении места по звездам в формулу (165) входит еще поправка за приведение к одному зениту Δh_z , она же входит в общие схемы исправления высот (см. пример 67), но вопрос о ней решается в конкретных задачах (ее можно ввести и графически), поэтому в общую формулу Δh_z не вводят.

Поправки d , Δh_p , $\Delta h_{t.B.}$ выбираются из соответствующих таблиц на обложке ВАС — 58 или по табл. 11-а, 9-а и 14-а,б МТ — 75, причем теоретически следует сначала ввести d и уже с h_n входить в остальные таблицы; практически же для звезд и планет поправки выбираются по oc и суммируются.

При исправлении высоты планеты сохраняется еще поправка Δh_p , которая выбирается из таблиц внизу обложки ВАС — 58 или по табл. 9-б МТ — 75 по параллаксу p_0 , выбранному из МАЕ.

Пример 45. 11.05.85 г. в утренние сумерки измерили высоты звезды α Скорпиона $oc = 18^\circ 15,5'$ и Венеры $oc = 14^\circ 45,3'$; $\alpha_1 = 359^\circ 59,3'$; $s_1 = +0,4'$; $s_2 = +0,3'$; $i = 0'$; $B = 770$ мм; $e = 11,5$ мм.

Исправить высоты по ВАС—58 и МТ—75

Решение. 1. $i = 360^\circ - 359^\circ 59,3' = +0,7'$; из МАЕ для Венеры $p_0 = 0,3$ (см. приложение 4).

2	α Скорпиона	Венеры
oc	$18^\circ 15,5'$	$14^\circ 45,3'$
$i + s$	$+ 1,1$	$1,0$
d	$- 6,0$	$- 6,0$ табл. 11-а (то же по табл. ВАС—58)
h_n	$18^\circ 10,6'$	$14^\circ 40,3'$
Δh_p	$- 2,9$	$- 3,6$ табл. 9-а (то же по ВАС—58)
Δh_p	$-$	$- 0,3$ табл. 9-б (то же по ВАС—58)
$\Delta h_{t.B.}$	$- 0,1$	$- 0,3$ табл. 14-а,б (то же по ВАС—58)
h	$18^\circ 07,6'$	$14^\circ 36,7'$

Примечание. Из примера видно, что для звезд и планет исправление по ВАС—58 и МТ—75 совершенно одинаково. В МТ—63 приводилась табл. 9-а, объединявшая d и r , но пользование ею не проще, чем раздельными таблицами.

Исправление высот Солнца раздельными поправками. При исправлении высот Солнца этим приемом формула (164) сохраняется целиком, объединены только p и r , т. е.

$$h = h' + (-d) + (-\Delta h_{p-p}) + \Delta h_{t.B.} + R \quad (166)$$

Таблицы раздельных поправок помещены на обложке ВАС — 58 и МТ — 63 (табл. 11—14). В МТ — 75 раздельных поправок для Солнца нет, хотя поправка d вводится отдельно. Для Солнца возможны измерения малых высот — вплоть до $0'$, при которых сначала надо обязательно получить h_n , чтобы с ней входить в остальные таблицы, поэтому и в общей схеме сначала получают h_n .

Пример 46 02.02.85 г. измерили высоту нижнего края Солнца ($\odot$): $oc = 23^\circ 37,8'$; $\alpha_1 = 333,6'$; $\alpha_2 = 359^\circ 28,2'$; $s = -0,4'$; $i = -5'$; $B = 765$ мм. Исправить высоту по ВАС—58.

Решение.

oc	$23^\circ 37,8'$
$i + s$	$- 1,3$
Δh_d	$- 5,4$
h_n	$23^\circ 31,1'$
Δh_{p+p}	$- 2,1$
R	$+ 16,3$
$\Delta h_{t.B.}$	$- 0,2$
h	$23^\circ 45,1'$ Таблицы МТ—63 дают тот же результат (по МТ—75 $h = 23^\circ 45,0'$)

Исправление высот по таблицам общих поправок. Таблицы общих поправок должны объединять поправки формулы (164) в одну, кроме поправок за температуру и давление. В МТ — 63 такими таблицами являлись табл. 8-а, б для Солнца и табл. 9-а, б для звезд и планет. В МТ — 75 таблицы для Солнца, Луны (и звезд) требуют предварительного введения наклона по табл. 11-а, т. е. собственно являются не общими, а смешанными.

Исправление высот Солнца по МТ — 75. Общую формулу исправления высоты можно записать в виде

$$h = h' + (-d) + [-\Delta h_p + \Delta h_p \pm R_{cp}] + \Delta h_{t,B}$$

Поправки d , Δh_t и Δh_B , как обычно, выбирают из табл. 11-а, 14-а, б; первым, как обычно, вводят наклонение. Поправки в квадратных скобках объединены в одну табл. 8, имеющую четыре колонки: по датам «апрель — сентябрь», где R_{cp} принят равным $15,89'$, и «октябрь — март», где R_{cp} принят $16,15'$; по краям Солнца для нижнего $+R_{cp}$ и для верхнего $-R_{cp}$. Входить в таблицу надо с тремя аргументами: датой, видимой высотой h_v и краем Солнца, по которым получаем общую поправку Δh . До 10° табл. 8 требует интерполяции, с 10° ($9^\circ 34'$) табл. 8 является безынтерполяционной. В таком виде табл. 8 очень близка к таблицам в англо-американском «Nautical Almanac».

Формула для исправления высоты Солнца примет вид

$$h = oc + (i + s - d) + \Delta h + \Delta h_{t,B} \quad (167)$$

Пример 47. 2.10.85 г. измерили высоту нижнего, а затем верхнего краев Солнца: $oc_{\odot} = 10^\circ 48,6'$; $oc_{\ominus} = 12^\circ 04,8'$; $i + s = +0,8'$; $e = 13,2$ м; $t = +5^\circ$; $B = 770$ мм.

Исправить высоту Солнца по МТ — 75 и сравнить с результатом по ВАС — 58.

Решение.

	$\odot$	$\ominus$	
oc	$10^\circ 48,6'$	$12^\circ 04,8'$	
$i + s$	$+0,8$	$+0,8$	
Δh_d	$-6,4$	$-6,4$	(табл. 11-а)
h_v	$10^\circ 43,0'$	$11^\circ 59,2'$	
Δh	$+11,3$	$-20,5$	(табл. 8)
$\Delta h_{t,B}$	$-0,2$	$-0,2$	(табл. 14-а, б)
h	$10^\circ 54,1'$	$11^\circ 38,5'$	

Исправление высоты по ВАС — 58 раздельными поправками дает $10^\circ 54,0'$ и $11^\circ 38,7'$.

При исправлении высот Солнца по табл. 8 возможны ошибки за отклонение $R_{\odot}$ от R_{cp} , которые в первые три дня января, апреля, июля и октября достигают $0,14'$; в остальные даты — не более $0,1'$. В рассмотренном примере высоты отличаются на $0,1'$ и $0,2'$ от значений, полученных по таблицам ВАС — 58. Следует отметить, что исправление высот Солнца по МТ — 75, на наш взгляд, менее удобно, чем по ВАС — 58, так как надо входить в три таблицы на разных страницах; вход в табл. 8 более сложен, а точность ее меньше.

Исправление высот Луны. Таблицы для исправления высот Луны, помещенные в ВАС — 58, МТ — 75 и в МТ — 53, вычислены по несколько отличающимся формулам и, кроме того, имеют разное устройство. Табл. 10 МТ — 75 и таблица при ВАС — 58 рассчитаны по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{\underline{\odot}} &= -\rho_0 + p + R' \\ \Delta h_{\underline{\ominus}} &= -\rho_0 + p - R' \end{aligned} \right\} \quad (168)$$

где p — в МТ — 75 вычислен по формуле (151), а в ВАС — 58 — по формуле (149);

R' — в МТ — 75 вычислен по формуле (153') с учетом (153), а в ВАС — 58 — по формуле (153).

Следовательно, табл. 10 рассчитана по более точным формулам, учитывающим параллактическое увеличение радиуса и форму Земли. Устройство табл. 10 также отличается от других — поправки для верхнего и нижнего краев параллакса; аргументами служат параллакс Луны (через $1'$) и видимые высоты (через 1°), поэтому требуется двойная интерполяция, причем для параллакса — через колонку.

В ВАС — 58 поправки нижнего края Луны расположены слева, верхнего — справа, для выборки также требуется ρ_0 и h_v Луны, поэтому предварительно из МАЕ на данную дату, с интерполяцией по $T_{гр}$ выбирают $\rho_{\odot}$; затем из таблиц выбирают Δh_d и получают h_v . Ис-

правление высот Луны производится по следующей формуле:

$$h = oc + (i + s - d) + \Delta h_{\zeta} + \Delta h_{t, B}. \quad (169)$$

Пример 48. 10.05.85 г. около $T_{\text{гр}} = 18^{\text{ч}}$, $oc_{\zeta} = 27^{\circ}26,5'$, $i + s = -0,8'$, $e = 14,5$ м, $t = +25^{\circ}$, $B = 750$ мм. Исправить высоту Луны по ВАС—58.

Решение.

$$1. \rho_{\zeta} = \rho_0 + \frac{\Delta \rho}{24} \cdot 18 = 57,4' + (-0,9' \cdot 0,75) = 56,7'$$

§ 53. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ИСПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТ СВЕТИЛ

К частным случаям относятся измерения высот любого светила, выполненные необычным приемом или не над видимым горизонтом, в связи с чем порядок исправления высот изменяется.

Исправление высот светил, измеренных «через зенит». Этот прием измерения высот, возможный при высотах, больших $45-50^{\circ}$, за последнее время приобретает распространение и применяется при измерении не только высот Солнца, но и высот других светил (он дает возможность выявить ошибки и промахи). Выполнение измерений «через зенит» рассмотрено в § 47; здесь приведен порядок исправления.

Исправление высот Солнца, измеренных «через зенит». Рекомендуется измерять высоту, «погружая в море» изображение Солнца, т. е. касаясь горизонта краем h' (рис. 91), который при обычном измерении является нижним (h). Исправлять высоту можно с любыми таблицами. По полученному oc выбирают

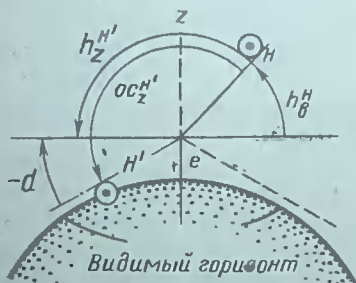


Рис. 91

2.

oc	$27^{\circ}26,5'$
$i + s$	$-0,8$
Δh_d	$-6,7$
$h_{\text{в}}$	$27^{\circ}19,0'$
Δh_{ζ}	$-64,0$
$\Delta h_{t, B}$	$+0,1$
h	$28^{\circ}23,1'$

Примечание. По МТ—75 поправка $\Delta h_{\zeta} = 63,9'$, по английским таблицам из N.A. = $63,8'$, т. е. эта поправка по разным таблицам отличается на $0,2-0,3'$.

s и получают $h_z^{h'} = oc + i + s - d$, т. е. высота приводится к истинному горизонту. Эту $h_z^{h'}$ надо вычесть из 180° и получить h_z^h , которая и исправляется в обычном порядке (раздельными или общими поправками). Формула для исправления имеет вид

$$h = [180^{\circ} - (oc + i + s - d)] - (+(-\rho_0 + \rho) \pm R). \quad (170)$$

При этих высотах поправки $\Delta h_{t, B}$, обычно меньше $0,1'$, и ими пренебрегают.

Пример 49. 12.05.85 г. измерена высота Солнца «через зенит»: $oc_z^{h'} = 121^{\circ}32,6'$; $oc = 35^{\circ}27,4'$; $oc_z = 0^{\circ}31,0'$; $s = +0,5'$; $e = 12,2$ м. Исправить высоту по ВАС—58.

Решение

1. Контроль: $oc_z - oc = 53,6'$ (по МАЕ $53,6'$).

$$i = \frac{+2,6 - 1,0}{2} + 0,8'; \quad i + s = 1,3'$$

2. По табл. ВАС—58:

$oc_z^{h'}$	$121^{\circ}32,6$
$i + s$	$+1,3$
Δh_d	$-6,2$
$h_z^{h'}$	$121^{\circ}27,7'$
$180^{\circ} - h_z$	$58^{\circ}32,3$
$\Delta h_{\rho + \rho}$	$-0,5$
R	$+15,9$
h	$58^{\circ}47,7'$

Аналогичный результат получается при исправлении высот по таблицам МТ—75.

Исправление высот звезд и планет, измеренных «через зенит». Формула для исправления имеет вид:

$$h = [180^\circ - (oc + i + s - d)] + (-\rho) + (p), \quad (171)$$

где поправка p вводится для планет.

Пример 50. 10.05.85 г. измерена высота Венеры «через зенит»: $oc_z = 112^\circ 22,5'$; $i = -0,7'$; $s = +0,4'$, $e = 15,3$ м. Исправить высоту.

Решение. Из МАЕ $\rho_0 = 0,3'$ (см. приложение 4)

oc_z	$112^\circ 22,5'$
$i + s$	$-0,3$
d	$-6,9$
h_z^z	$112^\circ 15,3'$
h_B	$67^\circ 44,7'$
Δh_p	$-0,4$
Δh_p	$+0,1$
h	$67^\circ 44,4'$

Примечание. При исправлении высот Венеры, измеренных днем, надо вводить еще поправку за фазу, которая рассмотрена в § 74.

Исправление высот светил, измеренных над «береговой чертой». При исправлении высот, измеренных над близким предметом (по терминологии МТ-75 «препятствием»), т. е. над урезом воды или над ватерлинией соседнего судна, вместо наклоения горизонта вводится поправка d_n за наклонение зрительного луча [см. формулу (161)]. Таблицы наклоения зрительного луча приведены в МТ-75 (табл. 11-6), в МТ-63 (табл. 11-а) и ТВА-75 (табл. 1-6). В ВАС-58 их нет, так как этот случай измерения довольно редок. После введения поправки d_n и получения h_n порядок исправления остается обычным.

Пример 51. 24.05.85 г. измерили высоты Солнца над ватерлинией соседнего судна, расстояние до него по локатору $D_n = 33$ кбт, $oc_\odot = 18^\circ 37,5'$; $i + s = -0,6'$; $e = 6,7$ м; $t = +18^\circ$; $B = 755$ мм. Исправить высоту по МТ-75.

Решение.

$oc_\odot$	$18^\circ 37,5'$
$i + s$	$-0,6$
d_n	$-5,2$ (табл. 11-6)
h_B	$18^\circ 31,7'$
Δh	$+13,2$ (табл. 8)
$\Delta h_{t,B}$	$+0,1$ (табл. 14-а, б)
h	$18^\circ 45,0'$

Исправление высот, измеренных секстанами с искусственным горизонтом. Секстаном с искусственным горизонтом измеряется высота над истинным горизонтом ($d = 0$), причем не края, а центра светила ($R = 0$), поэтому формулы исправления высот примут вид:

$$\left. \begin{aligned} h_\odot &= oc + (i + s) + (-\rho_0) + p + \Delta h_{t,B}; \\ h_* &= oc + (i + s) + (-\rho_0) + \Delta h_{t,B}; \\ h_\zeta &= oc + (i + s) + (-\rho_0) + p_\zeta \cos h + \Delta h_{t,B}. \end{aligned} \right\} \quad (172)$$

Поправками $\Delta h_{t,B}$ при этих измерениях обычно пренебрегают. При исправлении высот Солнца и Луны по МТ-75 общую поправку можно получить как полусумму поправок верхнего и нижнего краев, т. е.

$$\Delta h = \frac{1}{2} (\Delta h_\odot + \Delta h_\ominus).$$

Равноценным приемом получения Δh является добавление $R_\odot$ из МАЕ к поправке нижнего края. Для звезд применяется поправка из табл. 9-а. Исправление высот, измеренных теодолитом, производится по этим же формулам, но со всеми поправками до $0,1'$.

Точность исправления высот. Эксперименты показывают, что точность определения поправки $i \pm 0,1 - 0,2'$, а s порядка $\pm 0,1'$; точность исправления высот поправками из таблиц порядка $\pm 0,1 - 0,2'$, отсюда и общая точность исправления oc — около $\pm 0,2'$.

§ 54. ПРИВЕДЕНИЕ ВЫСОТ СВЕТИЛ К ОДНОМУ ЗЕНИТУ (МЕСТУ) И ОДНОМУ МОМЕНТУ

Приведение высот к одному зениту. Высоты светил в море измеряются обычно при движении судна, поэтому высоты

нескольких светил определяются из разных мест на Земле. Если наблюдатель вместе с судном перемещается по по-

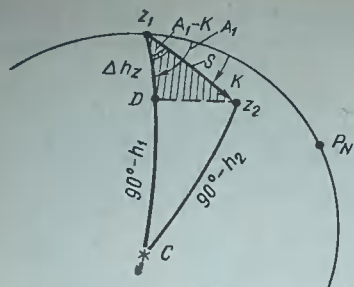


Рис. 92

верхности Земли, то его зенит на небесной сфере и связанная с ним плоскость истинного горизонта также перемещаются. Вследствие этого высоты светил изменяются независимо от их изменения при суточном вращении сферы.

Положим, что при первом измерении высоты светила C зенит наблюдателя на сфере (рис. 92) был в точке z_1 и светило имело зенитное расстояние $(90^\circ - h_1)$. Азимут его в круговом счете был A_1 , путь $ПУ$ или курс судна $ИК(K)$ отсчитывали от меридиана наблюдателя $P_N z_1$ в круговом счете. К моменту наблюдений другого светила зенит судна переместился в точку z_2 , дуга $z_1 z_2$ в минутах ($'$) равна плаванию S судна за это время (в морских милях); $z_2 C$ равно $90^\circ - h_2$. Изменение Δh_2 высоты h_1 первого светила от перемещения судна определится как разность:

$$(90^\circ - h_1) - (90^\circ - h_2) = h_2 - h_1 = \Delta h_2,$$

ткуда

$$h_2 = h_1 + \Delta h_2. \quad (173)$$

Опустив из точки z_2 сферический перпендикуляр $z_2 D$, получим сферический $\Delta z_1 z_2 D$, в котором $z_1 D \cong \Delta h_2$; $z_1 z_2 = S$ и угол $q = A_1 - ПУ$ или $A_1 - K$.

Принимая в первом приближении $\Delta z_1 z_2 D$ за плоский, получим

$$\Delta h_2 = S \cos (A_1 - K) \quad (174)$$

или

$$\Delta h_2 = S \cos q,$$

где q — курсовой угол на светило.

Если предыдущая высота приводится к последующему зениту, то поправка Δh_2 будет положительна при движении судна «к светилу» и отрицательна при движении его «от светила». При при-

ведении высоты «назад» знаки будут обратными. Так как плавание $S = V \Delta T = \frac{V}{60} \Delta T^m$, то формула (174) может быть представлена в виде

$$\Delta h_2 = \frac{V}{60} \cos (A - ПУ) \Delta T = \Delta h_V \Delta T, \quad (175)$$

где V — скорость судна, уз;
 ΔT — промежуток времени между измерениями высот h_1 и h_2 , мин;
 Δh_V — изменение высоты за 1^m .

Величина Δh_V с ее знаком приведена в ВАС — 58, ТВА и МТ — 75 (табл. 16) по аргументам V и $A - ПУ = q$ в круговом счете. Знаки приведены сверху и снизу таблиц и даны для приведения предыдущей высоты к последующему зениту; при обратном приведении знаки надо изменить на обратные. Величина Δh_2 получится перемножением Δh_V с ее знаком на ΔT в минутах и их долях. Значение приведенной высоты $h_{пр}$ получают по формуле (173), при этом высота h_1 оказывается как бы измеренной из того же места, что и высота h_2 .

Поправка за приведение к «одному зениту» вводится при наблюдении высот звезд или планет для определения места судна, а также при выводе m_{oc} из серии высот одного светила. Величина Δh_2 при современных скоростях может достигать заметных величин, например при скорости 20 уз за 3^m имеем: $\Delta h_2 = 1,0'$ при $q = 0$. При взятии среднего арифметического из серии высот одного светила приводить их к зениту не нужно, так как поправки взаимно компенсируются.

Приводить высоты светил к одному зениту можно также графическим путем (см. § 73). В этом случае плоский $\Delta z_1 z_2 D$ воспроизводят на карте, что соответствует решению по формуле (174). Графическое приведение применяется в ускоренных приемах обработки.

Пример 52. $\varphi = 52^\circ 10' N$, $ПУ = 221^\circ$; $V = 15$ уз, измерили высоты двух звезд: $oc_1 = 27^\circ 34,0'$, $T_1 = 7^h 5^m 25^s$; $oc_2 = 36^\circ 51,6'$, $T_2 = 7^h 11^m 34^s$. $KП$ первой звезды равен 201° . $\Delta K = -1,5^\circ$. Привести h_1 ко второму зениту.

Решение.

1. $ИП = A_{кр}$	199,5°	2. T_2	7 ^h 11 ^m 34 ^s
$ПУ$	221	T_1	7 5 25
$q = A_{кр} - ИК$	338,5°	ΔT	6 ^m 9 ^s $\approx 6,2^m$

3. Из табл. 16 МТ-75 по q (сверху) и V 15 получаем $\Delta h_T = +0,23'$ м.

$$4. \Delta h_T = +0,23 \cdot 6,2 = +1,4'$$

$$5. h_{\text{пр}} = 27 \cdot 34,0' + 0 \cdot 01,4' = 27 \cdot 35,4'$$

Примечание. Формула (174) является приближенной, так как рассмотренный треугольник — сферический; кроме того, из точки z_2 курсовой угол на светило C изменялся на Δq . Более точная формула

$$\Delta h_T = S \cos q - S \sin q \operatorname{tg} \frac{\Delta q}{2}.$$

Однако при S , меньшем 10 миль, для практики достаточно (до $0,1'$) первого члена этой формулы.

Приведение высот к одному моменту.

Для исключения изменения высоты от суточного вращения сферы высоты «приводятся» к намеченному моменту путем введения поправок Δh_T за суточное

движение [см. формулы (46), (48)] в виде

$$\Delta h_T = -0,25 \cos \varphi \sin A \Delta T^2.$$

В этой формуле отброшены последующие члены ряда, поэтому применять (с точностью до $0,1'$) можно в среднем до 180° . Рабочая формула имеет вид

$$\Delta h_T = 0,1 K_1 \Delta T^2, \quad (175)$$

где $K_1 = 2,5 \cos \varphi \sin A$ — выбирается из табл. 17 МТ-75.

Знак поправки определяется логически: до кульминации высоты увеличиваются, после — уменьшаются.

Высоты приводятся к одному моменту при выводе $m_{\text{ос}}$ и при предвычислении линий положения, где чаще применяется графический прием (см. § 80). Высоты светил, приведенные к одному зениту и моменту, рассматриваются как одинаковые, т. е. как многократные измерения одной и той же величины.

§ 55. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ КВАДРАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ПОПРАВОК И ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

Как известно, числовой характеристикой точности ряда измерений является *средняя квадратическая ошибка* m . Вероятность того, что любая случайная ошибка данного ряда находится в пределах от $+m$ до $-m$, равна 68,3%. Для получения m надо произвести серию равноточных измерений одинаковой величины (i, d, α). Число измерений должно быть не менее 11, так как с уменьшением их числа погрешность самой величины m резко возрастает. Однако при большом числе измерений наблюдатель устает и точность падает, поэтому в мореходной астрономии для вывода m принято делать 9–13 измерений (в крайних случаях — до 7). Определение m поправок и углов выполняется по «внутренней сходимости», так как истинное значение величины неизвестно. Вычисления можно произвести двумя приемами: по формуле (177) и по «размаху».

Первый прием. Если измерено N значений какой-либо одинаковой величины a , то m_a рассчитывается по формуле

$$m_a = \pm \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{N-1}}, \quad (177)$$

где $v_i = a_i - a_0$ — отклонения от среднего арифметического;

$$a_0 = \frac{\sum a_i}{N} \text{ — среднее арифметическое их измеренных величин } a.$$

Для оценки точности среднего арифметического, которое принимается за результат наблюдений, применяется величина m_a , рассчитываемая по формуле

$$m_a = \frac{m_a}{\sqrt{N}}. \quad (178)$$

Второй прием. В полученной серии наблюдений отыскивается наибольшее $a_{\text{макс}}$ и наименьшее $a_{\text{мин}}$ значения одинаковой измеренной величины и рассчитывается их разность

$$R = a_{\text{макс}} - a_{\text{мин}}, \quad (179)$$

которая называется «размахом». После этого m_a определяют по формуле

$$m_a = R k_p, \quad (180)$$

где k_p — коэффициент, зависящий от числа наблюдений и данный в табл. 7.

Критерий промаха. Для выявления промаха в ряде измерений лучше применять не $m_{\text{пред}} = 3m$, а следующий прием сравнения «размахов»

λ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
k_p	0,59	0,49	0,43	0,39	0,37	0,35	0,34	0,32	0,32	0,30	0,29
γ_λ	1,58	1,28	1,11	1,00	0,92	0,86	0,82	0,78	0,74	0,69	0,65

Пусть $R_1 = a'_{\text{макс}} - a_{\text{мин}}$, а $R_2 = a_{\text{макс}} - a_{\text{мин}}$ — следующий за ним «размах» ($a_{\text{макс}}$ — второе по величине значение a). Образует $\Delta R = R_1 - R_2$ и сравним его с теоретическим:

$$\Delta R_{\text{теор}} = R_2 \gamma_\lambda, \quad (181)$$

где γ_λ выбирает из табл. 7.

Если ΔR больше $\Delta R_{\text{теор}}$, то наблюдение $a'_{\text{макс}}$ — промах, его надо исключить и принять R_2 . В сомнительных случаях такое сравнение продолжается с R_3 . Может оказаться, что наибольшее отклонение из-за $a_{\text{мин}}$, тогда сравнение выполняются с $a_{\text{мин}}$.

Вывод m измерения поправки индекса. Величина поправки индекса за время наблюдений практически не изменяется. При определении m_i по звезде или горизонту первым приемом сначала вычисляют величины i , а затем по формулам (177) и (178) получают m , m_0 . Вторым приемом вычислять i не требуется, так как «размах» определяется по разности ($R = \alpha'_{\text{макс}} - \alpha'_{\text{мин}}$), после чего m_i определяется по формуле (180).

При определении m_i по Солнцу вначале следует вычислить i , а затем определить m_i .

Пример 53. Произведен ряд измерений поправки индекса по звезде. Определить m , m_0 и результат измерений.

Решение.

1.

№	i	v	v^2	№	i	v	v^2
1	-0,8'	0,0'	0,00	7	-0,6'	-0,2'	0,04
2	-0,5	0,3	0,09	8	-1,0	-0,2	0,04
3	-0,6	-0,2	0,04	9	-0,8	0,0	0,00
4	-1,0	0,2	0,04	10	-0,7	0,1	0,01
5	-0,9	-0,1	0,01	11	-0,9	0,1	0,01
6	-0,7	-0,1	0,01				
				$i_0 = -0,8' \quad \Sigma v^2 = 0,29$			

$$2. m \pm \sqrt{\frac{\Sigma v^2}{N}} \quad \sqrt{0,029} \approx 0,17 \approx \pm 0,2$$

$$m_0 \pm \frac{m}{\sqrt{N}} \approx 0,05' \approx \pm 0,1'$$

$$i = 0,8' \pm 0,1'$$

$$3. \text{ «По размаху». } R = 1,0' - 0,5' = 0,5' \\ \times 0,32 = 0,16' \approx \pm 0,2'.$$

Аналогично определяется m измеренных углов, наклонений и других «постоянных» величин.

Определение m и общей систематической ошибки совмещения краев Солнца. Выполняя серию в 10—13 наблюдений Солнца для определения i , можно вывести как случайную ошибку совмещения краев светила m , так и общую систематическую ошибку данного отсчета (0,30'). Эта ошибка может включать ошибку барабана секстана на отсчете 30' (см. § 43), личную ошибку наблюдателя (свойство «не доводить» или «переводить» края), а также мертвый ход, если совмещения производились вращением винта и разные стороны. Каждому штурману, особенно начинающему, полезно выполнять эту работу, чтобы знать возможности данного секстана и свою ошибку.

Систематическая ошибка определяется по формуле

$$\Delta = D_{\text{ср}} - D_{\text{ист}}, \quad (182)$$

$$\text{где } D_{\text{ср}} = \frac{\Sigma L}{N}; \quad D = \frac{\alpha i_2 - \alpha i_1}{2};$$

αi_1 — отсчеты при совмещении краев Солнца (вращением барабана всегда в сторону увеличения отсчета).

$D_{\text{ист}} = 2R_{\text{с}} \frac{1}{N}$ — выбирается из МАЕ, N — число измерений.

После определения Δ вычисляются отклонения $\alpha = D_{\text{изм}} - D_{\text{ср}}$ и m_i по формуле (177).

Случайные ошибки при измерении высот зависят главным образом от видимости горизонта, определяемой его освещенностью и состоянием погоды, от качества секстана и от опытности и искусства наблюдателя. Точность измерений характеризуется СКО высоты m_{oc} или СКО среднего арифметического m_h , вычисленным из ряда в 7—13 наблюдаемых oc .

Эти величины в море могут быть определены следующими путями.

1. Когда истинное место судна неизвестно, то m_{oc} вычисляется по внутренней схожимости отсчетов секстана двумя приемами:

обработкой графическим приемом по формуле (177) или по «размаху»;

вычислением по формуле (177) с приведением к моменту и зениту.

2. Когда истинное место судна известно, то m определяются по отклонениям линий от «истинной». В этом случае выводится и систематическая ошибка Δ и m_h по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= h_i - h_{ист}; \quad \Delta = \frac{\sum \sigma_i}{N}; \\ \sigma_i &= \sigma_i - \Delta; \\ m_h &= \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{N-1}} \end{aligned} \right\} \quad (183)$$

где h_i — измеренная и исправленная высота;

$h_{ист}$ — высота, вычисленная для истинного места.

Величина m_{oc} (или m_h) при различных условиях различна, поэтому ее следует определять при каждом наблюдении и полученное значение вводить в обработку и оценку точности места. Однако практически ее определяют время от времени при наличии возможностей и времени и полученные значения применяют в аналогичных условиях, т. е. фактически чаще применяется анприорная оценка m_h .

Определение m_{oc} по внутренней схожимости графическим приемом. Для вывода ошибки m_{oc} измеряют серию из 9—11 высот в моменты с интервалом между измерениями не более 30—40 с и получают φ , A , $ПУ$, V . Измеренные вы-

соты возрастают или убывают вследствие суточного движения светил и движения судна: эти изменения высоты должны быть исключены, т. е. высоты приведены к одному моменту и зениту. Наиболее простой метод приведения высот к одному значению — это построение средней скорости изменения высоты в виде средней прямой между точками графика (рис. 93). График строят на миллиметровой бумаге в крупном масштабе: в 1'—5 мм (или 1 см) и в 1°—1 мм; по оси абсцисс откладывают ΔT секундомера (или хронометра) от начального; по оси ординат — отсчеты секстана также от начального. Между полученными точками на глаз с помощью прозрачной линейки проводят среднюю линию, наклон которой к оси абсцисс характеризует среднюю скорость изменения высоты от всех причин. Этот график можно использовать двумя приемами:

измерить на чертеже все отклонения точек по ординатам от прямой и принять их за σ_i , после чего по формуле (177) получить величину m_{oc} ;

более удобен метод «размаха», для которого отыскивают наибольшее отклонение вверх ($\Delta h_{макс}$) и вниз ($\Delta h_{мин}$), получают размах

$$R = \Delta h_{макс} + \Delta h_{мин} \quad (184)$$

после чего

$$m_{oc} = R k_p$$

где k_p выбирают из табл. 7.

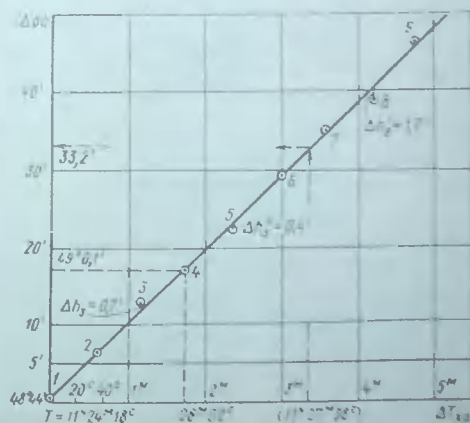


Рис. 93

Критерий промаха. На графике отчетливо видны значительные отклонения некоторых точек от прямой. Прежде всего проверяют графические построения. Если они правильные, то отклонение $\Delta h'_{\text{макс}}$ проверяют на промах, как показано в § 55. Образуется размах $R_1 = \Delta h'_{\text{макс}} + \Delta h'_{\text{мин}}$ и размах R_2 со вторым отклонением $\Delta h'_{\text{макс}}$, разность их ΔR сравнивают с теоретическим $\Delta R_{\text{пред}} = R_2 \gamma_N$, где γ_N выбрано из табл. 7. Если ΔR превысит теоретическое значение размаха, то $\Delta h'_{\text{макс}}$ — промах, точка вычеркивается.

Построение графика и получение $m_{\text{ос}}$ значительно ускоряется, если заготовить планшет со шкалами заранее.

Примечание. Если наблюдения производятся с помощником, то им одновременно наносятся точки на планшет и исключаются «отскочившие» наблюдения. В этом случае может помочь следующий прием предварительного построения прямой: по МТ—75 перед самыми наблюдениями получают Δh_T и Δh_z и на графике строят теоретическую Δh за 60°: от первого наблюдения можно провести прямую и контролировать отклонения от нее.

Пример 54. 4.05.85 г., следуя ПУ = 277, $V = 14$ уз, около $T_c = 9^h 30^m$ ($M_2 = 2W$) измерили серию высот нижнего края Солнца ($\odot$): $\varphi = 42^\circ 25' N$; $\lambda = 30^\circ 50' W$; $KП = 119^\circ (-1^\circ)$. Определить $m_{\text{ос}}$; m_0 и проконтролировать на промах.

$T_{\text{хр}}$	α
11 ^h 24 ^m 18 ^c	48° 44,4'
24 54	50,4
25 29	56,7
26 02	49° 01,0'
26 38	96,7
27 18	13,8
27 52	19,3
28 29	23,2
11 ^h 29 ^m 02 ^c	49 30,7'

Решение.

1. Строим график в масштабе: 1' = 5 мм и 1^c = 1 мм (см. рис. 93). Начало отсчетов $T = 11^h 24^m 18^c$ и $\alpha = 48^\circ 44,0'$.

2. Точка 8 отскочила, но сравнительно немного. Проверяем на промах:

$$R_1 = \Delta h_3 + \Delta h_8 = 2,4';$$

$$R_2 = \Delta h_3 + \Delta h_5 = 1,1';$$

$$\Delta R = 1,3';$$

$$\Delta R_{\text{пред}} = R_2 \gamma_N = 0,9'$$

Наблюдение 8 ошибочно, и его вычеркиваем.

$$3. m_{\text{ос}} = R_2 k_p = 10,7 \pm 0,41 \cdot 0,35 = \pm 0,4'$$

$$m_0 = \frac{m_{\text{ос}}}{\sqrt{N}} \pm 0,15' \approx 0,2$$

4. С графика (рис. 93) можно получить средний отсчет и момент или отсчет на нужный момент: например на 5-й момент:

$$\Delta \alpha = 23,0', \text{ т. е. } \alpha = 49^\circ 47,0'; T_{\text{хр}} =$$

$$= 11^h 26^m 38^c; \text{ на } T_{\text{хр}} = 11^h 27^m 38^c, \alpha =$$

$$= 49^\circ 17,2' \text{ и т. п.}$$

Определение $m_{\text{ос}}$ по формуле (177) с приведением к одному моменту и зениту. Рассмотренный графический прием является все же приближенным. Более точный результат получается, если высоты аналитически привести к одному моменту, вводя поправку $\Delta h_1 = 0,1 \times K_1 \Delta T^c$ (см. § 54), и к одному зениту, вводя поправку $\Delta h_2 = K_2 \Delta T^m$. Отсчеты, исправленные этими поправками, называют приведенными высотами $h_{\text{пр}}$. Обычно высоты приводят к среднему моменту (T_5). Из приведенных высот вычисляют среднее арифметическое h_0 , затем $v_i = h_{\text{пр}} - h_0$ и по формуле (177) получают $m_{\text{ос}}$.

Критерий промаха. Ошибочным следует считать то наблюдение, у которого отклонение v превышает $3m$ (причем m вычислена без подозреваемого наблюдения), т. е. $v \geq 3m$.

Пример 55. По данным примера 54 рассчитать $m_{\text{ос}}$ и m_0 .

Решение.

1. Приведение к одному моменту. Из табл. 17 МТ—75 по $\varphi = 42,4^\circ N$ и $A = 62^\circ SE$ выбираем: $K_1 = 1,63' 10^c$; $\Delta h_T = 0,163 \Delta T^c$.

2. Приведение к одному зениту.

ИП	118	Из табл. 16 МТ—75
ПУ	277	$\Delta h_V = -0,22' 1^m$
q	201	$\Delta h_z = -0,22 \Delta T^m$

3. Вычисление производим по показанной ниже схеме; приведение осуществляем к T_5 .

$T_{\text{хр}}$	ΔT°	Δh_1	Δh_2	α	$h_{\text{пр}}$	σ	σ^2
11 ^h 24 ^m 18 ^s	140 ^o	-22,8'	-0,5'	48°44,4'	49°06,7'	-0,5'	0,25
24 54	104	+17,0	-0,4	50,4	7,0	-0,2	04
25 29	69	+11,2	-0,3	56,7	7,6	+0,4	16
26 02	36	+5,9	-0,1	49°01,0'	6,8	-0,4	16
26 38	00	0	0	49°06,7'	6,7	-0,5	25
27 18	40	-6,5	+0,1	13,8	7,4	-0,2	04
27 52	74	-12,1	+0,3	19,3	7,5	+0,3	09
28 29	111	-18,1	+0,4	23,2	5,5	?	—
11 ^h 29 ^m 02 ^s	144	-23,5	+0,5	49°30,7'	49°07,7'	-0,5	0,25

$$h_0 = 49^{\circ}07,2'; \quad \Sigma U^2 = 1,24$$

Примечание. Наблюдение 8 берем под подозрение и вычисления производим без него.

$$4. m_{0c} = \sqrt{\frac{1,24}{7}} = \sqrt{0,177} = \pm 0,42',$$

$$\text{или } m_{0c} = \pm 0,4', \quad m_0 = \pm 0,15'.$$

Проверяем восьмое наблюдение: $v = 1,7' > 3m_{0c} = 1,2'$; следовательно, восьмое наблюдение действительно ошибочно.

Определение m'_n и Δ по отклонению линий положения от «истинной». Способ дает самые достоверные результаты для m_n и позволяет выявить систематические ошибки Δ . Его можно применять, когда место судна известно с точностью выше 0,1', например, по РЛС и точечным ориентирам, по спутникам, на рейдах или у причала, когда виден горизонт. Измеряют 9—11 высот (допустимо 7), замечают моменты $T_{\text{гр}}$ и снимают обсервованные координаты φ_0 , λ_0 . По полученным φ , δ , t_m для каждого наблюдения вычисляют $h_{\text{ист}}$ и вычитают ее из измеренной и исправленной высоты h ; вычисления производят по формулам (183). Можно вычислять $h_{\text{ист}}$ только для среднего момента, а все измеренные высоты приводить к этому моменту и зениту, как в примере 55, и далее по формулам (183) определять Δ и m_n .

В полученную Δ входят ошибки от наклона секстана, Δs , Δd и личная ошиб-

ка наблюдателя (см. табл. 10). Что касается величины m , то если расчет истинной высоты выполнять по таблицам ВАС — 58 или ТВА — 57, в нее войдут ошибки вычислений, и в результате получим m_n . Если вычисления произведены точнее 0,05', например на ЭВМ, то получаем m_n без ошибки вычислений. Рассмотренный прием дает штурману возможность проверить себя, инструменты и вычисления и получить уверенность в дальнейшей работе.

Априорная оценка m_n по аналогии условий. При выполнении рядовой астрономической обсервации наблюдатель измеряет по три высоты светила или даже по одной, и вывести m_{0c} ему обычно не удастся. В этих случаях можно рекомендовать приближенную оценку m_{0c} (m_n) по аналогии условий наблюдений. Время от времени в различных условиях со своим секстаном наблюдатель определяет m_{0c} и m_n и с учетом данных других исследователей (см. табл. 10) и ошибок вычислений составляет личный набор оценок точности (m_n), который и применяет в аналогичных условиях.

В тех случаях, когда представляется возможность вывести ошибку данного ряда одновременно с наблюдениями, рекомендуем применять графический прием «по размаху».

АСТРОНАВИГАЦИЯ

Глава 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ КОМПАСА
АСТРОНОМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ§ 57. ОСНОВЫ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОПРАВКИ КОМПАСА

Показания приборов, служащих для определения направлений в море, подвержены систематическим и случайным ошибкам.

Для компенсации систематической составляющей погрешности необходимо определять поправку прибора. Поправка компасов обозначается ΔK . В море, вне видимости берегов, до сих пор единственным и наиболее точным способом определения ΔK является астрономический. Его особенностью является то, что ИП на светило C получается вычислением из треугольника $zP_N C$ (рис. 94). Если в этот же момент наблюдать КП светила, то величина и знак ΔK определяется по формуле

$$\Delta K = \text{ИП}_{\text{св}} - \text{КП}_{\text{св}}. \quad (185)$$

Истинный пеленг светила, равный его азимуту в круговом счете, можно вычислить по формулам, таблицам, номограммам, приборам или на ЭВМ.

Азимут является функцией трех аргументов:

$$A = A_1(\varphi, \delta, t) = A_2(\varphi, \delta, h) = A_3(\varphi, h, t) = \\ = A_4(h, \delta, t) = A_5(\varphi, q, t) \quad (186)$$

В зависимости от возможности получения аргументов принимается та или

иная из этих зависимостей. В настоящее время применяют три первые зависимости, по которым названы и сами методы определения поправки компаса: метод моментов, метод высот и метод высот и моментов. Формулы для вычисления A в этих методах получаются из параллактического треугольника $zP_N C$ (см. рис. 94) по общим формулам сферической тригонометрии (приложение I).

Метод моментов. Если при пеленговании светила замечен момент по хронометру и сняты с карты φ и λ , то треугольник $zP_N C$ решается с полученными φ , δ , t_M по формуле котангенсов [см. § 4, формула (5)]. После упрощений получаем

$$\text{ctg } A = \text{tg } \delta \cos \varphi \csc t_M - \sin \varphi \text{ ctg } t_M. \quad (187)$$

По формуле (187) или по составленным применительно к ней таблицам или номограммам вычисляют азимут в полукруговом счете, переводят в круговой счет и принимают за ИП. Метод моментов является наиболее распространенным, так как он универсален — его можно применять в любое время и к любому светилу, кроме того, он практически удобен.

Метод высот. Если при пеленговании светила измерена или заранее вычислена его высота, а также получены φ и δ , то из треугольника $zP_N C$ по формуле косинуса стороны $P_N C$ можно получить азимут светила:

$$\cos A = \sin \delta \sec \varphi \sec h - \text{tg } \varphi \text{ tg } h. \quad (188)$$

Этот метод применяется в частных случаях, когда высоту можно вычислить заранее, например для видимого восхода (захода) края Солнца или для его истинного восхода.

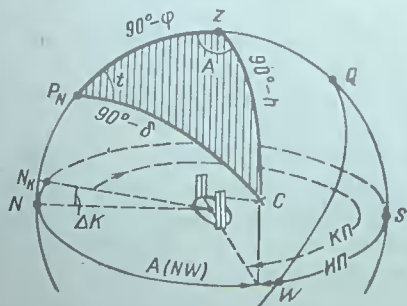


Рис. 94

Метод высот и моментов. Если после наблюдения высот светила взять его пеленг по компасу и измерить $T_{хр}$, то одновременно с получением места судна или линии положения можно получить и поправку компаса.

Для вычисления h и A применяется система формул (7):

$$\left. \begin{aligned} \sin h_c &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos l_M, \\ \sin A_c &= \sin l_M \cos \delta \sec h_c. \end{aligned} \right\} \quad (189)$$

Если ΔK получается после линии положения, то для приведения к моменту наблюдений $KП$ вычисляется ΔA_t , после чего $A = A_c + \Delta A_t$. Этот метод выгодно применять, если азимут вычисляется попутно, например, после линии положения.

Метод высот и моментов применяется также при определении ΔK по Полярной звезде, но ее высота не измеряется, а принимается равной φ . Этот же метод, но с другой системой формул, может быть применен при расчете поправки компаса на ЭВМ.

Определение угла визирования. Для приборов, дающих углы относительно направления на определенное светило (гиросизмута, фотосекстансов или радиосекстансов), определяется угол визирования на ориентир. Если направление на светило удерживать автоматически и непрерывно, то направление на какой-либо ориентир (положим, на порт прихода), называемое углом визирования B , можно

вычислить из системы трех сферических треугольников и применить в качестве направления движения судна.

Особенности определения поправок компасов. Гирокомпас используется для получения курсов и пеленгов. В первом случае он применяется как курсоуказатель, по показаниям которого судно следует длительное время. В этом случае необходимо знать постоянную поправку $\Delta GK_{п}$ гирокомпаса, дающую среднее из его отклонений — мгновенных поправок $\Delta GK'$ т. е.

$$\Delta GK_{п} = \frac{\sum \Delta GK'}{N}, \quad (190)$$

где $\Delta GK' = ИП_{св} - КП_{св}$ — мгновенные поправки за интервал 2,5 ч;
 N — число поправок (4—10).

Мгновенная поправка — это обычная отдельная поправка, которая определена по пеленгам светила. Она применяется для исправления пеленгов около данного момента. Отклонения мгновенной поправки от постоянной обычно не превышают 0,5 — 1° (после маневров — до 2°). Эти отклонения характеризуют точность курсоуказания.

Для поправки магнитного компаса характерно то, что она зависит от курса, поэтому должна определяться именно на данном курсе.

§ 58. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК В φ И λ НА ВЫЧИСЛЯЕМЫЙ АЗИМУТ СВЕТИЛА. ВЫГОДНЫЕ УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

В формулы (187)—(189) для вычисления азимута входят координаты места судна, которые, как правило, являютсячислимыми и лишь изредка наблюдаваемыми. Азимут, вычисленный почислимым координатам, также числимый; для получения же поправки требуется истинный азимут $A_{и}$ светила. Принимая A_c за $A_{и}$, допускаем ошибку ΔA , зависящую в основном от ошибок $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$ в числимых координатах; эта ошибка войдет в поправку компаса.

Ошибку в A_c можно рассматривать как приращение азимута от приращений в широте и долготе места и получить ее с помощью ряда

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial A}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \dots \quad (*)$$

или

$$\Delta A = \Delta A_{\varphi} + \Delta A_{\lambda},$$

где ΔA_{φ} и ΔA_{λ} — приращения A по φ и λ (первые члены ряда).

Определим значения ΔA_{φ} и ΔA_{λ} и условия, при которых этими ошибками можно пренебречь.

Ошибки в A , вызываемые ошибкой в φ . Для определения $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$ продифференцируем формулу (187) для $\operatorname{ctg} A$ по A и φ :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial A}{\sin^2 A} &= (-\operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} l \sin \varphi - \\ &\quad - \cos \varphi \operatorname{ctg} l) d\varphi. \end{aligned}$$

Произведи упрощения, показанные в § 7 (применяя в числителе формулу $\sin h$, а затем — синусов), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial \varphi} &= \sin^2 A \left(\frac{\sin \delta \sin \varphi}{\cos \delta \sin t} + \frac{\cos \varphi \cos t}{\sin t} \right) = \\ &= \frac{\sin^2 A}{\cos \delta \sin t} (\sin \delta \sin \varphi + \cos \varphi \cos \delta \cos t) = \\ &= \frac{\sin A \sin A \sin h}{\sin t \cos \delta} = \operatorname{tg} h \sin A. \end{aligned}$$

Учитывая формулу (*), получим

$$\Delta A_{\varphi} = \operatorname{tg} h \sin A \Delta \varphi. \quad (191)$$

Из формулы (191) видно, что при $h = 0$ или $A = 0$ ошибка ΔA_{φ} также равна нулю.

Ошибки в A , вызываемой ошибкой в λ . Формула для изменения азимута в суточном движении была получена в § 11 в виде

$$\begin{aligned} \Delta A_t &= -\cos \varphi \cos \delta \sec h \Delta t_m = \\ &= -(\sin \varphi - \operatorname{tg} h \cos A \cos \varphi) \Delta t_m. \quad (**) \end{aligned}$$

Но $t_m = t_{\text{гр}} \pm \lambda_w^E$, и так как $t_{\text{гр}}$ практически безошибочен, то $\Delta t_m = \pm \Delta \lambda_w^E$, т. е. ошибка в часовом угле вызывается ошибкой в счислимой долготе, поэтому формула (**) при $\Delta t = \Delta \lambda$ примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\lambda} &= \pm \cos \varphi \cos \delta \sec h \Delta \lambda_w^E = \\ &= \mp (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg} h \cos A) \Delta \lambda_w^E. \quad (192) \end{aligned}$$

Принимая в формуле (192) вместо $\Delta \lambda$ ошибку в отшествии $\Delta \omega \sec \varphi$, после упрощений получим

$$\Delta A_{\omega} = \mp (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} h \cos A) \Delta \omega \frac{E}{\varphi}.$$

Из анализа этих формул видно, что ошибка ΔA_{λ} также зависит от высоты светила и будет меньше при его малой высоте. Кроме того, ошибка зависит от широты места. При склонении, близком к 90° , как у Полярной звезды, ошибка ΔA_{λ} равна нулю.

Совместное действие ошибок счислимых координат. Ошибку удобнее анализировать, если выразить $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$ (для

определенности примем $\Delta A_{\text{сч}}$) через связь счисления (снос) C и ее направление $A_{\text{сч}}$, т. е. принять

$$\Delta \varphi = C \cos A_{\text{сч}} \text{ и } \Delta \lambda = C \sin A_{\text{сч}}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta A &= \Delta A_{\varphi} + \Delta A_{\lambda} = C \operatorname{tg} h \sin A \cos A_{\text{сч}} - \\ &= C (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg} h \cos A) \frac{\sin A_{\text{сч}}}{\cos \varphi}, \end{aligned}$$

или после преобразований

$$\Delta A = C [\operatorname{tg} h \sin (A - A_{\text{сч}}) - \sin A_{\text{сч}} \operatorname{tg} \varphi]. \quad (193)$$

Знаки в скобках будут обратными при $\Delta \lambda_w$.

Выгодные условия наблюдений. Если принять ошибки счисления, т. е. связь $C = 6-7' \approx 0,1^\circ$, то при $h \leq 18^\circ$ в малых широтах ошибка ΔA меньше $0,1^\circ$, в широтах до 60° ошибка в азимуте не превысит $0,25^\circ$, т. е. точности пеленгования. В высоких же широтах ($\varphi = 70-75^\circ$) при этих же условиях ошибка достигает $0,4^\circ$.

Из приведенного анализа можно сделать следующие выводы и рекомендации:

ошибки в счислимых координатах меньше всего сказываются на вычисленном азимуте, если светило расположено на малой высоте до $18-20^\circ$; это и является выгодным условием расположения светила для определения ΔK ;

при обычных условиях плавания, если ошибки счисления не превышают $10'$, вычисленный азимут $A_{\text{сч}}$ можно считать практически равным $A_{\text{н}}$ светила; в высоких широтах требования к точности координат должны быть выше — до $\pm 3'$, т. е. при вычислениях желательно применять obserвованные координаты;

в малых северных широтах выгодным объектом для определения является Полярная звезда, азимут которой мало зависит от ошибок координат;

при соблюдении рекомендаций средняя квадратическая ошибка в азимуте вследствие ошибок координат не превысит $\pm 0,1^\circ$.

§ 59. ПЕЛЕНГОВАНИЕ СВЕТИЛ. ТОЧНОСТЬ ПОПРАВКИ КОМПАСА

О проверке репитера и пеленгатора. Как всякий измерительный прибор, пеленгаторный репитер и пеленгатор должны быть предварительно выверены.

Выверка репитера и пеленгатора производится до выхода в море. В море можно проверить только сходимость отсчетов путем сличения курсов и пеленгов

по разным репитерам; это и следует проделать до определения поправки.

Проверка пеленгатора ПГК-2. После установки на репитер пеленгатора проверяют его вращение, исправность деталей, качество изображения картушки, ориентиров и пузырька уровня с соответствующей регулировкой, проверяют откидное зеркало и светофильтры, протирают оптику. Установка откидного зеркала ПГК-2 по техническим условиям произведена до $\pm 0,05^\circ$, но при нарушениях появляется ошибка. Выявить ее можно последовательными определениями ΔK без зеркала и по другому светилу — с зеркалом; это можно проделать в хороших условиях.

Исключение постоянной погрешности гирокомпаса. На стоянке до выхода в рейс, после прихода гирокомпаса в меридиан, определяют 3—5 поправок $\Delta GK'$ по светилам (через 15—20^м). Образовав среднее, получают $\Delta GK_{\text{н}}$ и поворотом основного прибора доводят ее до нуля ($\pm 0,2^\circ$).

Выполнение пеленгования. Для пеленгования подбираются светила с высотой 0—10° (до 20°). Пеленгование выполняют совмещением нити пеленгатора с центром светила, одновременно наклонами пеленгатора «вбок» на нить приводят пузырек уровня. Когда на нити окажутся светило и пузырек, по ней же одновременно производят отсчет КП, а по секундомеру замечают момент до 1° (практически достаточно до 5—10°). Пузырек уровня служит для удержания визирной плоскости пеленгатора в плоскости вертикала светила, поэтому пеленгатор можно наклонять «на себя» на 10—20° для прямого наведения на светило, но пузырек при этом должен быть точно на нити.

При высотах Солнца, больших 30° (до 45°), применяется откидное зеркало; оно дает отражение светила, которое и пеленгуется — обязательно с приведением середины пузырька на нить; обычно зеркало дает дополнительную ошибку. Следует наблюдать не один, а три пеленга светила и брать среднее из КП и $T_{\text{СКМ}}$. Вместо этого можно производить несколько последовательных «прицеливаний», пока не получится устойчивый результат; при последнем наведении замечают КП и T .

На качке одиовременное совмещение светила и пузырька и взятие отсчета требуют большой тренировки; это может быть выполнено лучше по светилу вблизи горизонта.

При получении сомнительного значения ΔK следует наблюдать КП второго светила с другого репитера.

Ошибки компасного пеленга. Источниками ошибок в КП являются ошибки прибора и ошибки взятия пеленга.

Ошибки прибора возникают от:

погрешностей курсоуказания самого центрального прибора, показывающих отклонения компасного меридиана от истинного и изучаемых в курсах ТСС; погрешности установки репитера, эксцентриситета и люфта пеленгатора, погрешностей установки призмы и зеркала, дающих отклонения компасного пеленга от компасного меридиана.

При регулярном выполнении проверок индивидуальные значения этих ошибок в КП $\approx \pm 0,2 \div 0,3^\circ$ с вероятностью 68%. Однако ошибка в пеленге от применения зеркала меняется в функции от $\text{tg } h$, поэтому при больших высотах небольшие нарушения его установки приводят к значительным ошибкам и при $h > 45^\circ$ применять зеркало не рекомендуется.

Ошибки взятия пеленга возникают от наклона визирной плоскости пеленгатора, ошибок наведения и отсчета и их неодновременности. Основная ошибка возникает от наклона визирной плоскости пеленгатора. Она выражается формулой

$$\Delta A = k \text{tg } h, \quad (194)$$

где k — угол наклона пеленгатора.

При удержании пеленгатора по уровню на стоянке $k = 0,25^\circ$, на ходу — примерно $0,5^\circ$. При высотах до 20° эта ошибка попадает в пределы $m = \pm 0,2^\circ$.

Для неопытного штурмана характерна ошибка от неодновременности наведения и отсчета. Для ее уменьшения требуется регулярная тренировка в измерении компасного пеленга.

От всех перечисленных причин в полученный КП войдет индивидуальная ошибка v , которая далее войдет и в ΔK . В среднем, при соблюдении рекомендаций, она характеризуется величиной

$m'_{\text{КП}}$ относительно компасного меридиана:

$$m'_{\text{КП}} = \sqrt{m_{\text{приб}}^2 + m_{\text{измер}}^2} = \pm 0,3^\circ \quad (195)$$

Точность самого курсоуказания оди-
ночным гирокомпасом, по официальным,
данным, зависит от условий и режима пла-
вания и колеблется в пределах $m_{\text{ГК}} =$
 $= \pm 0,3 \div 1,5'$ (в среднем примем $\pm 0,5'$).
Сравнивая эту величину с $m'_{\text{КП}}$, видим,
что ошибка КП светила меньше точности
курсоуказания, т. е. ошибки гирокомпа-
са превалируют над ошибками КП.

Ошибка КП относительно истинно-
го меридиана составит

$$m_{\text{КП}} = \sqrt{m_{\text{ГК}}^2 + (m'_{\text{КП}})^2} = \pm 0,6^\circ \quad (196)$$

**Точность определения мгновенной
поправки компаса.** Средняя квадратичес-
кая ошибка поправки компаса включает
все перечисленные источники и может
быть подсчитана по формуле

$$m_{\Delta K} = \sqrt{m_{\text{ИП}}^2 + m_{\text{КП}}^2} \quad (197)$$

где $m_{\text{ИП}}^2 = m_{\Delta}^2 + m_{\text{выч}}^2$, т. е. включает ошиб-
ки в A_c от координат и ошибки вычисле-
ний по таблицам, формулам или прибо-
рам.

В § 58 мы установили, что в средних
условиях m_{Δ} от ошибок счисления
составит примерно $\pm 0,1'$. Таблицы
ВАС—58 дают точности вычисления
азимута $\pm 0,1'$, таблицы ТВА—57—
 $\pm 0,1'$; формула $\text{ctg} A$ дает $\pm 0,05'$.

Таким образом, наибольшую ошибку
вычислений дают таблицы ВАС—58,
и для них имеем:

$$m_{\text{ИП}} = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = \pm 0,14'$$

§ 60. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВКИ КОМПАСА

При видимости светил поправка ком-
паса может быть определена в любое
время суток по методу моментов, кото-
рый и представляет общий случай опре-
деления поправки компаса. Точность по-
лучаемой ΔK относительно компасно-
го меридиана порядка $\pm 0,3'$, т. е. не
ниже любых других методов, относи-
тельно же истинного меридиана ΔK оп-
ределяется с точностью $\pm 0,5 \div 1'$. Также
в любое время суток может быть опре-
делена ΔK и методом высот и моментов,

Следовательно, ожидаемая точность
определения поправки компаса может
характеризоваться средними величинами
 $m_{\Delta K}$ и $m_{\Delta K}$.

Относительно компасного меридиана
 $m'_{\Delta K} = \pm 0,3'$

Относительно истинного меридиана
 $m_{\Delta K} = \pm 0,6'$.

Таким образом, ошибка определе-
ния поправки компаса зависит главным
образом от точности курсоуказания, все
остальные ошибки при правильной рабо-
те значительно меньше и поглощаются
ею. Можно считать, что в среднем отно-
сительно истинного меридиана $m_{\Delta K} =$
 $= \pm 0,5'$ при определении как астроно-
мическими, так и любыми другими мето-
дами.

Определение любой поправки может
считаться качественным, если отноше-
ние ее к ошибке определения будет боль-
ше единицы:

$$\frac{\Delta K}{m_{\Delta K}} > 1.$$

Другими словами, можно считать,
что найденная нами поправка состоит
из систематической и случайной состав-
ляющих

$$\Delta K = \Delta \pm m_{\Delta K} \quad (198)$$

Если $m_{\Delta K}$ будет больше или одного
порядка с Δ , то очевидно, что получен-
ный результат находится в пределах
отклонений, вызванных $m_{\Delta K}$, в таких
случаях ΔK принимают равной нулю.
Поэтому полученные на ходу судна по-
правки компаса до $\pm 0,5'$ следует при-
нимать равными $0'$, а в других десятые
доли градусов округлять до ближай-
шего градуса.

но практически она определяется полу-
но — после линий положения.

Мгновенная поправка гирокомпаса
 ΔGK в прибрежном плавании должна
определяться на каждой вахте при по-
стоянном курсе и после перемены кур-
са. Эта отдельно полученная поправка
применяется для контроля принятой по-
стоянной поправки и при исправлении
пеленга около данного момента. В дли-
тельном плавании постоянная поправка
 ΔGK_n определяется для нового курса

как средняя из трех — пяти поправок $\Delta GK'$ за 2,5—3 ч плавания на новом курсе и принимается при исправлении курсов.

В утренние и вечерние вахты поправку можно определять по Солнцу при высотах до 20—30°; днем же при высотах до 45° поправка определяется с откидным зеркалом, но она менее точна, и к ней надо относиться с осторожностью. Ночью поправку можно определять в любое время по звездам, планетам, Луне, но с высотами не более 10—15°. При сильной качке поправку следует определять по светилу с высотой менее 5°. Обработку следует вести всегда по одному, хорошо освоенному пособию, применяя другие, в случае необходимости, как контрольные. При пеленговании края серпа Луны к полученной $KП'$ надо ввести ΔA из табл. 15 МТ—75. т. е. $KП = KП' \pm \Delta A_{\text{пр.кр.}}$

Поправка магнитного компаса определяется после получения $\Delta GK'$ по сличению.

Вычисление истинного азимута светила. В методе моментов после получения φ , δ и t_m азимут может быть вычислен по формуле $\text{ctg } A$ с таблицей логарифмов. Такое решение не имеет ограничений по аргументам, но оно значительно сложнее и длительнее, чем по специальным пособиям, и применяется только в крайних случаях. Для вычисления азимута теперь применяются специальные таблицы, вычислительные приборы или ЭВМ, причем на транспортном флоте распространены таблицы. Специальные таблицы можно разделить на таблицы азимутов и таблицы высот и азимутов.

Таблицы азимутов светил издавались во всех морских странах. У нас были распространены таблицы Бардвуда (1852 г.), Жданко, Эссена, Ющенко (с 1935 г.) и последние — ТИПС—56. Все эти таблицы численные, т. е. дают готовые азимуты с интерполяцией по трем аргументам. Наибольшее распространение у нас имели таблицы «Азимуты светил» А. П. Ющенко, составленные по 10-градусным зонам широты с соответствующей поправкой за $\Delta\varphi$. Кроме таблиц, выпускались номограммы и графики: номограмма Вейра (у нас № 90199), публикуемая в альманахе Рида, графики Шютте и т. п.

С распространением общих таблиц «Высот и азимутов» таблицы азимутов вышли из употребления.

Таблицы высот и азимутов. Для получения h и A в методе линий положения издано большое количество таблиц (см. § 6), из них многие предназначены также и для вычисления азимута. В настоящее время как основные у нас для этой цели применяются таблицы ВАС—58, в некоторых случаях ТВА—57. За рубежом применяют таблицы НО—214, английские НД—486 и др. Помимо таблиц, применяют прибор ARG (в ГДР) и настольные ЭВМ. Ниже рассмотрено определение ΔK с таблицами ВАС—58, ТВА—57 и с ЭКВМ.

Общий порядок определения поправки компаса. Предварительные операции. На намеченное время подобрать светило с высотой до 10° (и не более 20°) с помощью звездного глобуса или на глаз. Если видно только Солнце, определить время, когда его высота примет допустимую величину. Проверить пеленгатор, произвести сличение репитера с путевыми; получить u_{xp} и наметить время пуска секундомера $T_{xp}^n = T_{гр}^n - u_{xp}$.

Наблюдения. Пустить секундомер в намеченное T_{xp}^n . Пронаблюдать серию из трех пеленгов, замечая время $T_{скм}$ до 1° (практически достаточно до 5°) и сбивая каждый раз отсчет; можно применить прием «прицеливания» (см. § 59). Получить навигационную информацию: T_c , $ол$, φ , λ , KK , ΔK .

Обработка наблюдений. 1. Рассчитать средние значения $KП$ и $T_{скм}$, если получен ОКП, обратить его в $KП$.

2. Рассчитать $T_{гр} = T_{гр}^n + T_{скм}$ и с помощью МАЕ получить t_m и δ светила.

3. По аргументам φ , δ , t_m с помощью таблиц ВАС—58 или других (или по ЭКВМ) рассчитать A светила. В круговом счете принять $A = ИП$.

4. Рассчитать $\Delta K = ИП - KП$.

5. Проанализировать ΔK ; полученную мгновенную поправку $\Delta GK'$ сравнить с принятой постоянной ΔK ; расхождения не должны превышать точности курсоуказания (от $\pm 0,3^\circ$ в хороших условиях, до $1,5^\circ$ — в плохих); сравнить $\Delta GK'$ с предыдущим ее определением, при значительных расхождениях проверить вычисления. Если промах не обнаружен, повторить наблюдения. По-

правки до $\pm 0,5^\circ$ обычно не учитывают.

Все определение ΔK не должно занимать больше 10^m .

Определение поправки компаса с таблицами ВАС — 58. Порядок определения поправки компаса рассмотрен выше. Здесь рассмотрим особенности вычисления A по таблицам ВАС — 58. Азимут светила выбирается из основных таблиц как обычно, но интерполируется и по t_m и по δ также по основным таблицам (при $\delta \leq 29^\circ$). Поправка ΔA_ϕ выбирается из табл. 1 ВАС — 58, аналогично выбирается и ΔA_δ при $\delta > 29^\circ$. При точности вычисления A до $0,2^\circ$, достаточной на практике, возможны упрощения. Если $h \leq 22^\circ$, что соответствует выгодным условиям и соблюдается при подборе светила, поправкой ΔA_ϕ можно пренебречь, так как она не пре-

вышает $0,1^\circ$. При этом достаточно входить только в основные таблицы и, интерполируя по t_m и δ , получить A . Точность вычисления A в общем случае около $\pm 0,1^\circ \div 0,2^\circ$.

Рассмотрим определение ΔK по звезде и Солнцу.

Пример 56. 10.05.85 г. в Атлантическом океане около $T_c = 20^h 50^m$ ($\lambda_2 = 3W$) требуется определить $\Delta GK'$.

Решение.

1. До наблюдений. На небе на глаз выбираем звезду Сириус, ее высота менее 15° . Рассчитываем время пуска секундомера: из журнала $u_{xp} = -0^m 32^s$; $T_{гр}^n = T_c + \lambda_2 = 20^h 52^m + 3^h = 23^h 52^m$; $T_{xp}^n = 23^h 52^m 00^s - (-0^m 32^s) = 23^h 52^m 32^s$.

2. Наблюдения. Пустили в намеченное время секундомер, взяли пеленг Сириуса (прицеливанием). $KП = 242,3^\circ$; $T_{скм} = 3^m 19^s$; $T_c = 20^h 55^m$; $ол = 15,7$; $\varphi_c = 31^\circ 38' N$; $\lambda_c = 61^\circ 43' W$; $KK = 234^\circ (+1^\circ)$.

3. Обработка наблюдений:

				A_T	118,1
$T_{гр}^n$	$23^h 52^m 00^s$	t_T	$213^\circ 40,9'$	$\varphi = 32^\circ - 22' N$	$-0,1^\circ$
$T_{скм}$	3 19	Δ'	13 52,0	$\delta = 17^\circ - 18,2 S$	$-0,2^\circ$
$T_{гр}$	$23^h 55^m 19^s$	$t_{гр}^n$	$227^\circ 32,9'$	$l = 65^\circ - 17,2 W$	$+0,2^\circ$
		λ_{xp}	$61^\circ 43'$	$h = 10^\circ 49'$; A_c	$118,0^\circ NW$
		t_m^*	$165^\circ 49,9'$	$\vartheta = 129^\circ$ ИП	$242,0^\circ$
$\delta_* = 16^\circ 41,8' S$		t_*	$256^\circ 52,9'$	КП	$242,3^\circ$
		t_m	$424^\circ 42,5'$	$\Delta GK'$	$-0,3^\circ$
		$t_{пр}$	$64^\circ 42,8' W$	Приняли $\Delta GK' = 0^\circ$	

Пример 57. 11.05.85 г. в Атлантическом океане на вахте 16—20^ч требуется определить $\Delta GK'$ по Солнцу.

Решение.

1. До наблюдений. По $\varphi_c = 30^\circ S$; $\lambda_c = 13^\circ E$ ($\lambda_2 = 2E$) определяем по МАЕ заход Солнца $T_c = 18^h 25^m$, а по глобусу — что с $T_c = 16^h 30^m$ $h_\odot < 20^\circ$; в этот промежуток и можно определить ΔK по Солнцу. Наме-

тили время наблюдений $T_c = 18^h 05^m$; $u_{xp} = -0^m 26^s$.

2. Наблюдения. Перед наблюдениями пустили секундомер: $T_{xp}^n = 16^h 02^m - 0^m 26^s = 16^h 01^m 34^s$. Наблюдали $KП = 292,0^\circ$; $T_{скм} = 2^m 34^s$ (средние из трех наблюдений); $T_c = 18^h 05^m$; $ол = 6,4$; $\varphi_c = 30^\circ 17' S$; $\lambda_c = 13^\circ 20' E$; $KK = 350^\circ (0^\circ)$.

$T_{гр}^n$	$16^h 02^m 00^s$	t_T	$60^\circ 55,2' (+1,0)$	A_T	$113,0'$
$T_{скм}$	2 34	Δt_1	1 08,4	$\psi = 30^\circ + 17' S$	$+0,1'$
$T_{гр}$	$16^h 04^m 34^s$	Δt_2	0,1	$\delta = 18 - 1,1A$	$-0,0$
δ_T	$17^\circ 58,9' (0,6)$	$t_{гр}$	62 03,7	$t = 75 + 23,7W$	$-0,2$
$\Delta \delta$	0,0	λ	13 20	$h = 3 - 21 \cdot A_c$	$112,9^\circ SW$
δ	$17^\circ 58,9' N$	t_M	$75^\circ 23,7' W$	$q = 123^\circ$	ИП 292,9
					КП 292,0
					$\Delta GK' = -0,9'$

Приняли $\Delta GK' = +1'$.

Вычисление азимута по таблицам ТВА — 57. В случаях, когда другие таблицы непригодны (по δ или φ), а также когда требуется точность вычисления A до $1'$ или $0,1'$, что возможно только при наличии обсервованных ко-

ординат, можно применить таблицы ТВА — 57, вычисление с которыми несколько проще, чем по формуле $\operatorname{ctg} A$, но сложнее, чем по ВАС — 58.

Пример 58. По данным примера 57 определить ΔGK по ТВА—57.

Решение

$\delta = 17^\circ 58' 9'' N$	T	60 951		ИП	292,8
$t = 75 23,7 W$	S^+	11 967	T	82406	КП 292,0
$x = 52 09,4 N$	T	72 918	$-$	4244	
$\varphi = 30 17,0 S$			S		$\Delta GK' = +0,8'$
$y = 82 26,4 + 90^\circ = 172^\circ 26,4'$			T	78162	
$A = 67^\circ 10,0' NW$			$+$		
			S	76	
			T	78238	

Вычисление азимута на микрокалькуляторах (ЭКВМ). Для определения A на малых вычислительных машинах удобнее применять формулу (187) в виде, приведенном в § 83, формула (250). Там же приведены правила знаков и порядок решения. По формуле (280) составлена программа для ЭКВМ «Электроника БЗ—34».

Пример 59. По данным примера 57 определить ΔGK по ЭКВМ «Электроника БЗ—34».

Решение.

1. Набираем программу, приведенную в § 83, до 33-й команды. Переходим в режим «автоматическая работа» клавишами F , АВТ и набираем наши данные φ , δ , t , 180° в ячейки A , B , C и 0 по схеме:

- а) $17, \uparrow, 60, \uparrow, 30, \uparrow, (-), П, A$.
 б) $58,9, \uparrow, 60, \uparrow, 17, \uparrow, П, B$.
 в) $23,7, \uparrow, 60, \uparrow, 75, \uparrow, (-), П, C$.
 г) $180, П, 0$.

2. Запускаем машину клавишами B, O , $C/П$.

3. Считываем:	$A = 292,832$	ИП	292,8
		ГКП	292,0
		$\Delta GK'$	$+0,8'$

Вычисление азимута светила и поправки компаса по формуле $\operatorname{ctg} A$. Вычисление азимута по формулам и таблицам логарифмов (табл. 5 МТ—75) применяется при отсутствии на судне таблиц ТВА—57 и непригодности ВАС—58 (по склонению или широте). Вычисления ведутся по формуле $\operatorname{ctg} A$. Правила ее исследования, схема вычислений и пример рассмотрены выше в § 4 (пример 4). Ошибка m_A вычисления этим приемом с МТ—75 не превышает $\pm 0,1'$.

Определение поправки компаса по методу высот и моментов. В этом способе для расчета A требуется получить δ , t и h , т. е. получить высоту светила на момент взятия $KП$. Эта высота получается расчетом. В общем случае метод высот и моментов рационально применять

только совместно с линией положения, как бы попутно, в следующем порядке.

При выборе условий наблюдений последней линии положения подобрать светило с высотой, меньшей 20° . Для Солнца это связано с изменением времени его наблюдения; для звезд надо наблюдать звезду с $h < 20^\circ$ последней. После окончания наблюдений высот (ос, $T_{\text{скм}}$) этого светила взять его пеленг, обычно «прицеливанием», и заметить момент по тому же секундомеру (КП, $T_{\text{скм}}$). После вычислений линии по ВАС—58 разность показаний секундомера для линии положения и КП пере-

вести в градусную меру и азимут по основным таблицам ВАС—58 проинтерполировать на эту величину. Полученная ΔA_i придается со своим знаком к A_c , вычисленному ранее для линии положения. Этот A переводят в ИП и получают $\Delta K = \text{ИП} - \text{КП}$.

Если вычисления велись не по ВАС—58, то величина ΔA_i получается из табл. 18 МТ—75 (где приведены $\Delta A'$ за 10^c времени по φ , A , h), умножением на $0,1\Delta T^c$, т. е.

$$\Delta A'_i = \Delta A' \cdot 0,1\Delta T^c.$$

§ 61. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВКИ КОМПАСА ПО АЗИМУТУ ВОСХОДА (ЗАХОДА) СОЛНЦА И ПО ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЕ

При некоторых частных положениях светила расчет истинного азимута и определение ΔK упрощаются. К таким случаям можно отнести положение Солнца в момент истинного или видимого восхода и захода, когда можно применить более простой метод высот, а также положение Полярной звезды около полюса мира, для которого можно применить упрощенный метод высот и моментов.

Азимуты истинного восхода (захода) светила получаются по формуле (188) при $h = 0$, т. е. $\cos A = \sin \delta \sec \varphi$; по ней составлена номограмма — приложение 7 к МТ—75. Истинный восход Солнца (C_1 на рис. 95) происходит в момент, когда его нижний край поднимается над видимым горизонтом примерно на $\frac{2}{3} D$. Однако определение ΔK этим приемом теперь почти не применяется.

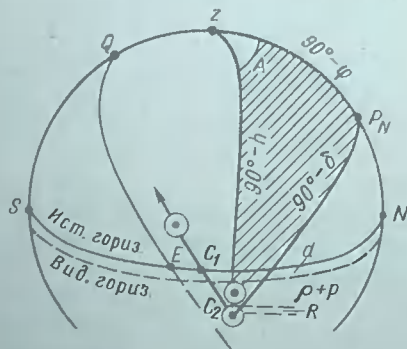


Рис. 95

Определение поправки компаса в момент видимого восхода или захода верхнего или нижнего края Солнца. Явление видимого восхода (захода) рассмотрено в § 31, где установлено, что в момент касания верхним краем Солнца горизонта (см. рис. 95) высота центра Солнца

$$h = -d - \rho_0 + \rho - R_{\odot}$$

Наклонение d зависит от принятого в таблицах возвышения глаза наблюдателя e . В МТ—53 принималось $e = 20$ фут (6,1 м), в МТ—63 приняли $e = 0$, в МТ—75 — $e = 12$ м, при котором $d = -5,1'$, поэтому

$$h_{\odot} = -6,1' - 35,8' = 16,0' + 0,1' = -57,8'$$

С этой высотой и рассчитаны таблицы в МТ—75 (табл. 20-а, б).

Построив параллактический треугольник (см. рис. 95) и применив формулу косинуса стороны к стороне $P_N C_2$, получим

$$\sin \delta = \sin h \sin \varphi + \cos h \cos \varphi \cos A,$$

откуда

$$\cos A = \frac{\sin \delta - \sin h \sin \varphi}{\cos h \cos \varphi}. \quad (199)$$

Заменяя $\cos A = 1 - 2 \sin^2 \frac{A}{2}$ более выгодной функцией $\sin^2 \frac{A}{2}$ и учитывая, что $\sin \varphi \sin h + \cos \varphi \cos h =$

$= \cos(\varphi - h)$, после преобразований получим

$$\sin^2 \frac{A}{2} = \frac{\cos(\varphi - h) - \sin \delta}{2 \cos \varphi \cos h}. \quad (200)$$

По этой формуле азимут рассчитывался в таблицах МТ — 43, МТ — 53 и МТ — 63. В МТ — 75 для удобства расчетов получена функция тангенсов, для чего проделаны следующие преобразования.

Заменяя $\cos A = 1 + 2\cos^2 \frac{A}{2}$, после преобразований, аналогичных показанным выше, получим

$$\cos^2 \frac{A}{2} = \frac{\cos(\varphi + h) + \sin \delta}{2 \cos \varphi \cos h}. \quad (201)$$

Поделив формулу (200) на (201) и выделив искомое A , получим

$$A = 2 \arctg \sqrt{\frac{\cos(\varphi - h) - \sin \delta}{\cos(\varphi + h) + \sin \delta}}. \quad (202)$$

Подставив значение $h = -57.8'$, получим рабочую формулу

$$A = 2 \arctg \sqrt{\frac{\cos(\varphi + 57.8') - \sin \delta}{\cos(\varphi - 57.8') + \sin \delta}}. \quad (203)$$

По этой формуле вычислены: табл. 20-а МТ — 75 — для одноименных φ и δ и табл. 20-б МТ — 75 — для разноименных φ и δ . Эти таблицы составлены для φ от 0 до 72° и δ до 24°. Азимут приведен в полукруговом счете: первая буква — по широте, вторая — по положению Солнца (E — восход, W — заход).

Примечание. В МТ — 63 азимут рассчитан для $e = 0$ и отличается от A в МТ — 75, для уточнения приведены табл. 20-в, г МТ — 63, по которым получается поправка ΔA_h за высоту глаза, температуру и давление.

В иностранных таблицах (и в приложении 7 МТ — 75) приводятся таблицы азимутов истинного восхода (захода). Иногда азимуты считаются от E и W до светила и называются amplitudes. В дополнительной таблице дается поправка азимута за d , ρ , r для приведения центра на истинный горизонт. Эти таблицы применимы для всех светил, но в общем неудобны.

Порядок работы при определении ΔK по восходу (заходу) Солнца.

1. Рассчитать время видимого восхода (захода) Солнца с φ_c и λ_c на предполагаемое время явления.

2. Понаблюдать пеленг Солнца в момент появления (или погружения) на горизонте его верхнего края.

3. Заметить момент T_c до 5^м, рассчитать $T_{гр}$ и выбрать из МАЕ $\delta_{\odot}$ до 0,1°. На этот же момент снять φ_c до 0,1°, а в высоких широтах — до 3'.

4. Войти в табл. 20-а (при одноименных φ и δ) или 20-б (при разноименных) и выбрать ближайшее к φ и δ значение A_t . Проиентерполировать азимут по δ и φ и придать поправки к A_t . Полученному азимуту приписать наименование в полукруговом счете и перевести его в круговой счет.

5. Рассчитать $\Delta K = ИП - КП$.

6. Проанализировать ΔK сравнением с принятой ранее и оценить возможные ошибки определения ΔK .

Достоинствами этого способа являются простота вычислений и выгодные условия наблюдений; недостатками же — меньшая точность в $КП$ за счет односторонности наблюдения и приближенности самого явления и в A — за счет интерполирования. Кроме того, способ применим только дважды в сутки, в течение коротких интервалов, которые легко пропустить. Поэтому во всех случаях лучше взять $КП_{\odot}$ перед заходом на малой высоте и обработать общим приемом.

Пример 60. 10.05.85 г. в Балтийском море определять $\Delta GK'$ по заходу Солнца.

Решение

1. До наблюдений. По $\varphi = 60^{\circ}15'N$; $\lambda = 19^{\circ}E$ ($M_0 = 4E$) рассчитали время захода Солнца $T_c = 23^{\circ}06^m$.

2. Наблюдения. В момент захода верхнего края Солнца $КП_{\odot} = 310,5^{\circ}$; $T_c = 23^{\circ}07^m$; $\varphi_c = 60^{\circ}22'N$; $\lambda_c = 19^{\circ}08'E$; $KK = 175^{\circ}(W)$.

3. Обработка наблюдений:

T_c	$23^{\circ}07^m$	δ_t	$17^{\circ}45,4' (0,6)$
M_0	4	$\Delta \delta$	$+0,1$
$T_{гр}$	$19^{\circ}07^m 10.05$	$\delta_{\odot}$	$17^{\circ}45,5' N$
A_t	49,7° (табл. 20-а)		
ΔA_{φ}	-0,6		
ΔA_{δ}	+0,6		
A	49,7NW		
$ИП$	310,3°		
GKK	310,5°		

$$\Delta GK = -0,2^{\circ}$$

Оставляем $\Delta K = 0^{\circ}$.

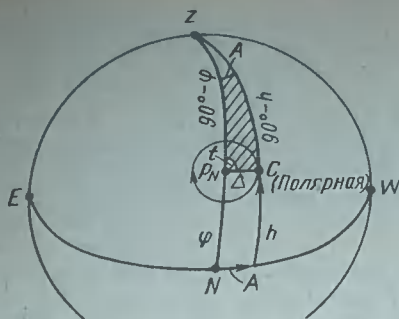


Рис. 96

Определение поправки компаса по наблюдениям Полярной звезды. Полярная звезда (α Ursae Minoris) описывает в суточном движении параллель весьма малого сферического радиуса $\Delta \approx 48'$ (рис. 96, построенный на плоскости 1-го вертикала). Вследствие этого в широтах до $35^\circ N$ азимут Полярной звезды изменяется всего от 0 до $1^\circ NE$ и NW , а в широтах до 70° — от 0 до $2,5^\circ$. Поэтому формула для вычисления A может быть упрощена. Из параллактического треугольника $P_N Z C$ имеем

$$\frac{\sin A}{\sin \Delta} = \frac{\sin t}{\cos h}$$

или, учитывая, что $t_m = S_m - \alpha$ или $t_m = S_m + \tau$, получим

$$\sin A = \sin \Delta \sec h \sin (S_m + \tau).$$

По малости полярного расстояния Δ и азимута A заменим синусы их первыми членами ряда, а h примем равной φ , так как их разность не превысит $50'$. Вводя упрощения, получим

$$A = \Delta \sec \varphi \sin (S_m + \tau). \quad (264)$$

По этой формуле, принимая для данного года средние значения Δ и τ Полярной (на 1985 г. $\Delta = 48'$ и $\tau = 326^\circ 07'$) в МАЕ вычислены таблицы «Азимут Полярной» для широт от 5 до 70° с точно-

стью до $1'$. Аргументами для входа в таблицу служат местное звездное время S_m и широта места, приведенные через 5° . Правило наименования азимута указано внизу таблиц (после верхней кульминации — NW до — NE).

Получение поправки компаса по Полярной: наблюдают три пеленга ее, замечают T_c до 1^m (для практики этого достаточно, хотя таблицы и дают точность $1'$ — для транспортного флота ненужную) и снимают координаты φ , λ до $1'$. Из МАЕ выбирают $t_{гр}^V$ и, получив S_m , входят в таблицу на с. 276 и выбирают A . Затем переводят его в круговой счет и получают ΔK . Этот способ применим для северных широт от 5 до 20° для пеленгования без зеркала и до 45° — с зеркалом; при больших высотах ΔK ненадежна. При наличии яркой звезды на малой высоте следует предпочитать общий случай определения ΔK .

Полярная звезда полезна для приближенной ориентировки — можно считать ее расположенной на N .

Пример 61. 12.05.85 г. в Южно-Китайском море определить $\Delta K'$ по Полярной.

Решение.

1. Наблюдали Полярную: $KП = 359,5^\circ$; $T_c = 2^h 15^m (\lambda_0 = 9E)$; $ол = 15,4$; $\varphi_0 = 18^\circ N$; $\lambda_0 = 116^\circ E$; $\angle K K' = 190^\circ (+1^\circ)$.

2. Обработка наблюдений:

T_c	$2^h 15^m 12,05$	i_T	$124^\circ 25,2'$
λ_0	9	Δt	3 45,6
$T_{гр}$	$17^h 15^m 11,05$	$i_{гр}^V$	$128^\circ 10,8$
		λ	116
		i_m^V	$244^\circ 10,8'$
A	$0^\circ 26' NE$ (МАЕ, с. 276)		
$ИП$	$360,4^\circ$		
$KП$	$359,5$		
$\Delta K'$	$+0,9^\circ$		

Оставляем $\Delta K = +1^\circ$.

§ 62. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА

Для земного наблюдателя исходным направлением является направление его поля тяготения, т. е. направление отвесной линии. Поэтому для определения места наблюдателя на Земле надо определить положение отвесной линии в пространстве и найти точку пересечения ее с поверхностью Земли; координаты этой точки и представят географические координаты места судна. При построении сферы отвесная линия O_1M (рис. 97) переносится параллельно в центр O сферы¹ и проектируется на сферу в точку z_m зенита, который и представит положение отвесной линии данного наблюдателя. Задача определения места сведется теперь к определению положения зенита относительно мест светил с последующим переходом обратно на поверхность Земли.

Связь между местом судна и положением его зенита. Зенит представляет проекцию на небесную сферу места наблюдателя M на геоиде, полученное построением при центре сферы линии Oz_m (см. рис. 97), параллельной отвесу O_1M наблюдателя M . Географические координаты φ и λ этого наблюдателя и небесные координаты его зенита δ_z и $t_{гр}^{св}$ связаны соотношениями, вытекающими из рис. 97. Угол O равен углу O_1 по построению, т. е. $\varphi = \delta_z$. Долгота места λ равна дуге Q_0Q небесной сферы (дуга, измеряющая двугранный угол λ). Дуга Q_0Q , равная λ , может быть получена как разность $S_M - S_{гр}$ или $t_m^{св} - t_{гр}^{св}$. Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \delta_z; \\ \lambda &= S_M - S_{гр} = t_m^{св} - t_{гр}^{св}, \end{aligned} \right\} \quad (205)$$

т. е. географическая широта места наблюдателя равна склонению его зенита, а географическая долгота места — разности времен, например $S_M - S_{гр}$, или разности часовых углов $t_m - t_{гр}$.

¹По отвесной линии определяется астрономическая широта, по нормали к референц-эллипсоиду — геодезическая, в которой строятся карты. Ввиду малого их различия в море (менее 3") введены обобщающие — географические координаты φ и λ .

Вследствие суточного вращения сферы место зенита непрерывно перемещается по параллели, а при перемещении наблюдателя — и в направлении его движения, поэтому при наблюдениях должно получаться мгновенное место зенита на замеченный момент $T_{гр}$. Если в частном случае какое-либо светило F (см. рис. 97) может проходить через зенит места, то в момент его верхней кульминации имеем $h = 90^\circ$ и $t_m = 0^\circ$, откуда

$$\varphi = \delta_{св}; \quad \lambda = t_{гр}^{св}. \quad (206)$$

т. е. географические координаты места равны геоцентрическим координатам светила при $h = 90^\circ$. Этот частный случай — простейшее определение места по наблюдениям светила.

Принципы определения места зенита. Для определения мгновенного места зенита z и, следовательно, места судна необходимо иметь данные измерений о его расположении относительно мест двух светил C_1 и C_2 (рис. 98) или одного C_1 . В навигации физические величины U , являющиеся функциями координат φ и λ , называются навигационными параметрами:

$$U = f(\varphi; \lambda). \quad (207)$$

Для определения места по светилам надо измерить не менее двух навигационных параметров U_1 и U_2 . Это могут быть: высоты или зенитные расстояния, скорости изменения высот, разность вы-

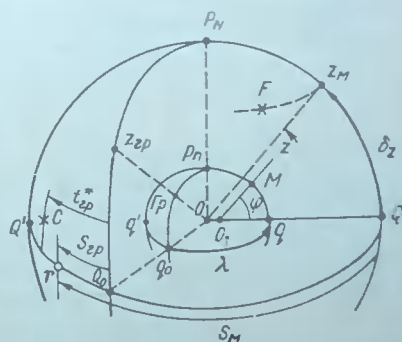


Рис. 97

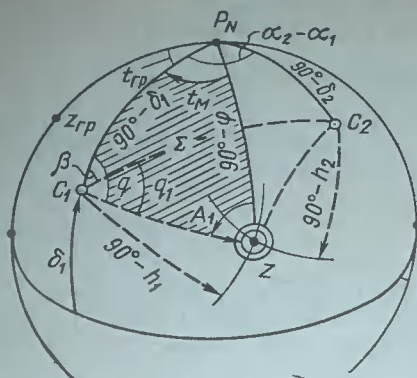


Рис. 98

сот, сумма высот, азимуты, разность азимутов, скорости изменения азимутов, параллактические углы. Можно измерять как два одинаковых параметра, так и различные их комбинации. При всех измерениях фиксируется также время $T_{гр}$. Из всех этих параметров современные инструменты позволяют измерять высоты светил и разности азимутов. На транспортном флоте применяются пока только наблюдения высот, для выполнения которых имеется надежный и простой инструмент — секстан. Наблюденные навигационные параметры должны быть обработаны и полученное место судна перенесено на карту. Весь процесс наблюдений и их обработки часто называют *астрономической обсервацией*, а полученное место — *обсервованным*.

Схема получения места или его координат показана на рис. 99. Обработка наблюдений, т. е. определение места по измеренным параметрам, может быть выполнена следующими методами: графическим, графоаналитическим, аналитическим и инструментальным.

Графические методы обработки наблюдений. Графические методы основываются на принципе *навигационных изолиний*, т. е. линий на глобусе или карте, отвечающих равным значениям измеренного навигационного параметра. Если значение этого параметра U_0 измерено на судне, то место судна находится на данной навигационной изолинии. Для получения места зенита на сфере или места на карте нужно построить не менее двух навигационных изолиний и иметь дополнительную информацию, например M_c (или другой параметр). Тогда в точке пересечения изолиний около M_c — искомое место, другие точки пересечения отбрасываются (см. рис. 104, а).

В случаях простейших кривых, например если изолинии — окружности, они строятся при обработке наблюдений; для сложных кривых сетки изолиний строятся заранее, например карты систем Декка, Лоран, астрографии и др. При обработке из множества кривых выбираются равные измеренным параметрам около счислимого места, т. е. навигационные изолинии (см. рис. 104, а).

Графоаналитические методы обработки наблюдений. В основе этих ме-

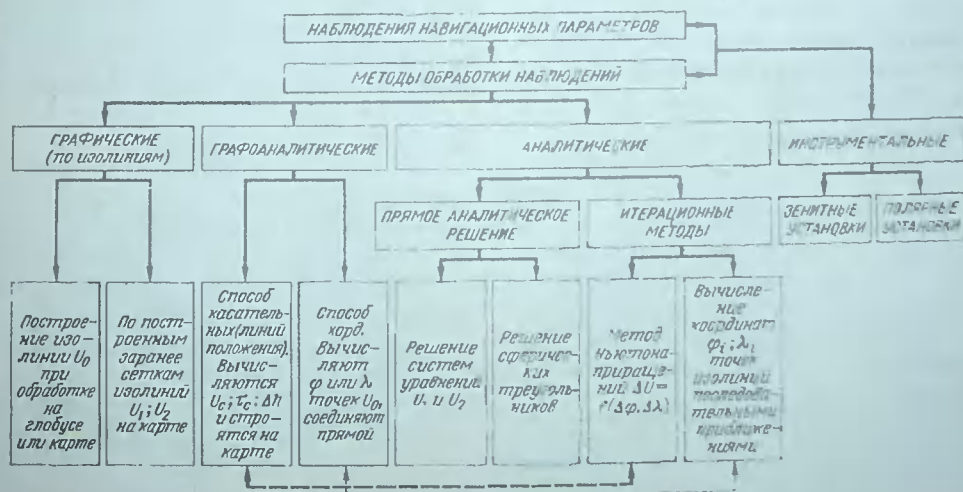


Рис. 99

толов лежит принцип линий положения, представляющих касательные к изолиниям, уравнения которых получаются как первые члены разложения в ряд уравнения данной навигационной изолинии. При этом изолиния заменяется отрезком прямой, называемой *линией положения*. Данные для построения линий вычисляются аналитически, после чего линии прокладываются на карте, и в точке их пересечения получается место судна. Линия положения может строиться либо как касательная, либо как хорда. В мореходной астрономии теперь применяется только метод касательных — высотных линий положения (ВЛП, см. рис. 105), а в навигации — оба метода.

Аналитические методы обработки наблюдений. По двум или более измеренным параметрам U_1 и U_2 составляются уравнения вида

$$U_1 = f(\varphi; \lambda); \quad U_2 = f(\varphi; \lambda). \quad (**)$$

Из этих уравнений можно определить обе искомые координаты φ и λ ; если число уравнений больше двух, то задача решается методом наименьших квадратов и получают уточненные — вероятнейшие — координаты $\varphi_{\text{в}}$ и $\lambda_{\text{в}}$. Если выполнено одно наблюдение, то можно определить только одну координату φ или λ , другая считается известной.

Возможны два пути решения уравнений (**): прямой аналитический и итерационные методы. В случае измерения двух высот светил уравнения (**) можно записать из треугольников $P_{\text{НЗ}}C_1$ и $P_{\text{НЗ}}C_2$ (см. рис. 98):

$$\left. \begin{aligned} \sin h_1 &= \sin \varphi \sin \delta_1 + \\ &+ \cos \varphi \cos \delta_1 \cos(t'_{\text{г}} + \lambda); \\ \sin h_2 &= \sin \varphi \sin \delta_2 + \\ &+ \cos \varphi \cos \delta_2 \cos(t''_{\text{г}} + \lambda). \end{aligned} \right\} \quad (207)$$

Определение φ и λ по высотам двух светил носит название «задачи двух высот», и ее решению посвящено много работ в XVIII — XIX вв., и особенно в последнее время в связи с появлением ЭВМ.

Прямое аналитическое решение задачи двух высот выполняется либо путем решения систем уравнений (207), либо

путем последовательного решения трех сферических треугольников (см. рис. 98); одно из таких решений было дано Гауссом в 1808 г. Многочисленные варианты прямого аналитического решения слишком сложны для «ручных» вычислений и привлекли внимание только после появления ЭВМ.

Итерационные методы аналитического решения задачи двух (и более) высот представляют решения уравнений (207) или производных от них методами последовательных приближений. Обычно применяются два варианта решений: методом касательных (Ньютона) и методом последовательного вычисления координат точек изолиний.

Метод касательных представляет аналитический вариант метода линий положения. Уравнение (207) изолинии разлагают в ряд Тейлора и берут первые члены ряда. Решая два таких уравнения, получают $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ и далее $\varphi' = \varphi_c + \Delta\varphi$ и $\lambda' = \lambda_c + \Delta\lambda$. С этими координатами задача решается вторично и т. д. При обычных ошибках счисления достаточно одного приближения (редко двух). При большом числе наблюдений и уравнений применяют МНК или его обобщенный вариант и получают вероятнейшие $\varphi_{\text{в}}$ и $\lambda_{\text{в}}$. Этот метод пригоден для любых линий положения и при любом их числе, почему и применен в большинстве действующих сейчас навигационных ЭВМ.

Во втором методе — последовательного вычисления координат точек изолиний — в первое уравнение $U_1 = \sin h_1$ подставляют φ_c и вычисляют λ_1 точки на U_1 ; эта долгота подставляется в U_2 и рассчитываются φ_1 точки на ней и так далее, пока разность координаты с предыдущей не станет менее заданной величины. Определения φ или λ по измеренной высоте представляют варианты этого приема.

Инструментальные методы определения места. Определение места наблюдателя можно выполнить надлежащей установкой прибора (системы) в пространстве с одновременной отметкой места зенита и времени. В этом случае наблюдения параметров и их обработка почти полностью совмещены. Возможны два варианта установок: зенитная и полярная. При зенитной установке места

звезд на звездной карте совмещают с направлениями на звезды C_1 и C_2 , расположенные около зенита, и по проекции отвесной линии (например, по уровню) замечают место зенита z_m . С рамок карты получают φ' и S'_m и далее $\lambda = S'_m - S_{гр}$, где $S_{гр}$ вычисляется по полученному $T_{гр}$. В частном случае (при прохождении звезды через зенит) применяют формулы (206).

На этом принципе был основан ряд приборов, например «зенитомер» А. А. Михайлова (1944 г.), «Ночной определитель места» Л. Рандича (1956 г.). В измененном виде подобный принцип применен в двухзвездном секстане Хогга, в навигационной системе GEON и др.

При варианте *полярной установки* места звезд на карте (помещенной в трубе) совмещаются с околополярными звездами C_1 и C_2 и измеряется угол $90^\circ - \varphi$ наклона трубы к отвесной линии zM , полученной, например, по уровню, а также угол поворота точки Овна на карте от меридиана наблюдателя, т. е. S_m . Далее получают $\lambda = S_m - S_{гр}$. На этом принципе предлагался ряд приборов — гиросирот, сферант, вычислитель Хегнера и др.

Подобные приборы на транспортном флоте пока не применялись из-за невозможности одновременных совмещений на подвижной платформе и неточности результата. Возможно, в автоматическом режиме их использование окажется реальнее.

§ 63. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛИНИЙ В АСТРОНОМИИ. КРУГ РАВНЫХ ВЫСОТ

Каждому навигационному параметру на сфере, земной поверхности и карте соответствует *изолиния*, т. е. геометрическое место точек равных значений данной величины. Изолинию можно построить на сфере или карте или задать

уравнением вида $U = f(\varphi; \lambda)$, где U — навигационный параметр, постоянный для данной изолинии; φ и λ — текущие координаты точек изолинии. В мореходной астрономии могут применяться изолинии, приведенные в табл. 8.

Таблица 8

№ п/п	Навигационный параметр	Изолиния	Уравнение изолинии на сфере
1	Высота (h)	Круг равных высот (сферическая окружность)	$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \times \times \cos t_m = \cos z$
2	Разность высот (Δz)	Сферическая гиперболла	$\Delta z = \arccos z_2 - \arccos z_1$
3	Сумма высот (Σz)	Сферический эллипс	$\Sigma z = \arccos z_1 + \arccos z_2$
4	Скорость изменения высоты (ω_h)	Высотная изоскора	$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{ctg} q \sin t \sec \delta + \operatorname{tg} \delta \cos t;$ $\sin q = -\omega_h \sec \delta$
5	Азимут (A)	Изоазимута	$\operatorname{ctg} A = \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t -$ $-\sin \varphi \operatorname{ctg} t$
6	Разность азимутов (ΔA)	Сферическая изогона	$\Delta A = \arccos \operatorname{ctg} A_2 - \arccos \operatorname{ctg} A_1$
7	Скорость измерения азимута (ω_A)	Азимутальная изоскора	$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{ctg} q \sin t \sec \delta + \operatorname{tg} \delta \cos t;$ $\cos q = \omega_A \left(\frac{\cos h}{\cos \delta} \right)$
8	Параллактический угол (q)	Ортодромия	$\operatorname{ctg} q = \operatorname{tg} \varphi \cos \delta \operatorname{cosec} t -$ $-\sin \delta \operatorname{ctg} t$

Изолиния, соответствующая изменению на судне параметру U_0 , называется навигационной изолинией, и на ней находится место судна. Одна из точек пересечения двух навигационных изолиний дает место судна. Для устранения неопределенности необходимо располагать дополнительной информацией (например, близостью к M_c , направлением и т.п.). Рассмотрим подробно изолинии высоты.

Полус освещения и его координаты.

Пусть на поверхность Земли, независимо от ее формы, падает пучок параллельных лучей (рис. 100) от светила B . (Непараллельность лучей — параллакс — устраняется при исправлении высот введением поправки Δh_p .) Один из лучей BO_1 совпадает с направлением отвесной линии O_1b . Точка b на Земле, в которой луч от светила пересекает земную поверхность по направлению отвесной линии (т. е. светило видно в зените), называется *полусом освещения*. Другими словами, точка b — проекция светила по отвесной линии на земную поверхность, отсюда ее другое название — *географическое место светила* (для ИСЗ — подспутниковая точка).

Географические координаты полюса освещения b представлены на рис. 100: угол O_1 между отвесной линией и плоскостью экватора — географическая широта φ_b ; двугранный угол q_0Od — между плоскостями гринвичского и данного меридиана — географическая долгота λ_b . Построим при центре Земли O небесную сферу и в ее центр перенесем отвесную линию BO_1 , получим направление OB , параллельное лучам светила, и точку B — места светила на сфере; геоцентрические координаты светила δ_B и $t_{гр}^B$. Угол O_1 равен углу O , а двугранный угол q_0Od измеряется дугой сферы $Q_0D = t_{гр}^B$, следовательно,

$$\varphi_b = \delta_B; \lambda_b = t_{гр}^B \quad (208)$$

т. е. географические координаты φ_b, λ_b полюса отвесения на Земле равны экваториальным координатам $\delta_B, t_{гр}^B$ светила на сфере. Это вытекает также и из формулы (206).

Величины δ_B и $t_{гр}^B$ выбираются из МАЕ на данное $T_{гр}$. По ним можно нанести географическое место светила на

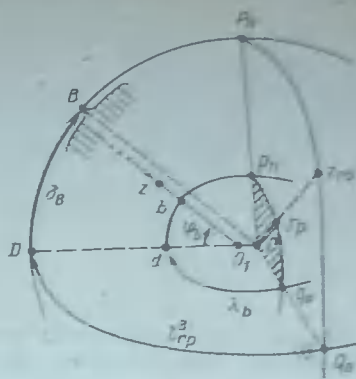


Рис. 100

карту или глобус. Так как $t_{гр}$ всех светил с течением времени непрерывно возрастают, то их полюсы освещения перемещаются по Земле к западу со скоростью суточного вращения Земли.

Круг равных высот. Рассмотрим, как и выше, пучок параллельных лучей от светила B , падающих на поверхность Земли (рис. 101), имеющей форму геоида. Для наблюдателя M_1 с отвесной линией M_1z' светило B имеет высоту h или зенитное расстояние z . Наблюдатель в точке M_2 также видит светило B на высоте h .

На Земле можно найти еще множество точек M_1 , в которых высота h имеет одно и то же значение; все они лежат на изолинии M_1M_2 .

Кругом равных высот (изолинией высоты) называется геометрическое место точек земной поверхности, в которых данное светило в один и тот же момент падает на одинаковой высоте. Учи-

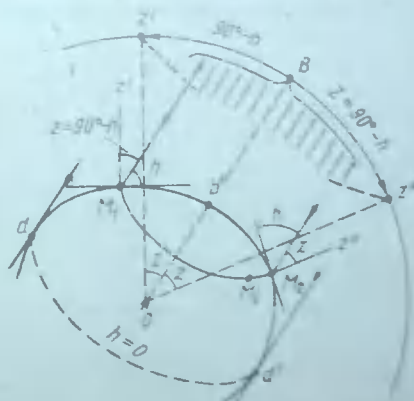


Рис. 101

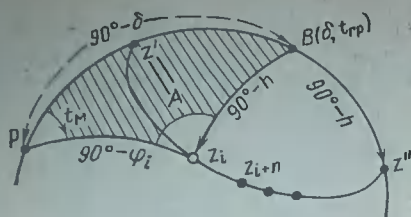


Рис. 102

таявая отклонения отвеса и форму Земли, круг равных высот на реальной земной поверхности представляет сложную кривую. На поверхности же сферы без учета отклонений отвеса—это малый круг.

На небесной сфере (см. рис. 101) с центром в точке O круг равных высот представляет геометрическое место зенитов z' , z'' ... наблюдателей, имеющих равные высоты. Так как при построении от направления луча OB при центре сферы следует откладывать равные зенитные расстояния z (или равные высоты h), то получается коническая поверхность, которая в сечении со сферой дает малый круг $z'z''$ со сферическим радиусом $z = 90^\circ - h$ и центром в месте светила B . Следовательно, на небесной сфере круги равных высот представляют малые круги, кроме круга радиуса $z = 90^\circ$, представляющего большой круг. Если в первом приближении принять Землю за шар, то большой круг dd' , образованный лучами, касательными к Земле, и имеющий полюс в точке b' (полюс освещения для шара), представляет границу освещенности Земли данным светилом ($h = 0$), отсюда термин — полюс освещения. Остальные круги рав-

ных высот представляют малые круги радиуса $z = 90^\circ - h$ с центром в полюсе освещения. От точки b' до круга dd' высота светила изменяется от 90° до 0 , т. е. на $5400'$, а на земном шаре это расстояние 5400 миль, следовательно, одна минута изменения высоты равна морской миле.

Если на судне измерить высоту светила, то среди множества кругов равных высот только один — M_1M_2 соответствует измеренной высоте, и на нем находится место наблюдателя. Следовательно, навигационной изолинией судна является круг равных высот, отвечающий измеренной на судне высоте светила. Однако только на поверхности сферы или земного глобуса круги равных высот можно строить как окружности радиуса z . На реальной поверхности Земли, а также на карте изолинии высот представляют более сложные кривые, и их построение усложняется.

Уравнение круга равных высот на сфере. Возьмем на круге равных высот произвольную точку z_i (рис. 102) и построим для нее параллактический треугольник Pz_iB , в котором $Pz_i = 90^\circ - \varphi_i$ и $t_m = t_{rp} + \lambda_i$. По формуле косинуса стороны Bz_i имеем

$$\sin h = \sin \varphi_i \sin \delta + \cos \varphi_i \cos \delta \cos (t_{rp} + \lambda_i). \quad (209)$$

Применяя эту формулу для других точек z_{i+n} круга, видим, что δ , t_{rp} и $90^\circ - h$ остаются постоянными, а φ_i и λ_i меняются. Следовательно, δ , t_{rp} и $90^\circ - h$ представляют параметры круга (координаты центра и радиус), а φ_i и λ_i — текущие координаты точек круга. Если, не изменяя параметров, задаваться значениями одной из координат, положим λ_i , то из уравнения (209) можно определить другую координату φ_i точек, лежащих на круге равных высот. Поэтому формулу (209) называют уравнением круга равных высот на сфере.

Уравнение круга равных высот на меркаторской карте. На карту в меркаторской проекции круги равных высот переносятся с соответствием по нормальям и изображаются так называемыми циклическими кривыми трех типов (рис. 103). Уравнения их в координатах y и x имеют следующий вид:

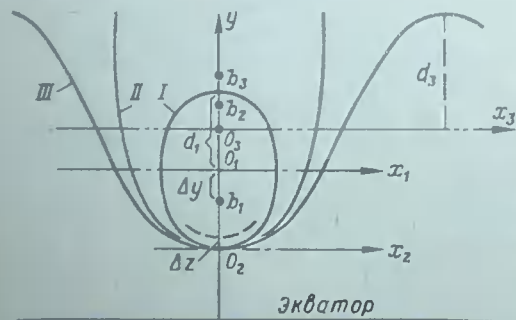


Рис. 103



Рис. 104

I — для круга, не включающего полюс (начало координат O_1 , полюс освещения b_1):

$$\operatorname{ch} y = \cos x_1 \operatorname{ch} d_1; \quad (210)$$

II — для круга, проходящего через полюс (O_2 ; b_2):

$$e^{-u} = \cos x_2 = \cos A; \quad (211)$$

III — для круга, включающего полюс (O_3 ; b_2):

$$\operatorname{sh} y = -\cos x_3 \operatorname{sh} d_3; \quad (212)$$

где y и x_i — прямоугольные координаты на меркаторской проекции;

d_i — радиус кривых;

$\operatorname{sh} x$, $\operatorname{ch} x$ — гиперболические функции.

Кривые II и III типов, а также I типа для небольших высот имеют малую кривизну, что позволяет заменять их касательными в пределах 30 миль без заметных погрешностей (иногда с небольшими поправками).

Графические методы определения места по кругам равных высот. На рис. 99 показаны два графических метода обработки. При определении по кругам равных высот можно применить построение кругов на земном глобусе и на небесной сфере, где применимы также сетки изолиний (астрографики).

Определение по кругам равных высот на земном глобусе. Для определения места на земном глобусе надо измерить высоты двух светил и заметить $T_{\text{хр}}$. По полученным $T_{\text{гр}}$ выбрать из МАЕ δ и $t_{\text{гр}}$ светил, которые по выражению (208) являются координатами полюсов освещения, т. е. центров кругов. Нанеся на глобус полюса освещения b_1 и b_2 (рис. 104, а), проводим из них дуги ра-

диусом $z_1 = 90^\circ - h_1$ и z_2 в масштабе глобуса. В одной из точек пересечения — ближайшей к M_0 и получим место судна на глобусе. Для решения с точностью до 1' диаметр глобуса должен быть около 7 м. Этот принцип определения применим практически только в одном случае: при определении места в малых широтах (до 25°) по высотам Солнца, большим 88° . Здесь окружности можно строить на карте с погрешностями менее $0,5'$.

Определение по кругам равных высот на небесной сфере. Произведем наблюдения высот двух светил C_1 и C_2 (рис. 104, б) и заметив моменты времени, из мест светил на сфере проводим круги равных высот радиусами z_1 и z_2 . В одной из точек пересечения их получим место зенита z_m . В соответствии с равенствами (205) склонение зенита равно широте места, а сняв на глобусе у меридиана наблюдателя (у точки Q) S_m и рассчитав $S_{\text{гр}}$ (по $T_{\text{гр}}$), получим $\lambda = S_m - S_{\text{гр}}$. Подобный принцип определения места применен в астрографиках. При точном решении места светил C_1 и C_2 должны наноситься по δ и t на момент наблюдений. На звездном глобусе эти места относятся к прошедшей эпохе, поэтому решение неточное.

Астрографики. Системы изолиний высот двух-четырёх звезд могут быть построены заранее, скажем, через $10'$. Участки небесной сферы с этими кривыми, изображенные на карте в меркаторской или другой проекции, называются астрографиками. Боковая рамка карты дает $\varphi = \delta_z$, а нижняя — S_m (рис. 104, в). Выполнив измерения высот h_1 и h_2 этих звезд, на астрографике отыскиваются кривые, соответствующие observed heights, приводятся к одному моменту и зениту, и в точке

их пересечения получается место зенита в координатах φ и Δ . Полученное место перемещается за изменение координат звезд на данную дату.

В СССР с 1937 по 1955 г. был выпущен ряд астрографиков; действие последних выпусков прекратилось в 1975 г., и в настоящее время они не применяются.

§ 64. МЕТОД ЛИНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ. ВЫСОТНАЯ ЛИНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрим графоаналитические методы обработки наблюдений. Изолиния высоты на карте представляется сложной кривой, отрезок которой может быть построен по нескольким точкам, но такое построение слишком сложно. Поэтому метод навигационных изолиний применяется лишь в рассмотренных выше частных случаях.

На небольшом участке изолинию можно приближенно заменить прямой, при этом построение значительно упрощается. Прямая, заменяющая участок круга равных высот около счислимого места, называется *высотной линией положения* (ВЛП). Высотная линия может быть хордой или касательной. Этот принципиально новый прием построения аналитически равноценен замене функции U_0 первыми членами ряда Тейлора и называется методом линий положения.

Графоаналитический метод построения ВЛП (метод градиентов). Положим, на судне измерена высота h_0 светила C , полюс освещения его b (рис. 105). Обсервованный круг равных высот $h_0 h'_0$ имеет уравнение $U_0 = f(\varphi_0, \delta, t_{rp} + \lambda_0)$. Требуется построить касательную к изолинии h_0 в точке k , ближайшей к M_c . Поместим начало координат $\Delta\varphi$ и

ΔW в точке M_c . Через счислимое место проходит счислимый круг равных высот $h_c h'_c$; уравнение его $U_c = f(\varphi_c, \delta, t_{rp} + \lambda_c)$.

Из математических основ судовождения (МОС) известно, что для построения любой линии положения по методу градиентов нужно иметь: Δn — расстояние от M_c до k ; τ_c — направление нормали к изолинии функции U_c в точке M_c .

Из МОС известно, что расстояние Δn , называемое в астронавигации переносом (n), определяется формулой

$$\Delta n = \frac{\Delta U}{g},$$

где g — модуль градиента навигационного параметра.

Формулы для g и τ выведены в МОС и имеют вид

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial \lambda \cos \varphi}\right)^2}; \quad \cos \tau = \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial \varphi}. \quad (*)$$

Для высоты светила функция U определяется формулой (209) $\sin h$, а производные (в точке M_c) получены в § 7 [формулы (19) и (21)]:

$$\frac{\partial h}{\partial \varphi} = \cos A; \quad \frac{\partial h}{\partial \lambda \cos \varphi} = \sin A.$$

Подставляя эти значения в выражения (*), получим:

$$\left. \begin{aligned} g h &= 1; \\ \tau_c &= A_c. \end{aligned} \right\} \quad (213)$$

Величина ΔU определится как разность $z_c - z_0 = (90^\circ - h_c) - (90^\circ - h_0) = h_0 - h_c$. Здесь h_c и A_c получены вычислением.

Следовательно, модуль градиента высоты равен единице, направление градиента — по A_c , а перенос равен разности высот $h_0 - h_c$.

Графическое построение линии положения $I-I$ выполняется теперь так: из

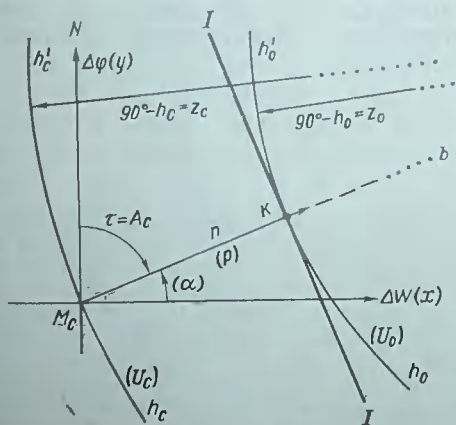


Рис. 105

счислимого места по направлению A_c откладывается перенос n в масштабе карты и в точке k , называемой определяющей, проводится линия $I-I$ перпендикулярно линии азимута — это и будет высотная линия положения. Проложив еще и вторую ВЛП, в точке их пересечения получим место на карте.

Геометрическое представление ВЛП на карте. Уравнение прямой в нормальном виде, выведенное в аналитической геометрии, имеет вид

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0. \quad (**)$$

Для высотной линии (см. рис. 105) получим:

$$\alpha = 90^\circ - A_c; \quad x = \Delta W; \quad y = \Delta \varphi;$$

$$p = n = h_0 - h_c.$$

Подставляя эти значения в уравнение (**), получим уравнение высотной линии в нормальном виде с началом координат в счислимом месте:

$$\Delta \varphi \cos A_c + \Delta W \sin A_c = n. \quad (214)$$

Следовательно, уравнение высотной линии на карте или плане представляет уравнение прямой в координатах $\Delta \varphi$; ΔW ($\Delta \lambda$) с началом в счислимом месте M_c .

Варианты графоаналитического решения. Остановимся на способах расчета и прокладке высотных линий в порядке их открытия.

Способ Соинера. Американский капитан Томас Соинер, открывший в 1837—1843 гг. способ высотных линий, предложил строить их по двум точкам на изолинии как хорды. В этом способе, который можно назвать долготным, по измеренной высоте и выбранному из МАЕ δ и $t_{гр}$, задаваясь φ_0 из уравнения круга равных высот (209) вычисляется t_m , а затем долгота $\lambda_1 = t_m - t_{гр}$ точки 1 на обсервационном круге (рис. 106). Решая то же уравнение вторично с широтой, измененной на $10'$, т. е. $\varphi_c \pm 10'$, получим λ_2 второй точки этого же круга. Соединяя точки 1 и 2 прямой (хордой), получим высотную линию положения $I-I$. Аналогично наносится линия $II-II$ для второй высоты, и в точке их пересечения получается обсервованное место M_0 . Для нанесения двух линий, как видим, требуется вычислить долготу четыре раза.

Способ М. А. Акимова. Высотную линию можно нанести по точке 1 на обсервационном круге равных высот (рис. 107), полученной по φ_c и λ_1 , как в способе Соинера, и вычисленному для этой точки азимуту светила; высотная линия $I-I$ проводится через точку 1 перпендикулярно линии азимута (как касательная). Этот способ был предложен штурманом черноморского флота М. А. Акимовым в 1849 г.

Способ Сент-Илера. Французский моряк Марк Сент-Илер в 1875 г. предложил

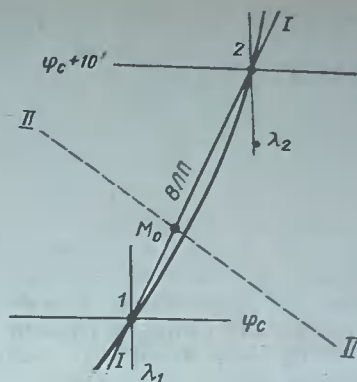


Рис. 106

прокладывать высотную линию из счислимого места (см. рис. 105). Через M_c проходит счислимый круг $h_c h_c'$ радиуса $90^\circ - h_c$, обсервованный круг имеет радиус $90^\circ - h_0$. Разность радиусов даст расстояние n до круга по направлению вертикала светила, т. е. по A_c . Проводя в точке k касательную к кругу, получим высотную линию положения. В предыдущих способах вычисляется долгота, что допустимо только около первого вертикала, способ же Сент-Илера (позже градиентов) более универсален, почему и применяется до сих пор. Советский ученый В. В. Каврайский, как известно, распространил идею графоаналитического метода Сент-Илера на все навигационные изолинии и дал обобщенный способ линий положения.

Аналитический метод определения $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$ по уравнениям высотных линий (метод итераций Ньютона). Представим формулу (209) изолинии h в виде $h_0 = \arcsin [\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \times \cos (t_{гр} \pm \lambda)]$ и разложим ее в ряд Тейлора от приближенных значений

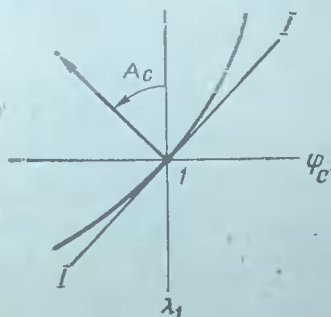


Рис. 107

ние от M_c до линии $I-I$, на которой расположено истинное место судна M ; Δh — ошибка в высоте, т. е. отстояние от истинной линии до ошибочной линии $I'-I'$, а точка M — начало координат $\Delta\varphi'$, $\Delta W'$ ошибочной линии. Следовательно, уравнение ошибок есть уравнение линии положения, но смещенной под действием ошибок в положении $I'-I'$ (значки' в уравнении опущены). При небольших n и Δh линии практически параллельны, т. е. $A_c = A$; при этом уравнение ошибочной линии можно записать относительно счислимого места M_c в виде

$$\Delta\varphi \cos A_c + \Delta W \sin A_c = n + \Delta h. \quad (221)$$

Полученное по двум ошибочным линиям место M' (см. рис. 108) содержит также ошибку ΔM или ошибки в координатах $\Delta\varphi$ и ΔW . Выясним, при каких условиях эти ошибки минимальны.

Условия, выгодные для определения места по высотам светил. Метод линий положения. Напишем два уравнения (220) и решим их относительно $\Delta\varphi$ и ΔW аналогично (217). Получим ошибки в координатах:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta h_1 \sin A - \Delta h_2 \sin A_1}{\sin(A_2 - A_1)}; \quad (*)$$

$$\Delta W = \frac{\Delta h_2 \cos A_1 - \Delta h_1 \cos A_2}{\sin(A_2 - A_1)}. \quad (**)$$

Общее смещение места ΔM получится из рис. 108:

$$\Delta M = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta W^2}$$

После подстановки выражений (*) и (**) и простых преобразований имеем

$$\Delta M = \sqrt{\frac{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2 - 2\Delta h_1 \Delta h_2 \cos(A_2 - A_1)}{\sin^2(A_2 - A_1)}}. \quad (222)$$

Принимая в этой формуле $A_2 - A_1 = 0$, видим, что $\Delta M \rightarrow \infty$ (кроме прак-

тически нереального случая $\Delta h_1 = \Delta h_2$, когда имеет место неопределенность).

Принимая $\Delta A = 90^\circ$, получим наименьшую ошибку $\Delta M = \sqrt{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2}$. Следовательно, в общем случае наименьшая ошибка в месте получается при разности азимутов светил 90° независимо от самих азимутов.

Условия, выгодные для раздельного определения координат φ и λ .

1. Определим $\Delta\varphi$ из уравнения ошибок (219):

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta h}{\cos A} - \operatorname{tg} A \Delta\lambda \cos \varphi. \quad (223)$$

При $A = 90^\circ$ (270°) $\Delta\varphi \rightarrow \infty$, а при $A = 0^\circ$ (180°) $\Delta\varphi = \pm \Delta h$. Следовательно, для уменьшения ошибок при определении широты места светило должно иметь $A = 0^\circ$ (180°), т. е. находиться на меридиане наблюдателя.

2. Определим $\Delta\lambda \cos \varphi$ из уравнения ошибок (219):

$$\Delta\lambda \cos \varphi = \Delta W = \frac{\Delta h}{\sin A} - \operatorname{ctg} A \Delta\varphi. \quad (224)$$

При $A = 0^\circ$ $\Delta\lambda \cos \varphi \rightarrow \infty$, при $A = 90^\circ$ (270°) $\Delta\lambda \cos \varphi = \pm \Delta h$. Следовательно, для уменьшения ошибок при определении долготы светило должно находиться на первом вертикале ($A = 90^\circ \div 270^\circ$). Кроме того, долгота лучше определяется при малой широте и не определяется — на полюсах. Из анализа формул (223), (224) видно также, что минимальные ошибки $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ не могут быть меньше ошибок в высотах (это относится к отдельному измерению; на практике применяются специальные методы уменьшения действия ошибок в нескольких измерениях).

В заключение отметим, что преимущество способа линий положения в том, что в нем ошибки места зависят не от азимутов, а только от их разности.

Глава 15. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРОКЛАДКА И ПОГРЕШНОСТИ ВЫСОТНЫХ ЛИНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ

§ 66. СПОСОБ СЕНТ-ИЛЕРА. СЧИСЛИМЫЙ ПАРАЛЛАКТИЧЕСКИЙ ТРЕУГОЛЬНИК. ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ВЛП

Способ Сент-Илера. Представляет частный случай обобщенного метода линий положения, примененного для изолиний высот (см. § 64). Основываясь на

этом методе, выше были получены для изолинии высоты:

$$g_h = 1; \tau = A_c; n = h_c - h_c.$$

Рассмотрим основания получения этих элементов для наблюдателя на поверхности Земли и для карты.

Пусть счислимое место судна на земном эллипсоиде в момент наблюдений расположено в точке M_c с координатами φ_c, λ_c (рис. 109), а полюс освещения светила B ($\delta; t_{гр}$) в тот же момент — в точке b ($\varphi_b = \delta; \lambda_b = t_{гр}$). Построим около центра O Земли небесную сферу с осью мира OP_N и перенесем параллельно в ее центр направления отвесной линии O_1M_c и луча, проходящего через полюс освещения b по отвесу. Этот переход от сфероида к сфере называется «с соответствием по нормальям». На небесной сфере получим зенит z_c наблюдателя и место светила B . Если в этот момент измерена высота h_0 светила B , то круг равных высот $h_0 h'_0$ на сфере пройдет в расстоянии $90^\circ - h_0$ от точки B , и на нем находится зенит z_0 обсервованного места. Расстояние Bz_c равно $90^\circ - h_c$ и соответствует значению h_c для точки z_c ; можно считать, что точка z_c расположена на счислимом круге равных высот $h_c h'_c$. Для построения касательной к кругу $h_0 h'_0$, т. е. высотной линии по способу Сент-Илера, надо найти расстояние n от z_c до круга $h_c h'_c$ и направление A'_c . Из искоемых h_0, A_c, h_c величина h_0 получается измерением высоты светила на судне и ее исправлением, остается определить h_c и A_c .

Построим сферический треугольник с вершинами в повышенном полюсе P_N (рис.

счислимом зените z_c и месте светила B . Как видно из рис. 109, искомые h_c и A_c входят в этот треугольник. Параллактический треугольник $P_N z_c B$ называется счислимым параллактическим треугольником и служит только для расчета счислимых значений h_c, A_c (в отличие от обычного треугольника, который строится для обсервованного зенита z_0). Две вершины этого треугольника P_N и B те же, что и для обычного, третья — z_c соответствует принятому при расчетах месту M_c . Так как счислимое место — предполагаемое, то за точку M_c и, следовательно, z_c можно принимать любую точку в районе плаванья, удовлетворяющую требованиям:

разрешать неопределенность точек пересечения изолиний;

позволять замену изолиний первыми членами ряда.

При этом h_c и A_c представят значения их для принятой счислимой точки M_c (z_c) и из этой точки должна вестись прокладка линии. В треугольник $P_N z_c B$ входят: географические координаты M_c (φ_c, λ_c) и геоцентрические координаты светила B ($\delta, t_{гр}$). Могут быть получены: геоцентрические координаты h_c, A_c, q_c . Следовательно, и h_0 должна быть геоцентрической. Элементы треугольника $P_N z_c B$ (для P_N) показаны на рис. 109, правила наименования и счета их обычные (см. § 4). Решая треугольник $P_N z_c B$ по формулам сферической тригонометрии и таблицам логарифмов или специальным таблицам, приборам, машинам, получим h_c и A_c , например, применяя формулы косинуса стороны и синусов, получим:

$$\left. \begin{aligned} \sin h_c &= \sin \varphi_c \sin \delta + \\ &+ \cos \varphi_c \cos \delta \cos (t_{гр} + \lambda_c); \\ \sin A_c &= \sin t_{гр} \cos \delta \sec h_c \end{aligned} \right\} \quad (225)$$

В гл. 2 рассмотрены три системы формул и специальные таблицы ТВА и ВАС, предназначенные специально для вычисления h_c и A_c ; их следует повторить¹.

Определив счислимые значения h_c, A_c , можно получить расстояние $z_c k = n$ на сфере как разность:

$$(90^\circ - h_c) - (90^\circ - h_0) = h_0 - h_c = n. \quad (226)$$

¹Приборы и машины для расчета h_c, A_c и определения места рассмотрены в § 83.

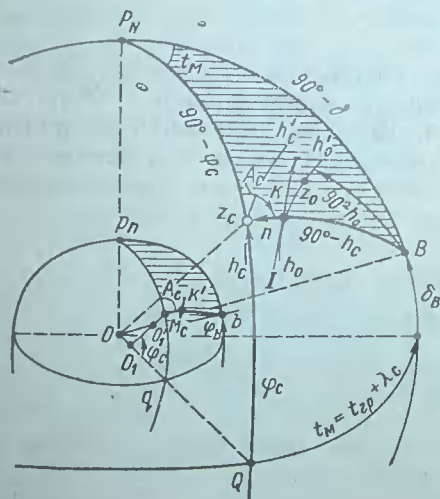


Рис. 109

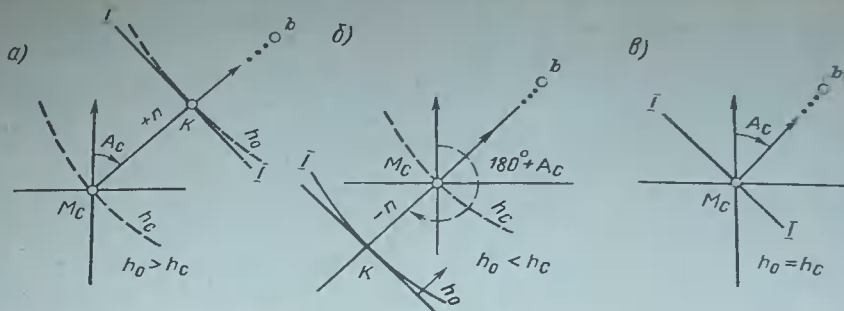


Рис. 110

Отложив от z_c по направлению A_c величину n , получим определяющую точку k — единственную точку, лежащую точно на круге h_0 равных высот, через которую и проводится ВЛП $I-I$ по нормали к дуге z_cB . Полученная ВЛП лежит на небесной сфере. На земном эллипсоиде (см. рис. 109) расстояние $M_c k'$ практически равно $n = h_0 - h_c$. При составлении карты референц-эллипсоид проектируется на плоскость в меркаторской проекции, при этом разность n (расстояние $M_c k'$) сохраняется также практически равной $n = h_0 - h_c$. Направление A_c на сфере отличается от направления $\rho_n M_c b$ на сфероиде, но на величину, меньшую $0,2^\circ$.

Следовательно, полученные для небесной сферы A_c и $n = h_0 - h_c$ можно с достаточной для практики точностью применять на меркаторской карте или плане.

Расположение счислимого места относительно круга равных высот. При образовании разности $(h_0 - h_c)$ возможны три случая:

1. Счислимое место расположено вне круга равных высот. При этом $z_c B > k B$ (см. рис. 109) и $(90^\circ - h_c) - (90^\circ - h_0) = +n$; перенос прокладывается по линии A_c «к светилу» (рис. 110, а).

2. Счислимое место расположено внутри круга равных высот. При этом $z_c B < k B$ и $h_0 - h_c = -n$; перенос откладывается в направлении $A_c + 180^\circ$ или «от светила» (рис. 110, б).

3. Счислимое место расположено на круге равных высот. При этом $h_0 - h_c = 0$ и высотная линия прокладывается

через M_c перпендикулярно линии A_c (рис. 110, в).

Погрешности, свойственные методу ВЛП. Ошибка от замены изолинии касательной. Эта ошибка возникает как при графоаналитическом решении по способу Сент-Илера (рис. 111), так и при аналитическом решении методом Ньютона, где ошибка определяется суммой отброшенных членов ряда Тейлора. Замена навигационной изолинии касательной вызывает ошибку в переносе, которую можно компенсировать введением поправки x . После смещения линий на величину этой поправки получается правильное место M , без нее — ошибочное M_0 (см. рис. 111). Поправка выводится через радиус кривизны [9, § 58] и выражается формулой

$$x' = \frac{l^2}{2} (\lg h - \lg q \cos A) \operatorname{arc} 1' \quad (227)$$

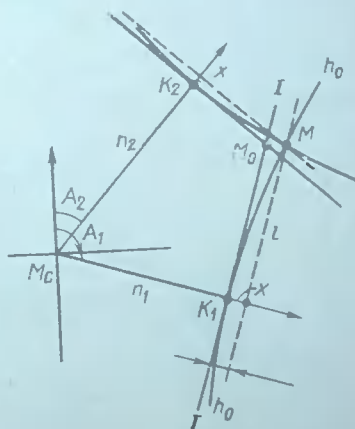


Рис. 111

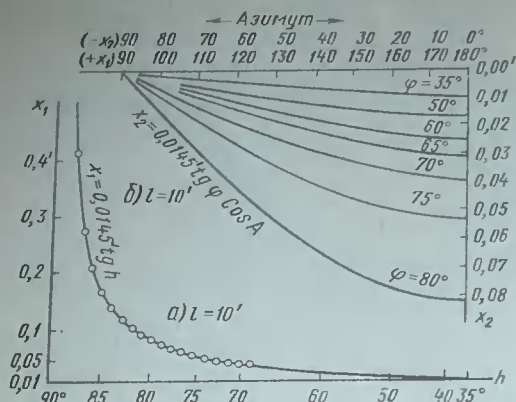


Рис. 112

Для практического использования удобнее формула

$$x' = 0,000145 l^2 \operatorname{tg} h - 0,000145 l^2 \operatorname{tg} \varphi \cos A = x_1 + x_2, \quad (228)$$

где l снимается с прокладки как расстояние $k_1 M_0$ (см. рис. 111).

По формуле (228) составлен график (рис. 112) для величин x_1 и x_2 при величине $l = 10'$. Величина x_1 (график, рис. 112, а) при высотах до $75'$ и расстояниях $l \leq 10'$ меньше $0,05'$, так же как x_2 при широтах до 75° . Поэтому в обычных условиях величина x меньше $0,1'$ и ею можно пренебрегать. В случаях обработки больших высот с перемещенным местом поправку следует выбрать с графиков (см. рис. 112). Величина x_1 получается по h_c , x_2 — по φ_c и A_c (ее знак зависит от азимута), после чего $x_{10} = x_1 + x_2$. Далее величина x_{10} умножается на $\left(\frac{l}{10}\right)^2$, где l снято с прокладки как расстояние $k_1 M_0$, или приблизительно

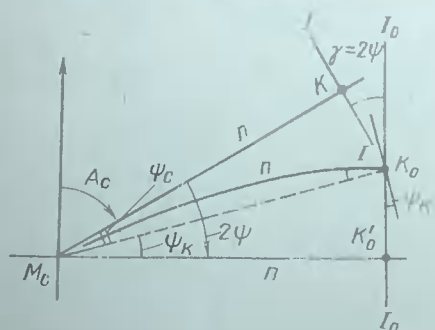


Рис. 113

$k_1 M_0$. На полученные значения x смещаем точки k_1 и k_2 в светилу при $+x$ и от светила при $-x$.

Пример 62. $\varphi = 35^\circ N$; $h_c = 78^\circ 08,2'$; $A_c = 166,8^\circ NW$; $l = 28,5'$. Определить поправку x .

Решение.

1. С графика по $h = 78^\circ$ снимаем $x_1 = 0,07'$ и по φ_c и A_c — значение $x_2 = +0,01'$, получаем $x_{10} = 0,08'$.

2. Определим: $x = 0,08' \left(\frac{28,5}{10}\right)^2 = 0,65'$, и на эту величину смещаем линии x светилу.

Вместо введения поправки можно решать задачу последовательными приближениями (полученные φ_0 и λ_0 принять за численные и т. д.). Такое решение применяется в ЭВМ, при обычном же решении — редко.

Ошибки от неучета кривизны ортодромии при прокладке ВЛП на меркаторской карте. Прокладывая из численной точки M_c дугу вертикала обычным путем — в виде прямой, получим линию положения $I-I$ (рис. 113); прокладывая ее в виде кривой — ортодромии $M_c K_0$ и откладывая по ней перенос n , получим определяющую точку K_0 , в которой проводим нормаль I_0-I_0 , таково должно быть положение ВЛП. Значения азимута в точках M_c и K_0 отличаются за счет кривизны ортодромии на угол схождения меридианов γ . Поэтому линия I_0-I_0 повернута относительно линий $I-I$ на угол γ . Добавив к A_c ортодромическую поправку ψ_c , получим правильное направление на K_0 , но не нормали I_0 , так как надо добавить еще значение ψ_k в точке K_0 . Принимая $\psi_c = \psi_k = \psi$, т. е. $\gamma = 2\psi$, получим, что при

$$A = A_c + 2\psi \quad (229)$$

направление линии положения совпадает с касательной I_0-I_0 . По полученной линии $M_c K_0$ откладывается перенос n и строится ВЛП, как обычно. Ошибка от прокладки n по прямой $M_c K_0$ вместо ортодромии в $\psi < 60'$ мала, и ею пренебрегают.

Ортодромическая поправка ψ выбирается из табл. 23-я МТ-75 по $\Delta\lambda$ и φ_{cp} , где величина $\Delta\lambda$ снимается с карты между M_c и K_0 .

Полученная поправка ψ умножается на 2, знак поправки определяется по правилу, приведенному в МТ-75. Поправку ψ можно получить и по таблице

ВАС—58, входя в табл. 1 с $h = \varphi_{ср}$, A_c , $\Delta\varphi = n$ и выбирая $\Delta A_\varphi = \gamma$.

Пример 63. $\varphi_{ср} = 65^\circ N$; $A_c = 120,6^\circ$; $n = 15'$; $\Delta\lambda = 30'E$. Определить γ .

Решение.

1. По табл. 23-а МТ—75 выбираем $\varphi = 0,2^\circ$, откуда $\gamma = 0,4^\circ$ и $A = 121^\circ$.

2. В табл. 1 ВАС—58 входим с $\varphi = h = 64^\circ - 68^\circ$; $n = 15'$, $A = 121^\circ$ и выбираем ΔA_φ $\gamma = +0,5^\circ$.

Пределы, в которых можно пренебрегать величиной γ , определяются из формулы

$$n_{пр} < 18' \operatorname{ctg} \varphi_{ср} \operatorname{cosec} A_c.$$

где $n_{пр}$ — предельный перенос при величине $\gamma \leq 0,3^\circ$ ($18'$).

Исследование этой формулы показывает, что в широтах до 40° поправкой γ можно всегда пренебрегать; в средних широтах ее нужно вводить иногда, на-

пример, при перемещении места; в высоких же широтах (больших 70°) ее надо обычно вводить. Прокладку здесь выгоднее производить на плане (бланке).

Выводы 1. Ошибка от замены изолинии касательной к ней в обычных условиях ($\varphi < 75^\circ$; $h < 75^\circ$; $n < 10'$) меньше $0,1'$ и ею можно пренебрегать. При больших высотах и перемещенном месте в перенос надо вводить поправку x (см. рис. 112) или решать последовательными приближениями.

2. При прокладке на меркаторской карте в A_c надо вводить двойную ортодромическую поправку 2φ ; в высоких широтах всегда, в средних — при использовании перемещенного места.

3. Ошибки метода ВЛП можно устранять решением последовательными приближениями.

§ 67. СВОЙСТВА ВЫСОТНЫХ ЛИНИЙ. ПРОКЛАДКА ЛИНИЙ НА КАРТЕ И ПЛАНЕ

Свойства ВЛП. Рассчитанная и нанесенная по способу Сент-Илера высотная линия обладает рядом характерных свойств.

1. Высотная линия представляет приближенную навигационную изолинию. На карте вместо циклической кривой проводится касательная к ней (см. рис. 111), поэтому место судна получается не в точке M , а в точке M_0 . Погрешность определения тем больше, чем M_0 дальше от точек касания h_1 и h_2 . Исследования показывают, что обычно при φ и h , меньших 70° , замена допустима в пределах около $30'$ от счислимого места. Следовательно, в применении ВЛП имеются ограничения ($n < 30'$); любая ВЛП может обладать погрешностями метода, так что для точного решения может потребоваться второе приближение или поправки.

2. Градиент высоты равен 1 (см. § 64), поэтому при изменении переноса n на $1'$ линия смещается по A_c на 1 милю. Следовательно, погрешность в высоте h_0 или h_c вызывает равное ей смещение линии положения. Поэтому, например, величины переносов не должны превышать ожидаемые ошибки счисления и ВЛП.

3. Положение ВЛП не зависит от принятых в расчетах счислимых координат. Пусть для расчета элементов высотной линии $I—I$ при одинаковых значениях h_0 , δ и $t_{гп}$ приняты различные места M_1 , M_2 , ... (рис. 114). Рассчитанные h_c и n оказываются различными (теоретически и A_c также неодинаковы), однако после прокладки все линии сдвигаются в одну, так как положение круга h_0, h'_0 остается неизменным. Следовательно, положение ВЛП не зависит от принятых при расчетах и построении счислимых координат в пре-

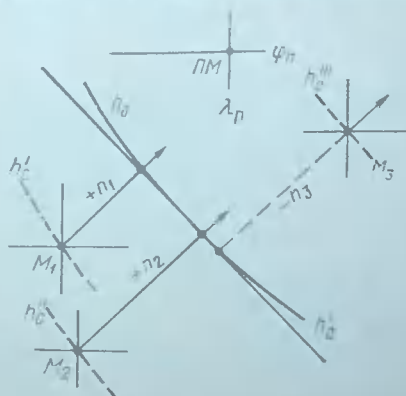


Рис. 114

делах 30' от M_c . Из этого свойства вытекает, что при расчете h_c можно принимать не счислимые, а удобные для расчета координаты φ_{II} и λ_{II} перемещенного места (ПМ). Обычно φ_{II} выбирается равной ближайшему градусу, а λ_{II} — такой, чтобы в сумме с $t_{гр}$ давала t_m^c в градусах.

4. *Высотная линия более универсальна, чем рассчитанная по h_0 координаты φ_0 или λ_0 .* Способы раздельного определения координат φ_0 или λ_0 места представляют частные случаи решения уравнения (209) навигационной изолинии:

$$\sin h_0 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos (t_{гр} \pm \lambda_W^E).$$

При одной измеренной h можно определить только φ_0 (если светило около меридиана) или λ_0 (если светило около первого вертикала), т. е. эти способы ограничены. Высотная же линия может определяться по любому светилу и, следовательно, проходить на карте под любыми углами, т. е. представляет общий случай линии положения данного типа. Определения φ_0 и λ_0 есть частные случаи применения ВЛП. Действительно, задаваясь долготой λ_c (рис. 115), в пересечении продолженной линии h_0 с меридианом M_c получим точку D_1 , широта которой и представит φ_0 . Если взять другую λ' , то получим другую точку на ВЛП — D_2 и другую широту φ'_0 . Очевидно, что вычисляемая широта зависит от принятой для расчета долготы. Аналогично можно получить и долготу, задаваясь широтой. Из сказанного вытекает невозможность способов определения места по одной и той же высоте, обработанной для ВЛП и для φ_0 (или λ_0), так как во всех случаях находятся

точки на одной высотной линии (D_1, D_2 и т. д.).

Из рассмотренных свойств ВЛП вытекает, что даже одна высотная линия, если подобрать соответствующее ее расположение, может помочь штурману в уточнении направления или элементов счисления.

Прокладка высотных линий на карте и на бланке. Прокладкой высотной линии называются графические построения линии по ее элементам n и A_c . При прокладке двух и более линий получают obserвованное место судна. Прокладку можно выполнять двумя приемами: на карте и на бланке (на листе бумаги, бланке, планшете). В первом случае принимают масштаб карты и получают сразу место на карте, во втором — масштаб выбирает штурман (например, $1' = 1$ см), но получают приращения координат $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ к счислимым координатам, по которым находят φ_0 и λ_0 и по ним уже на карте получают место. Первый прием в принципе совершеннее, но при малом масштабе карты в высоких широтах и в учебных целях применяется прокладка на бланке.

Прокладка ВЛП на карте и получение obserвованного места. Прокладка ВЛП на карте выполняется из того M_c , координаты которого приняты при расчете h_c и A_c . На основании третьего свойства ВЛП для расчетов можно принять любое место вблизи M_c , но прокладку надо выполнять обязательно из той точки, координаты которой приняты при расчетах (поэтому координаты M_c нельзя округлять до $1'$, а потом прокладывать из M_c , как иногда делают). Расчеты и прокладка ведутся: из счислимого места на карте; из перемещенного места.

Прокладка на карте из счислимого места. Из счислимого места с помощью транспортира отсчитывается угол A_c в круговом счете (на рис. 116 $A_1 = 276.7^\circ$) и проводится линия азимута $M_c k_1$; величина переноса $n = h - h_c$ снимается измерителем с боковой рамки карты, причем $1' = 1$ морской миле (на рис. 116 $n_1 = +5.9'$), и откладывается по линии азимута к светилу при знаке «+» и от светила при знаке «-». Через полученную определяющую точку k_1 перпендикулярно линии азимута проводится ВЛП $I-I$. Аналогично прокла-

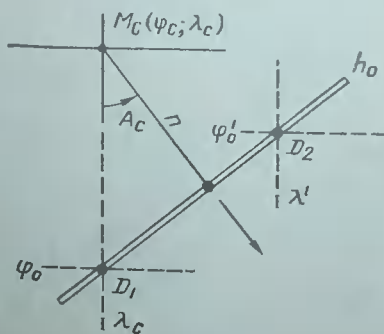


Рис. 115

дывается линия $II-II$, и в точке пересечения линий получается obserвованное место M_0 . На карте это место обозначается двойным кружком (см. рис. 116), записывается время и отсчет лага, а координаты φ_0 , λ_0 снимаются с карты только для записи в журнал; если надо, определяется также невязка S .

Пример 64. $\varphi_c = 54^\circ 43,0' N$; $\lambda_c = 22^\circ 32,5' E$; $h = 22^\circ 9,7'$; $h_c = 22^\circ 03,8'$; $n_1 = +5,9$; $A_1 = 276,7$; $n_2 = -2,1$; $A_2 = 346,5^\circ$. Произвести прокладку на карте и получить φ_0 и λ_0 .

Решение.

Прокладка показана на рис. 116. С карты
 $\varphi_0 = 54^\circ 39,4' N$; $\lambda_0 = 22^\circ 21,7' E$; $C = 240^\circ$ —
 $-7,2'$

Прокладка на карте из перемещенного места. Для сокращения вычислений при работе с таблицами ВАС—58 (и некоторыми другими) вместо считаемых координат принимаются перемещенные: широта, равная ближайшему целому градусу, и долгота, при которой $t_m^0 = t_{гр} \pm \lambda_{п}$ окажется равным целому градусу (см. § 80). Прокладка полученного элемента производится из этого места (ПМ₁ на рис. 116).

Пример 65. По данным примера 64 и $t_{\text{гр}} = 60^\circ 13,4' W$; $\delta = 20^\circ 55,0' N$ определить h_c и A_c для перемещенного места и произвести прокладку линии I' .

Решение

$\varphi_{\Pi}^0 = 60^\circ 13,4' + 22^\circ 46,6' - 83^\circ W$, где $22^\circ 46,6' = \lambda_{\Pi}$ или $\Delta\lambda = 14,1'$ к E от числивой; $\varphi_{\Pi} = 55^\circ N$. По данным φ_{Π}^0 , δ ; t_{Π}^0 вычисляем $h_c = 21^\circ 57,8'$ и $A_c = 276,8^\circ$, $\mu_1 = +11,9'$.

Прокладка (см. рис. 116) производится по параллели $\varphi_{\Pi} = 55^\circ$ из точки ПМ, с линией l' практически совпала с $l-l$.

Прокладка ВЛП на бумаге (бланке). Если масштаб карты мельче 1 : 500 000, а также при работе с планшетами или в учебных целях прокладка производится на бумаге, изображающей план, и представляет графическое решение формул (217). Первой операцией является построение масштаба: линейного или углового.

Линейный масштаб. За единицу расстояний $\Delta\varphi$, ΔW принимается отрезок $0-1'$ прямой OF (рис. 117, а). Рекомендуется выбирать масштаб не менее $1' = 1$ см, учитывая, что при крупном масштабе уменьшаются ошибки графических построений. Выполнив прокладку в принятых единицах, снимаем $\Delta\varphi$

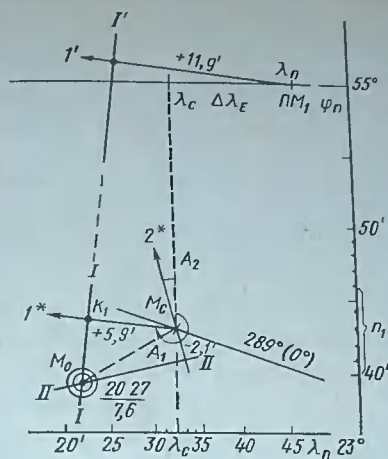


Рис. 116

и ΔW в тех же единицах. Разность долгот получается из табл. 25-а МТ—75 или ВАС—58, куда входят с ΔW и полученной φ_0 . Линейный масштаб удобнее и точнее, а при φ , большей 65° , рекомендуется применять только линейный масштаб.

Угловой масштаб (рис. 117, б). При точке O транспортиром строится угол, равный φ_c , и по наклонной стороне его OF откладываются отрезки, равные минутам ($1' = 1$ см); они изображают минуты боковой рамки карты, поэтому здесь берут n и $\Delta\varphi$. Из точек $I', 2', \dots$ опускаются перпендикуляры на прямую OE , полученные отрезки $0-1, 1-2$ и т. д. изображают экваториальные минуты $\Delta\lambda$ в соответствии с формулой

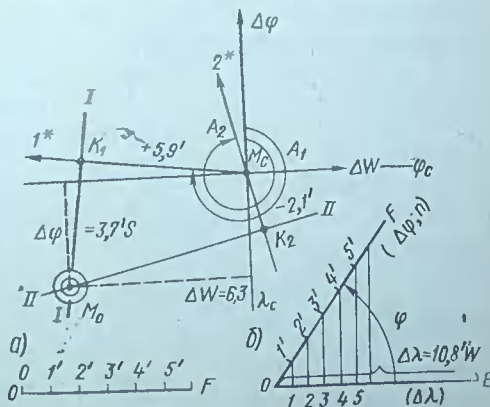


Рис. 117

$OE = OF \cos \varphi$. Шкала OE служит только для снятия $\Delta\lambda$ точки M_0 . Угловой масштаб применяется при учебных прокладках с перемещением местом, обычно же рекомендуется применять линейный.

Прокладка на бумаге выполняется в середине листа из точки M_0 , через которую проведены меридиан λ_0 и параллель φ_0 ; поэтому по осям координат откладываются $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$. Выполнив прокладку в обычном порядке и выбрав обсервованное место M_0 , с осей снима-

ют $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ (см. рис. 117), после чего получается $\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi$, а $\Delta\lambda$ по табл. 25 МТ—75 с φ_0 (или по масштабу OE) переводится в $\Delta\lambda$ и $\lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda$. По этим координатам M_1 наносится на карту. Следовательно, прокладка на бумаге дает приращения координат, а на карте — сразу место судна.

Пример 66. По данным примера 64 получим (см. рис. 117): $\Delta\varphi = 3,7'S$; $\Delta\lambda = 6,3'W$, $\varphi_0 = 54^\circ 43,0'N - 3,7'S = 54^\circ 39,3'N$ и по табл. 25 МТ—75 $\Delta\lambda = 10,8'W$; $\lambda_0 = 22^\circ 32,5'E - 10,8'W = 22^\circ 21,7'E$; $\lambda_1 = 240^\circ - 7,3'$; $T_1 = 20^\circ 27'4''$; $oa = 7,6$.

§ 68. ИСТОЧНИКИ ОШИБОК В ВЫСОТНОЙ ЛИНИИ. ТОЧНОСТЬ И ВЕС ЛИНИИ

Элементы высотной линии положения, т. е. $n = h - h_c$ и A_c , как и любые результаты измерений и вычислений, содержат ошибки. Рассмотрим ошибки в линии после введения всех поправок и выполнения вычислений, но до уравнивания обсервации, т. е. до выбора места в фигуре ошибок.

В теории все ошибки (погрешности)¹ по действию на результат разделяются на: промахи (просчеты, грубые ошибки), иногда допускаемые наблюдателем на любом этапе обсервации; систематические ошибки (Δ), меняющиеся по определенному закону, например, постоянные в линиях данной обсервации; случайные ошибки — неизбежные ошибки в измерениях и вычислениях, возникающие из многих причин; они характеризуются дисперсиями или средними квадратическими ошибками $\pm m$.

Промахи. В астронавигации наибольшую опасность представляют промахи в наблюдениях или расчетах, так как они могут далеко отбросить обсервованное место от истинного и привести к аварии. Они чаще появляются в простых операциях: сложении, определении знака и др., где внимание снижено. По опытным данным, до 30 % линий у нетренированных наблюдателей содержат промахи (чаще небольшие), поэтому выявление промаха — одна из первых

забот штурмана. Более грубые промахи могут быть выявлены после сравнения полученного переноса с критерием, т. е. предельно возможным переносом, равным ожидаемой невязке счисления. Промахи же в пределах этого критерия (мелкие промахи) могут быть выявлены только после прокладки четырех или более линий — по анализу их взаимного расположения; этот анализ рассмотрен в § 71.

Критерии промаха в ВЛП. Так как $n = h - h_c$ представляет как бы смещение линии из счисленного в обсервованное место, то величина n не должна значительно превышать совокупность ошибок счисления и линий, поэтому различные суммы и принимаются за критерии промаха. В предлагавшихся критериях не учитывались систематические ошибки, поэтому более правильным критерием является

$$n_{пр} < 3 \sqrt{\frac{1}{2} (M_c^2 + m_n^2 + \Delta_{пр}^2)} \quad (230)$$

$$n < n_{пр}$$

где M_c — средняя квадратическая ошибка счисленного места;

m_n — средняя квадратическая ошибка ВЛП;

$\Delta_{пр}$ — предельное значение возможной систематической ошибки (табл. 9).

Например, при $M_c = \pm 5'$; $m_n = \pm 1'$; $\Delta_{пр} = 3'$ получим $n_{пр} = 14'$, и большие переносы берутся под сомнение.

Крупные (в градусах) промахи выявляются без формул по несовместности.

¹В судовождении сохранен термин «ошибка», рекомендованный ГОСТ 16263—70 и равноценный термину «погрешность».

Получаемая величина	Способ получения	Средние квадратические ошибки (m) измерений или вычислений		Систематические ошибки (Δ)
ОС	Измеряют над видимым горизонтом секстансам: СНО-Т СНО-М	Солнце $\pm 0,3-0,5'$ $\pm 0,4-0,5'$ (при плохой видимости горизонта до $\pm 2'$)	Звезды $\pm 0,4-0,7'$ $\pm 0,5-0,8'$	Возможна ошибка от наклона секстана при большой высоте; наблюдалась Δ от 0 до $+3'$, односторонняя, разная в линиях. Личная ошибка до $0,2'$. Возможна систематическая ошибка при измерениях над лунным горизонтом от $+1'$ до $-2'$, переменная в зависимости от $\Delta A_{\text{д.}}$.
i	Измеряют: по Солнцу звезде горизонту	$\pm 0,1'$ $\pm 0,1-0,2'$ $\pm 0,3-0,5'$		—
s	Лабораторные данные	$\pm 0,1 \div 0,3'$		Возможна Δs от изменений s и от пренебрежения R_2 барабана; порядка $\pm 0,5'$ (старые $\pm 1,0'$). Разная
d	По таблицам	$\pm 0,1'$		Возможно Δd — отклонение от табличного. Обычно меньше $1'$, предельное $2-3'$. Однородная
	Измерением (Н-5, НК)	$\pm 0,2'$		
$\Delta h = \rho + \rho + \dots + R + \dots$	По МТ-75, ВАС-58	$\pm 0,1 \div 0,2'$		Возможны $\Delta \rho$ при малых высотах Солнца и Δh Луны (до $0,3'$)
h_c	По таблицам (см. табл. 2)	$\pm 0,1 \div 0,2'$		Возможна $\Delta h_{\text{т}}$ от ошибки в поправке хронометра или общей ошибки во времени. Разная во всех ВЛП, но дает общую $\Delta h = \Delta T$
	По навигационной ЭВМ	$< \pm 0,1'$		
A_c	По МТ-75, ТВА-57 и ЭВМ	$\pm 0,1'$		Практически незначительна
	По ВАС-58	$\pm 0,1''$		

мости с другими переносами. Формула же (230) может быть применена при средних промахах, кроме случаев неожиданных крупных невязок в счислении. Более совершенный критерий промаха в ВЛП получается после предварительной прокладки всех линий и приближенного выбора места M_0 ; тогда

$$n'_i - n_i \leq 3m_n + \Delta_{\text{пр}}, \quad (231)$$

где n'_i — переносы, снятые для M_0 .

Эти критерии можно применить в ЭВМ, где всегда требуется предварительная «отбраковка» линий.

Систематические ошибки. Источниками систематических ошибок в линиях являются расхождения теоретических и паспортных поправок с действительными, ошибки при измерении высоты (см. табл. 9), а также небольшие промахи при определении какой-либо поправки. Систематическая ошибка может

быть одинаковой (повторяющейся) во всех линиях, если она появилась в одной из общих поправок. Так, если табличное наклонение горизонта не соответствует действительности, то во всех линиях появится постоянная ошибка Δd . Кроме того, в линиях всегда есть малые (в пределах точности определения поправок) систематические ошибки, представляющие сумму индивидуальных значений ошибок поправок. Например, i по горизонту определяется с точностью $\pm 0,4'$; конкретная для данной i ошибка $v = -0,3'$ войдет во все линии как $\Delta = -0,3'$, аналогично для d и одинаковых s . Также постоянная личная ошибка наблюдателя (обычно менее $0,2'$). В других случаях систематическая ошибка в линиях разная, например от наклона секстана при большой высоте.

При правильной постановке наблюдений и их обработки систематических ошибок, больших точности определения поправок, быть не должно, но в реальной морской обстановке они часто проявляются. Обычно наклонмер отсутствует, формуляры секстангов устаревают, бывают промахи в поправках, и в линиях появляются Δ . Поэтому штурману надо предполагать, что в линии может быть Δ , и всегда принимать меры к ее исключению. Это требует избыточных наблюдений и усложнения их обработки, но необходимо для повышения надежности обсервации. Надежность характеризуется вероятностью отсутствия промаха и значительной систематической ошибки, а также достаточной точностью результата.

Статистическая оценка возможных систематических ошибок. Конкретное значение систематической ошибки в данных наблюдений может быть выявлено и исключено только после обсервации, между тем в некоторых задачах надо знать ожидаемый порядок этой ошибки до или в процессе обработки. Это требуется при выборе выгодных условий наблюдений, при обработке на ЭВМ, при оценке точности места, если данных для исключения Δ недостаточно. В этих случаях в последнее время применяется статистическая оценка величины возможных систематических (повторяющихся) ошибок. Из экспериментов последних десятилетий установлено, что отклонения поправок от табличных значений во всей совокупности наблюдений проявляются как случайные ошибки; они имеют пределы, разные знаки и чаще малы. Это дало возможность

установить законы их распределения: экспоненциальный и средние квадратические значения для наклонения горизонта $m_h = \pm 0,4'$, для поправок к секстангов СНО $m_s = \pm 0,4 - 0,5'$, для поправок к секстангов СНО-Т $m_{st} = \pm 0,3'$.

В среднем возможная СКО поправки определяется формулой

$$m_A = \sqrt{m_h^2 + m_s^2 + m_{st}^2} \quad (232)$$

По официальным данным, $m_A = \pm 0,7'$ по данным проф. Р. А. Скубо $m_A = 0,2' \pm 0,2'$ (в разных районах и условиях); по данным автора, для СНО-Т $m_A = \pm 0,4'$. Исследования систематических ошибок показали, что при современном уровне астронавигации их величины в ВЛП могут быть сведены к минимуму порядка $0,5'$ и что их величина в рядовой обсервации очень редко превышает $2'$.

Случайные ошибки в переносе. Случайные ошибки в составляющих переноса характеризуются СКО, показанными в табл. 9, в которой даны величины ошибок, полученные из обобщения опыта последнего времени, их можно применять для априорной оценки m_p (см. § 56), но с учетом своих личных данных.

Суммарная случайная ошибка m_p в переносе определяется по формуле

$$m_p = \sqrt{\frac{m_{ос}^2}{N} + m_{обр}^2} \quad (233)$$

где $m_{обр}$ — СКО обработки наблюдений, включающая точность получения поправок и точность вычислений.

В среднем $m_{обр} = \pm 0,2 \pm 0,3'$, а $m_{ос} = \pm 0,5 \pm 0,7'$; при этих данных анализ формулы (233) показывает, что точность линии зависит в основном от более крупной ошибки $m_{ос}$.

увеличивать число наблюдений в серии выше пяти нет смысла, так как точность m_p линии повышается мало;

увеличивать точность обработки $m_{обр}$ при больших $m_{ос}$ нет смысла (достаточным соотношением является $m_{обр}/m_{ос} = 0,5$), так как точность линии остается прежней.

Принимая ошибку обработки $m_{обр}$ (см. табл. 9) порядка $\pm 0,3'$, ошибку наблюдений Солнца $m_{ос} = \pm 0,5'$ и звезд $\pm 0,7'$, при трех высотах в серии получим следующие ожидаемые с вероятностью 68 % ошибки в линиях: для Солнца $m_p = \pm 0,5'$; для звезд $m_p = \pm 0,6'$.

Ошибка для звезд приведена меньшей, чем обычно указывается в литературе ($\pm 0,9'$), так как при рекомендуемых наблюдениях в гражданские сумерки (см. § 73) точность измерения высот звезд мало отличается от измерения высот Солнца.

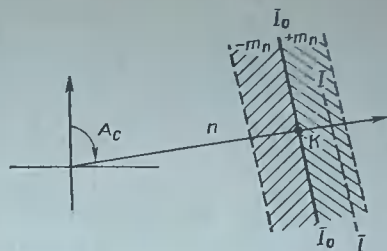


Рис. 118

Уравнение «полосы положения». В § 65 выведено уравнение (221) ошибочной линии, т. е. уравнение высотной линии, смещенной под действием ошибок Δh . Переходя к конкретным ошибкам, получим, что систематическая ошибка (и промах) вызывает параллельное смещение линии на величину ошибки, а величина m_n дает «полосу положения», внутри которой с определенной вероятностью находится истинная линия. Величины Δ или промахи будем вводить в уравнение ВЛП в конкретных задачах, так как их может и не быть. Поэтому положение судна представляется уравнением «полосы положения», которое в координатах $\Delta\varphi$ и ΔW относительно счислимого места M_c имеет вид:

$$\Delta\varphi \cos A + \Delta W \sin A = n \pm m_n. \quad (234)$$

На рис. 118 при obserвованной линии $I_0 - I_0$ построим полосу $\pm m$. Внутри этой полосы с вероятностью 68 % находится действительная линия положения $I - I$.

Следовательно, высотную линию нужно всегда представлять себе в виде «полосы положения», в которой находится действительная линия (если исключена систематическая ошибка и нет промаха) со следующей вероятностью:

- 68 % — при ширине полосы $2m_n$, т. е. при $\pm m_n$;
- 95 % — при ширине полосы $4m_n$, т. е. при $\pm 2m_n$;
- 99,7 % — при ширине полосы $6m_n$ (предельная полоса).

Вес высотной линии положения. При оценке точности данной линии положения и степени доверия к ней, при сравнении ее с другими линиями применяется понятие веса линии положения ($p = \frac{g^2}{m^2}$). Для высотной линии при $g = 1$ имеем:

$$p = \frac{C}{m_n^2}, \quad (235)$$

где $C = m^2$ — СКО, принятая для сравнения например в первой линии; обычно $C=1$.

Следовательно, вес — это условная, относительная величина. Чем больше ошибка m_n , тем меньше вес линии относительно принятой за основную, и наоборот — при малой ошибке вес линии больше.

Глава 16. МЕТОДЫ ОТЫСКАНИЯ МЕСТА СУДНА И ОЦЕНКИ ЕГО ТОЧНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ОШИБОК В ВЫСОТНЫХ ЛИНИЯХ

§ 69. ОТЫСКАНИЕ ВЕРОЯТНЕЙШЕГО МЕСТА СУДНА ПРИ НАЛИЧИИ В ВЛП ТОЛЬКО СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК (МНК). ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕСТА

При отсутствии ошибок уравнение ВЛП имеет вид

$$\Delta\varphi \cos A + \Delta W \sin A = n,$$

где n — истинный перенос относительно счислимого места M_c .

Очевидно, что для определения неизвестных $\Delta\varphi$ и ΔW достаточно полу-

чить два таких уравнения, т. е. две линии, и, решая их совместно, определить действительные φ и λ , или в графическом варианте — действительное место судна. В реальных условиях в линиях положения или переносе n всегда есть ошибки, поэтому двух линий заведомо недостаточно для получения надежного

ΔA	0°	12°	22°	30°	36°	42°	48°	53°	60°	67°	76°	90°	104°	113°
P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	9	8

места. Рассмотрим действие ошибок и методы обработки (уравнивания) сначала раздельно для случайных и систематических ошибок, а в § 71 — совместно.

Уравнение ВЛП со случайной ошибкой и «полоса положения». Если наблюдения и обработка выполнены правильно, т. е. промахов нет и систематические ошибки исключены, в переносе остается только индивидуальное значение случайной ошибки v , и уравнение (221) примет вид:

$$\Delta\varphi \cos A + \Delta W \sin A = n + v. \quad (236)$$

Так как при нескольких линиях в каждой высотной линии своя ошибка v_i , то число неизвестных в уравнении (236) (т. е. $\Delta\varphi$, ΔW и v) всегда оказывается большим числа уравнений и все значения v_i не определяются. Однако, хотя каждая ошибка v_i неизвестна, из опытов устанавливается возможное рассеивание ее значений (дисперсия) и средняя квадратическая ошибка m_v (ее значения для ВЛП показаны в § 68). Метод учета v заключается в «накрытии» ее величиной $\pm m_v$, т. е. в том, что в уравнение (236) вместо v вводится значение m_v , и получается уравнение «полосы положения», в пределах которой с вероятностью 68 % должна находиться действительная линия. Следовательно, построив полосу с границами $\pm m_v$, мы как бы «накрываем» действительную линию, хотя указать точно ее положение не можем.

При двух линиях место получается в точке их пересечения, а пересечение «полосы положения» дает приблизительно площадь рассеивания мест. При трех и более линиях необходимо отыскать место в фигуре погрешностей, т. е. произвести «уравнивание», а затем уже оценить точность места или площадь рассеивания. Эти операции проще производить, применяя «прием весов».

Вес точки пересечения высотных линий. Для удобства выбора места по методу наименьших квадратов (МНК)

и сравнения нескольких мест вводится понятие веса. Вес точки пересечения двух ВЛП (i и j) определяется по формуле, известной из теории ошибок:

$$P_{ij} = p_i p_j \sin^2 \Delta A_{ij}, \quad (237)$$

где p_i и p_j — веса линий i и j , определяемые по формуле (235)

Из формулы (237) видно, что чем точнее линия и ΔA ближе к 90° тем точнее место, и ему придается больший вес.

Для выбора места в фигуре погрешностей удобнее оперировать с целыми числами, поэтому А. П. Ющенко предложил принять $m_i = m_j = 1$ и умножить формулу (237) на 10, получим

$$P = 10 \sin^2 \Delta A. \quad (238)$$

По этой формуле составлена табл. 10, применяемая для выбора места по методу весов. Для приближенных расчетов напомним, что вес меняется на 1 каждые 10° — до 30° , а с 30° до 67° — через 6° .

Пользуясь весами, можно рассчитать также и СКО (M) места по формуле

$$M = \sqrt{\frac{1/P_i}{[P_{ij}]}} \quad (239)$$

где p_i — веса линий, рассчитываются по формуле (235)

P_{ij} — веса точек пересечения линий, рассчитываются по формуле (237).

Понятие веса применяется также при осреднении нескольких наблюдений, каждой из которых придается вес $P = 1/M^2$, а средневзвешенное место определяется центрографическим приемом.

Две высотные линии. Оценка точности места. При двух линиях вероятнейшее место принимается в точке их пересечения, а точность полученного места оценивается одним из трех приемов.

Оценка точности места анализом ошибок. Принимая, что линии равногочны и что полосу a направлена всегда по линии среднего азимута $A_{ср}$ (иногда она будет малой полуосью), имеем

следующие формулы для получения осей эллипса ошибок;

$$\begin{aligned} a &= \frac{m_n}{\sqrt{2} \cos \frac{\Delta A}{2}}; \\ b &= \frac{m_n}{\sqrt{2} \sin \frac{\Delta A}{2}}. \end{aligned} \quad (240)$$

Приемы построения эллипса ошибок рассматривались в общем курсе теории ошибок; рассмотрим приближенный прием построения эллипса для двух высотных линий. Между линиями строятся две биссектрисы углов их пересечения (рис. 119); одна из линий, например $I-I'$, смещается параллельно на величину $y = 0,7m_n$, где m_n получена для данных наблюдений [формула (233)] или принята априорно. Линия $I'-I'$ дает на биссектрисах точки A и B , определяющие концы осей a и b . Нанеся по ним точки A' и B' , вписываем эллипс от руки. Утроив его полуоси получим предельный эллипс с вероятностью нахождения точки в нем 98,9 %, такую оценку точности и следует применять на практике (для двух ВЛП).

Оценка точности средними квадратическими ошибками координат. По формулам (217) для приращения координат $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ получим ошибки m_φ и m_λ как ошибки линейных функций:

$$\begin{aligned} m_\varphi^2 &= \frac{1}{\sin^2 \Delta A} (m_1^2 \sin^2 A_2 + m_2^2 \sin^2 A_1), \\ m_\lambda^2 &= \frac{1}{\sin^2 \Delta A} (m_2^2 \cos^2 A_1 + m_1^2 \cos^2 A_2), \end{aligned} \quad (241)$$

где m_1 и m_2 — СКО первой и второй линий.

Оценка точности места его средней квадратической (радиальной) ошибки. Величина СКО места определяется по формулам теории ошибок:

$$M = \sqrt{m_\varphi^2 + m_\lambda^2} = \frac{1}{\sin \Delta A} \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (242)$$

или при равноточных линиях, т. е. при $m_1 = m_2 = m_n$, получим

$$M = \frac{\sqrt{2} m_n}{\sin \Delta A}. \quad (243)$$

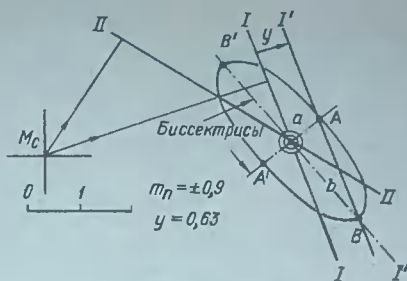


Рис. 119

Вероятность нахождения места в круге радиуса M меняется с изменением ΔA ; так, при $\Delta A = 30^\circ$ вероятность 60 %, при $\Delta A = 90^\circ - 63$ %. Вероятность может быть подсчитана по табл. 1-в МТ-75, как показано в инструкции к ним.

Рекомендуется применять удвоенную M , как имеющую вероятность около 95 %.

Отыскание места и оценка его точности при трех и более ВЛП. Для выбора места¹ в фигуре погрешностей, образовавшейся от случайных ошибок v_i в линиях, применяется метод наименьших квадратов (МНК) в аналитической форме — при решении на ЭВМ и в графической форме «приема весов» — при графической прокладке.

Аналитический вариант МНК. Метод наименьших квадратов рассматривался подробно в теоретических основах судовождения, поэтому покажем только его применение к высотным линиям. Если Δ отсутствует, а число уравнений (236) больше числа неизвестных $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$, т. е. три и больше, то линии «уравниваются» и получаются более точные — вероятнейшие координаты. Обозначим в уравнении (236) $\cos A = a$ и $\sin A = b$; получим систему из N уравнений с двумя неизвестными и ошибками v_i :

$$\left. \begin{aligned} a_1 \Delta\varphi + b_1 \Delta\lambda - n_1 &= v_1; \\ a_2 \Delta\varphi + b_2 \Delta\lambda - n_2 &= v_2; \\ &\vdots \\ a_N \Delta\varphi + b_N \Delta\lambda - n_N &= v_N. \end{aligned} \right\} \quad (244)$$

¹В геодезии применяется термин «уравнивание», в навигации — «разгон» фигуры погрешностей.

Решая эту систему при условии

$$\sum v_i^2 = [\omega\omega] \rightarrow \min \text{ или } \sum p_i v_i^2 \rightarrow \min, \quad (245)$$

получим вероятнейшие значения $\Delta\varphi$ и ΔW . Для выполнения решения уравнения (244) возводятся в квадрат и складываются почленно.

Для отыскания минимума $[\omega\omega]$ полученное выражение поочередно дифференцируется по двум переменным и полученные уравнения приравниваются нулю. В результате преобразований получают два уравнения с двумя неизвестными, называемые нормальными уравнениями:

$$\begin{cases} \Delta\varphi [aa] + \Delta W [ab] = [na]; \\ \Delta\varphi [ab] + \Delta W [bb] = [nb], \end{cases} \quad (246)$$

где квадратными скобками обозначены суммы произведений, например $[aa] = a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2$; $[ab] = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots$; $[na] = n_1 a_1 + n_2 a_2 + \dots$.

Решая эти формулы обычным путем [см. формулы (217)], получим вероятнейшие значения $\Delta\varphi$ и ΔW :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{[bb][na] - [ba][nb]}{[aa][bb] - [ba]^2}; \\ \Delta W &= \frac{[aa][nb] - [ba][na]}{[aa][bb] - [ba]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (247)$$

После чего

$$\begin{cases} \varphi_B = \varphi_c + \Delta\varphi; \\ \lambda_B = \lambda_c + \Delta\lambda, \end{cases} \quad (248)$$

$$\text{где } \Delta\lambda = \frac{\Delta W}{\cos \varphi}$$

Если линии положения неравноточны, то для каждой из них вычисляется свой вес p и вводится в каждую сумму произведений.

Подобное аналитическое решение применялось в ряде алгоритмов для ЭВМ.

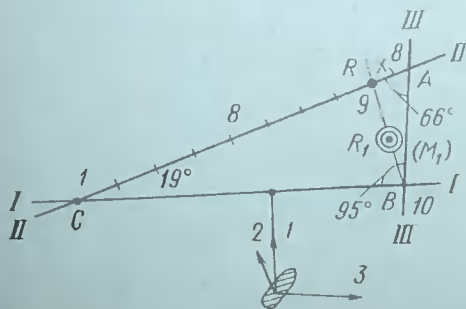


Рис. 120

Центрографический прием отыскания вероятнейшего места. В этом варианте МНК уравниваются не линии, а вершины фигуры ошибок или — аналитически — координаты $\Delta\varphi_{ij}$, ΔW_{ij} точек попарного пересечения линий. После прокладки N линий образуется Q точек их попарного пересечения:

$$Q = \frac{N(N-1)}{2} \quad (249)$$

Так, при четырех линиях точек пересечения шесть, при пяти — 10 и т. д. В центрографическом приеме каждой точке пересечения — вершине — приписывается вес P_{ij} по формуле (237), а вершины уравниваются по методу наименьших квадратов. В результате получают вероятнейшие $\Delta\varphi$ и ΔW :

$$\begin{cases} \Delta\varphi_B = \frac{[P_{ij} \Delta\varphi_{ij}]}{[P_{ij}]}; \\ \Delta W_B = \frac{[P_{ij} \Delta W_{ij}]}{[P_{ij}]} \end{cases} \quad (250)$$

Затем по формулам (248) вычисляются вероятнейшие φ_B и λ_B . Этот аналитический прием переработан в простой графический прием весов, которым и будем пользоваться в дальнейшем.

Графический прием весов. Основой графического приема служит способ сложения весов вершин обратно пропорционально их весам; он одинаков с отысканием центра тяжести фигуры. Вероятнейшее место M_1 отыскивается в следующем порядке.

1. Произвести прокладку линий на карте или листе бумаги. Наметить точки пересечения линий попарно и получить $\Delta\Delta$ вершин. Например, на рис. 120 проложены три линии положения, ошибки которых приняты одинаковыми, получены ΔABC ошибок; $\Delta\Delta$ сняты с прокладки.

2. По формуле (237) или табл. 10 получить веса вершин фигуры ошибок. Для равноточных линий веса зависят только от $\Delta\Delta$ и по табл. 10 равны: $P_{2,1} = 8$; $P_{1,3} = 10$; $P_{2,3} = 1$.

3. На прямой, соединяющей вершины, например на стороне AC , найти точку R , отстоящую от вершин обратно пропорционально их весам. Вес ее равен сумме весов вершин, т. е. $P_R = P_{1,2} + P_{2,3} = 9$. На рис. 120 сторона AC

делится на девять частей и точка R принимается в расстоянии одной части от A и восьми частей от C . Отстояние x точки R от одной из вершин можно определить в частях или в миллиметрах по формуле

$$x = \frac{P_{1,2} AC}{P_{2,3} + P_{1,2}},$$

которую удобно решать на ЭКВМ. В числителе выгоднее брать меньший вес, тогда x равно расстоянию от вершины с большим весом.

4. Полученную точку R соединить со следующей вершиной и аналогично предыдущему найти точку R_1 ($P = 19$). Для трех линий эта точка и есть вероятнейшее место. Если вершин больше, то продолжаем далее, пока не будут учтены все вершины. Последняя точка R_k и даст вероятнейшее место M_1 .

Максимальный вес точки M_1 по табл. 10 при определении по трем линиям получается при $\Delta A = 60^\circ$ или $\Delta A = 120^\circ$ во всех линиях и равен $P_{\text{макс}} = 22,5 \approx 22$, в то время как по двум линиям $P_{\text{макс}} = 10$.

При четырех линиях положения (рис. 121) прием весов применяется аналогично показанному для трех линий, но учитываются веса всех 4—6 точек пересечения линий. Например, на рис. 121 имеем шесть точек пересечения линий (вершин), веса которых выбраны из табл. 10. Сложив их по изложенному правилу, получаем вероятнейшее место в точке M_1 , слегка смещенной из середины четырехугольника¹ (вес ее $P = 39$). Наибольший вес для определения по четырем линиям получается при $\Delta A = 90^\circ$ во всех линиях и равен 40, т.е. почти в два раза больше, чем по трем линиям. Прием весов применяется также при объединении нескольких наблюдений. После тренировки прием весов можно применять для уравнивания без расчетов — на глаз.

Прием антимедиан при определении вероятнейшего места по трем высотным линиям. Этот прием является геометрическим следствием одного варианта МНК и применим при трех равновесных высотных линиях, т.е. если ошибки линий одинаковы. Выполним прокладку трех линий и получив треугольник ошибок, вероятнейшее место получаем в точке пересечения двух антимедиан треугольника

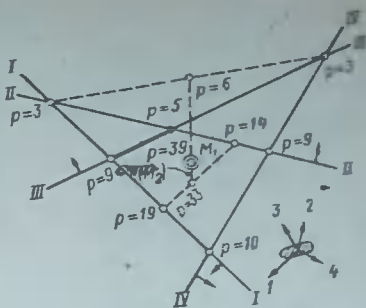


Рис. 121

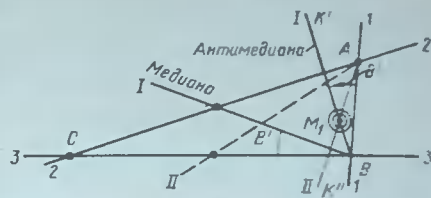


Рис. 122

(рис. 122). Антимедианой называется зеркальное отражение медианы в биссектрису. Она строится следующим образом. Проведем из вершины B медиану стороны AC и отметим более острый $\angle B'$, образованный ею со стороной BC . Отложим $\angle B'$ от другой стороны BA этого угла треугольника и проведем прямую BK' — это и будет антимедиана. Построив аналогично вторую антимедиану AK' , в точке пересечения этих антимедиан получим вероятнейшее место M_1 . Сравняв решение этого примера с решением методом весов, видим, что места M_1 совпадают.

Оценка точности места при трех, четырех и более ВЛП. При аналитическом определении вероятнейших координат по МНК можно получить также и элементы эллипсов ошибок или радиальную ошибку места M . Оценку точности места для практики достаточно производить круговой ошибкой $2M$, тем более, что эллипс в этих случаях близок к кругу ошибок.

При решении на ЭВМ в программу можно ввести расчет радиальной ошибки M по формуле (239):

$$M = \sqrt{\frac{[p_i]}{[P_{ij}]}}$$

где веса p_i линий и P_{ij} точек пересечения линий определяются по формулам (235) и (237).

¹Точка M_2 получена по методу биссектрис.

Для обычного «ручного» расчета формула (239) упрощается следующим путем.

Для трех равнооточных линий эта формула примет вид

$$M = m_n \sqrt{\frac{3}{\sum \sin^2 \Delta A}} \quad (251)$$

Для четырех равнооточных линий получим

$$M = m_n \sqrt{\frac{4}{\sum \sin^2 \Delta A}} \quad (252)$$

При равномерном распределении светил по всему горизонту вместо этих

формул получим удобную для вычисления приближенную формулу

$$M = k \frac{2m_n}{\sqrt{N}} \quad (253)$$

где $k = 1$ при симметричном распределении светил;
 $k = 1,25$ при отклонениях от симметрии;
 N — число линий.

В среднем для трех линий можно приближенно принимать $M = 1,3m_n$, для четырех $M = 1,3m_n$. Полученный радиус круга ошибок рекомендуется удваивать, т. е. $R = 2M$, при этом вероятность нахождения точки в этом круге около 95 %.

§ 70. ОТЫСКАНИЕ МЕСТА ПРИ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ОШИБКАХ МЕТОД АСТРОНОМИЧЕСКИХ БИСSEКТРИС

В § 68 мы установили, что большая повторяющаяся ошибка во всех линиях встречается редко (и всегда с обязательной случайной ошибкой v), но ее появление все же возможно. В этом случае для получения места уравнения ВЛП запишем в идеализированном виде, предположив, что $v = 0$ и имеется только Δ :

$$\Delta \varphi \cos A_i + \Delta W \sin A_i = n_i + \Delta. \quad (254)$$

Для определения неизвестных $\Delta \varphi$, ΔW и Δ теперь требуется три уравнения (254), которые и решаются алгебраическими приемами. Однако это решение получено для нереального предположения, что $v = 0$, поэтому представляет частный — теоретический случай решения в противоположность МНК. Полу-

ченное место M_2 представляет также крайнее теоретически возможное место, а не действительное место судна, как иногда считают.

Решение уравнений (254) при наличии Δ можно выполнить образованием их разностей, при этом исключается Δ . В графическом варианте этот прием приводит к применяемому на практике методу астрономических биссектрис.

Метод астрономических биссектрис. Если в линиях I—I' и II—II' (рис. 123) имеются одинаковые величины $(+\Delta)$, то смещенные линии I—I' и II—II' дадут в пересечении место M_2 . Вводя величины $-\Delta$, получим M_2' и т. д. Эти места лежат на прямой Б—Б', называемой астрономической биссектрисой, она делит угол между линиями в направлении среднего азимута $A_{ср}$. Проще всего ее построить, если при M_2 провести стрелки 1 и 2 в направлении на светила (по их азимутам) и разделить указанный ими угол между ВЛП пополам.

Уравнение астрономической биссектрисы. Если записать два уравнения (254) и из второго вычесть первое, то Δ исключится в после преобразований получим

$$\Delta \varphi \cos (A_{ср} + 90^\circ) + \Delta W \sin (A_{ср} + 90^\circ) = l,$$

$$\text{где } l = \frac{1}{2} (n_2 - n_1) \operatorname{cosec} \Delta A.$$

Эта формула представляет уравнение разностной линии положения или астрономической биссектрисы, которую можно

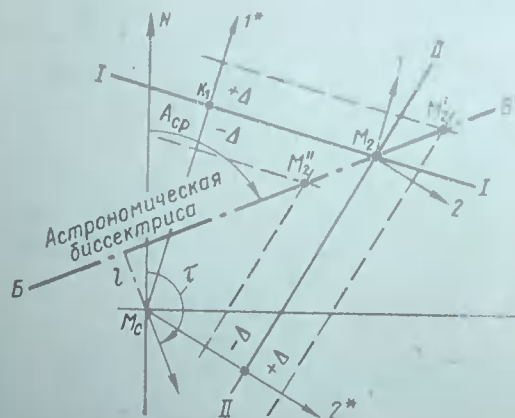


Рис. 123

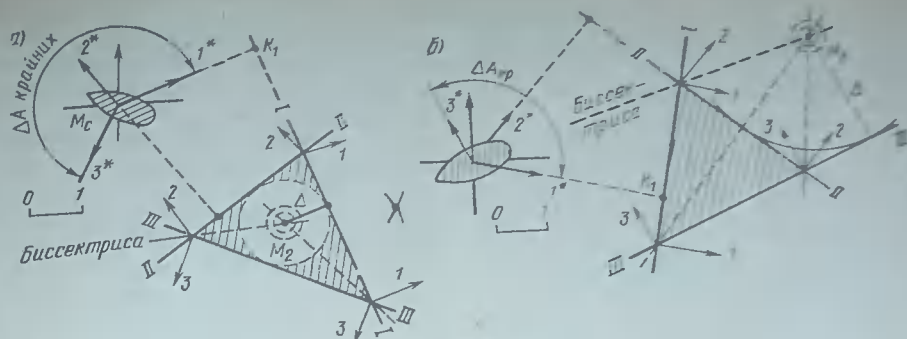


Рис. 124

построить по $\tau = A_{\text{ср}} + 90^\circ$ и переносу l (см. рис. 123). Учитывая, что биссектрисы построены по линиям, содержащим случайные ошибки v , оцениваемые $\pm m_n$, получим, что ошибка m_b астрономической биссектрисы выражается формулой

$$m_b = \frac{m_n}{\sqrt{2}} \operatorname{cosec} \frac{\Delta A}{2} \quad (255)$$

Из формулы (255) видно, что m_b изменяется от $0.7m_n$ (при $\Delta A = 180^\circ$) до ∞ (при $\Delta A = 0^\circ$), т. е. биссектрисы точны при угле между линиями в 180° (при светилах в обратных азимутах) и менее точны при углах ΔA , меньших 90° ; при $\Delta A \leq 45^\circ$ ошибка превышает $2m_n$, и биссектрисы неприменимы. Рассмотрим применение метода биссектрис.

При определении места по двум ВЛП получается одна астрономическая биссектриса, она указывает направление Б—Б', в котором могут быть смещены места при наличии повторяющейся ошибки Δ . Ошибка ΔM места определится по формуле (222). При $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta$ получим

$$\Delta M = \Delta \sec \frac{\Delta A}{2} \quad (256)$$

Из этой формулы видно, что ошибка ΔM меньше при $\Delta A < 90^\circ$.

При определении по трем линиям (при наличии Δ) получается треугольник ошибок (рис. 124), «разгон» которого методом астрономических биссектрис (делением угла между стрелками азимутов) имеет два случая:

светила наблюдались в разных частях горизонта ($\Delta A_{\text{кр}} > 180^\circ$). Пост-

роив две астрономические биссектрисы (рис. 124, а), в точке их пересечения (внутри треугольника) получаем место M_2 , а величина Δ равна радиусу описанного круга, знак Δ — по направлению смещения линий (на рис. 124, а $(+\Delta)$):

светила наблюдались в одной части горизонта ($\Delta A_{\text{кр}} < 180^\circ$). Точка пересечения биссектрис оказывается вне треугольника (рис. 124, б). В ней и принимается место M_2 ; ошибка Δ равна радиусу касательной окружности, знак ее — по направлению смещения любой из линий. Из рис. 124 видно, что при трех линиях только одна биссектриса — независимая, две другие зависят от уже примененных линий, что делает положение этих биссектрис не вполне надежным, особенно от промаха (см. рис. 126).

При определении по четырем ВЛП наличие Δ приводит к образованию четырехугольника ошибок (рис. 125). Знак и величина Δ могут быть обнару-

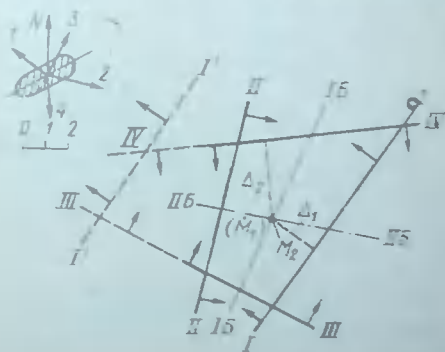


Рис. 125

жепы только в том случае, если светила наблюдались по всему горизонту и в обратных азимутах. В этом случае биссектрисы строятся между линиями, взятыми попарно — с ΔA ближе к 180° , т. е. для стрелок, расположенных «обе наружу» или «обе внутрь». Биссектрисы IB и $II B$ (см. рис. 125) можно проводить только, если все стрелки расположены одинаково — для пары $I-II$ «обе внутрь» (наружу) и для пары $III-IV$ «обе внутрь» (наружу). Это обозначает, что есть ошибка одинакового знака; ее можно принять за Δ . На рис. 125 показана пара $I'-II$ со стрелками «наружу» и пара $III-IV$ со стрелками «внутри», для них применять метод биссектрис нельзя, так как ошибка имеет разный знак (это может служить признаком промаха при больших размерах фигуры).

По биссектрисам IB и $II B$ получается место M_2 , а величина ошибки определяется по формуле

$$\Delta = \frac{1}{2} (\Delta_1 + \Delta_2), \quad (257)$$

где Δ_1 и Δ_2 — расстояния до линий I и IV , знаки их — по смещению линий.

Если четыре светила наблюдались в одной части горизонта, то решить, есть ли ошибка одного знака или это действие случайных ошибок или промахов, нельзя, поэтому метод биссектрис применять в этом случае не следует.

Аналогично анализируется место, полученное по астрономическим биссектрисам при пяти и шести линиях.

Возможности применения метода биссектрис. В реальных условиях одинаковая ошибка Δ во всех линиях встре-

чается редко, однако уже одинаковый знак в Δ дает возможность приблизительно применять метод биссектрис. Поэтому прежде всего следует установить, есть ли ошибка одного знака — по анализу направления стрелок, показанному выше для четырех линий, т. е. обе внутрь или обе наружу. Но такой анализ возможен только для четырех и более линий. При трех линиях невозможно выявить не только одинаковую Δ , но даже ошибки одного знака. Более того, если в одной (тем более — в двух) из линий сделан мелкий промах (например, вместо $\Delta h_p = -2'$ приняли $+2'$) или допущена ошибка при измерении высот вне вертикала, то метод биссектрис дает грубо неверное место — с увеличением промаха в несколько раз. На рис. 126 показано место M_2 , полученное по треугольнику ABC методом биссектрис и место M_1 — по МНК. Если в линии II допущен указанный промах на $4'$, линия займет положение II' , а треугольник перевернется ($A'B'C$) и метод биссектрис даст место M'_2 , отстоящее от M_2 на $12'$, МНК дает M'_1 , отстоящее от M_1 на $1.9'$. Следовательно, при выборе места по методу биссектрис и промахе в линии промах в результате увеличивается, а по МНК — уменьшается.

Подобная же опасность возникает и без промахов — за счет случайных ошибок. При введении Δ мы пренебрегли ими, а их ненаблюдаемое присутствие может привести к картине, аналогичной промаху.

Выводы. 1. Метод астрономических биссектрис можно применять для получения φ_0 , λ_0 и Δ только при четырех (и более) линиях, наблюдаемых в разных частях горизонта после установления, что в линиях есть ошибка одного знака. Графический прием дает такую возможность еще до выбора места.

2. При трех ВЛП метод астрономических биссектрис следует рассматривать как теоретический прием получения крайнего решения — места M_2 , которое может понадобиться при выборе места с учетом всех факторов, например если это место ближе к опасности или для применения обобщенного МНК. Применять его при трех линиях как отдельный прием не следует.

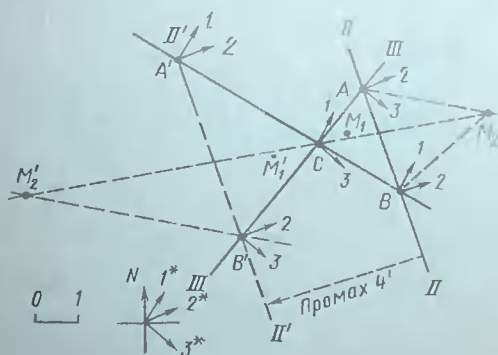


Рис. 126

3. При двух ВЛП метод биссектрис дает направление ($B-B'$ на рис. 123), по которому возможны смещения мест при появлении общей повторяющейся ошибки; это используется при планировании и анализе обсерваций.

Влияние постоянной ошибки во времени. Если во всех линиях есть одинаковая ошибка во времени, например от неправильной поправки хронометра ($\Delta T_{xp} = \Delta u$), то вычисляемые высоты и переносы n изменятся на разные вели-

чины: $\Delta h_T = \cos \varphi \sin \Delta T_{xp}$, но при прокладке или при решении уравнений (219), в которых вместо Δh подставлены Δh_T , по формулам (217) получим

$$\Delta \varphi = 0; \quad \Delta \lambda = \Delta T_{xp}, \quad (258)$$

т. е. вследствие общей ошибки во времени место сместится только по долготе на величину ошибки ΔT_{xp} при любом числе линий (κE при $-\Delta T$ и κW при $+\Delta T$). Это обстоятельство следует учитывать при анализе обсервации.

§ 71. ОТЫСКАНИЕ МЕСТА СУДНА И ОЦЕНКА ЕГО ТОЧНОСТИ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ОШИБОК. АНАЛИЗ ОБСЕРВАЦИИ

В реальных условиях в высотных линиях всегда есть случайные ошибки u , возможны промахи $[\gamma]$ и иногда могут быть заметные систематические ошибки Δ (ошибки поправок в пределах точности их определения есть всегда), поэтому уравнение линии примет вид

$$\Delta \varphi \cos A - \Delta W \sin A = n + u + \Delta \cdot [\gamma]. \quad (259)$$

Сумма ошибок входит в перенос в виде индивидуальной ошибки линии; эти ошибки после прокладки нескольких линий приводят к появлению фигуры погрешностей (треугольника или системы точек попарного пересечения линий). Обычно решить заранее, от преобладания каких ошибок возникла фигура погрешностей, затруднительно. Это затрудняет и аналитическое решение, так как неизвестно, надо ли вводить Δ и исключен ли промах. Для выхода из этого затруднения следует так планировать и выполнять наблюдения и их обработку, чтобы создать критерии для выявления ошибок, с которыми можно будет произвести анализ полученной фигуры ошибок и выбрать метод уравнивания.

Следовательно, необходимо:

планировать и выполнять наблюдения в соответствии с приводимыми ниже рекомендациями (ΔA , число наблюдений и др.);

после прокладки выполнять анализ обсервации на действие ошибок;

применять выбор места (МНК, биссектрисы), вытекающий из анализа.

Полные возможности выявления ошибок и уравнивания дает только увеличение числа линий до четырех при правильном их расположении; желательна пятая линия, как контрольная.

Для выбора места (уравнивания) можно применить два приема: графический способ комбинирования МНК и метода биссектрис и аналитический — «обобщенный метод наименьших квадратов». Графический способ удобнее при ручной прокладке, его преимущества — анализ конкретных ошибок и наглядность, недостаток — отсутствие общего аналитического подхода. Обобщенный МНК менее конкретен, но он может быть применен при решении на ЭВМ.

Графический способ анализа обсервации и выбора места. Поскольку планирование обсервации определяет последующие операции, рассматриваем его первым. Планирование заключается в выборе числа линий, оптимальной разности азимутов, высот, времени наблюдений и их условий.

Определение по двум ВЛП. Выгодные условия наблюдений. Выгодная разность азимутов для случайных ошибок определится по формуле (242), а систематических — по формуле (256). Построив кривые I и II по этим формулам (рис. 127), видим, что для кривой I выгодна $\Delta A = 90^\circ$, а для кривой II — $\Delta A < 90^\circ$. Оптимально для обеих — $\Delta A = 60^\circ \div 80^\circ$ допустимы — от 30° до 140° . Если же требуется не место, а на-

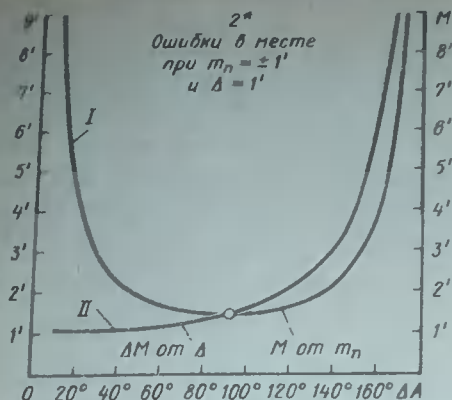


Рис. 127

дежное направление, то для меньших ошибок в линии пути следует подбирать $A_{ср}$ вдоль линии пути (рис. 128, а), а для пройденного расстояния — подбирать $A_{ср}$ перпендикулярно пути (рис. 128, б). Высоты светил подбираются в пределах 10–73° и наблюдаются серии по 3–5 высот. Время наблюдений определяется в каждом способе отдельно.

Анализ обсервации. В случае двух ВЛП данных для выявления промахов нет, кроме крупных — по формуле (230). Не выявляются также систематические ошибки. Поэтому анализ ограничен, а место недостаточно надежно. Оценка точности производится построением полного эллипса ошибок [8]; применим и дальнейший утроенный его полуоси (см. стр. 198 и пример 70). Для равнооточных

ВЛП полуоси можно определить по формулам:

$$a = \frac{\sqrt{m_a^2 + m_b^2}}{\sqrt{2} \cos \frac{\Delta A}{2}}; \quad b = \frac{m_c}{\sqrt{2} \sin \frac{\Delta A}{2}} \quad (290)$$

где m_n — СКО высотной линии;
 m_a — СКО поправки;
 Δ — полуразность азимутов, направленных на $A_{ср}$.

Определение по трем ВЛП. Выходные условия наблюдений. Для определения выгодной ΔA по формулам (251) и (255) и (242) — для крайних биссектрис построены графики ошибок (рис. 129), из которых видно, что минимум M находится в двух местах, а для биссектрис только около 120°. Следовательно, при трех ВЛП выгодна $\Delta A = 110 \div 130$ между звездами; в районе же $\Delta A = 90^\circ$ и меньше действие ошибок делает место, определенное методом биссектрис, ненадежным, и при $\Delta A < 45^\circ$ применять его нельзя.

Анализ обсервации и выбор места. Прокладка трех линий положения всегда дает треугольник ошибок — следствие их совместного действия (его отсутствие — случай комбинации ошибок). Поэтому лишь чрезмерная величина треугольника (больше 15–20') укажет на явный промах, небольшие же промахи и систематические ошибки не выявляются, т. е. анализ ограничен и место не полностью надежно.

Для отыскания места при наличии треугольника следует применить оба рассмотренных выше метода: МНК (M_2) и астрономических биссектрис (M_1).

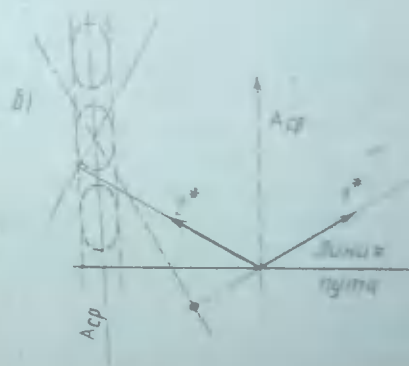
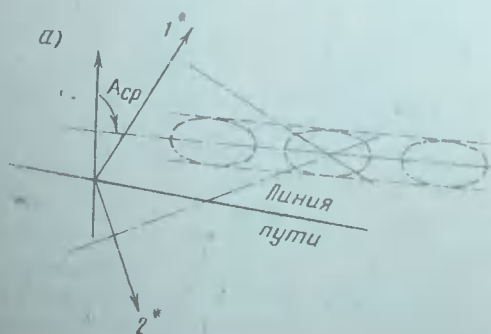


Рис. 128

При расположении светил в разных частях горизонта (рис. 130, а) оба места оказываются рядом, поэтому принимается место M_1 как более общий случай. Такой подбор светил и является выгодным.

Спорный случай получается при расположении светил в одной части горизонта (рис. 130, б). Место M_1 , определенное приемом весов, получается внутри треугольника, место M_2 — по методу биссектрис — вне треугольника. Решение о выборе места принимается исходя из конкретных гребований данного случая, опираясь на следующие критерии:

в соответствии с требованиями безопасности плавания принимается то место, которое ближе к опасности;

когда требуется вероятнейшее место, надо учесть статистические данные экспериментов о величинах и действиях ошибок, по которым при современном соотношении m_n и m_Δ получим: при двух острых углах треугольника ($\Delta\Delta$ меньше 45°) место принимается в M_1 (по МНК); при больших $\Delta\Delta$ место принимается между M_1 и M_2 ; по рекомендациям [3] — на линии l_l между ними в точке M_0 (см. рис. 130, б).

Оценка точности места. При трех линиях можно применять круговую ошибку радиуса $R = 2M$. Если светила расположены в разных частях горизонта, то M вычисляется по формулам (251) или (253). Если же светила наблюдались в одной части горизонта, то при оценке точности места следует учесть ошибки биссектрис. Для $\Delta A = 60^\circ$ приближенно $M = 2,2m_n$ и $R = 2M \approx 4,4m_n$, эту величину можно приближенно применять для светил в одной части горизонта.

Определение по четырем ВЛП. *Выгодные условия определения.* Оптимальной ΔA для метода биссектрис является 180° [формула (255)], т. е. светила должны наблюдаться парами в обратных азимутах. По формуле (242) выгодная разность азимутов между биссектрисами 90° . Для метода наименьших квадратов выгодно, если все вершины имеют $\Delta A = 90^\circ$. В этом случае оптимальные условия совпадают. Поэтому для определения по четырем светилам следует подбирать их попарно в обратных азимутах

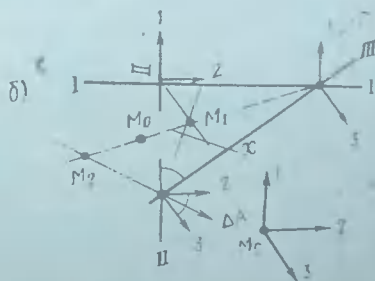
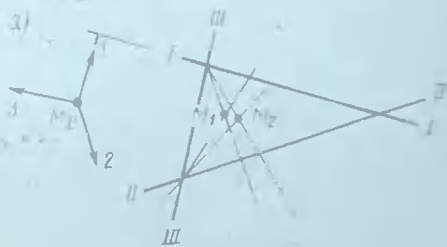
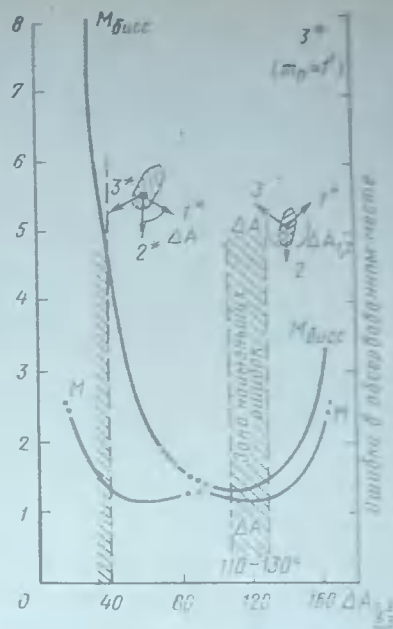


Рис. 130

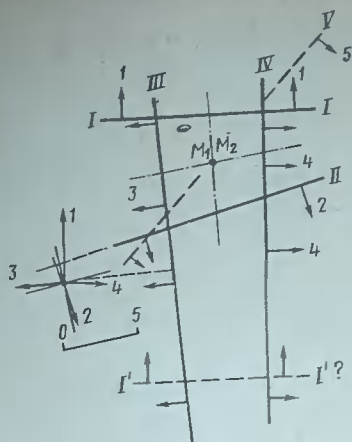


Рис. 131

явить промах и исключить систематическую ошибку, как показано ниже.

Анализ обсервации на промахи и систематические ошибки. Выбор места. После прокладки четырех линий образуется фигура погрешностей с четырьмя, пятью или шестью точками попарного пересечения линий. Анализ расположения линий и размеров фигуры позволяет выявить промах и систематическую ошибку. При линиях положения расставляются стрелки в направлении азимута светил (рис. 131). Если размеры сторон четырехугольника больше удвоенного критерия (231), т. е. $5-7'$, то, вероятно, имеются промахи.

Если размеры сторон меньше, а все стрелки направлены одинаково внутрь или наружу от центра, то в линиях есть ошибка постоянного знака, а промахи, по-видимому, отсутствуют. При этом можно применить метод биссектрис и место M_2 принять за M_0 (оно близко к M_1 , но получается проще); систематическая ошибка определится по формуле (257).

Если же при таком же четырехугольнике одна пара стрелок направлена внутрь, другая наружу ($II-I'$), то возможен промах, но в какой линии — можно судить только по «отскоку» линии. Так, на рис. 131 «подозрительной» является линия $I'-I'$. Проверка ее вычислений обычно выявляет просчет. Объективным критерием служит пятая линия, наблюдаемая в промежуточном

азимуте; ее можно до анализа не обрабатывать.

Если четырехугольник мал (менее $4m_n \approx 3-5'$), то при любом расположении стрелок промаха, очевидно, нет; преобладают случайные ошибки, поэтому применяется МНК — по весам учитываются все шесть точек пересечения и место принимается в M_1 .

При наблюдении четырех ВЛП в одной части горизонта места M_1 и M_2 не совпадают и, так же как при трех линиях, место выбирается либо ближе к опасности, либо посередине между M_1 и M_2 . В этом случае выявить ошибки одного знака и промахи также нельзя, и обсервация не получается надежной. Вот почему надо наблюдать светила обязательно в обратных азимутах.

Оценка точности. Оценка точности производится радиальной ошибкой по формуле (253) или приближенно $R = 2M \approx 2.2m_n$.

Место, определенное по четырем линиям, достаточно надежно, но у одиночного наблюдателя остается возможность ошибки во времени (см. формулы (258)), поэтому он должен после наблюдений вторично проверить время (например, остановить секундомер по другому хронометру или по сигналам времени, проверить $\omega_{\text{зр}}$ и часовые углы). Если привлекался второй наблюдатель, то среднее место отстоит от истинного обычно в пределах $0.5'$.

При наблюдениях большего числа линий анализа производится аналогично, однако более пяти линий наблюдать нет смысла.

Рекомендации по обеспечению надежности обсервации. Проведенный анализ действия ошибок позволяет дать следующие рекомендации по планированию, выполнению и анализу обсервации с целью повышения ее надежности.

1. По возможности получать место по четырем или более ВЛП: для этой цели применять наблюдения «через зенит», если нет четырех светил.

2. Наблюдения следует планировать: при четырех линиях — с $\Delta A = 180^\circ$ в парах и с $\Delta A = 90^\circ$ между парами; при трех ВЛП — с $\Delta A = 120^\circ$ между светилами; при двух линиях — в общем случае с $\Delta A = 60-80^\circ$, а для особых задач — по направлению $A_{\text{ср}}$. Выбирать оптимальные условия наблюдений.

3. Наблюдать серии из 3—5 высот.

4. После прокладки линий выполнять следующий анализ:

произвести общую оценку разброса линий. Если он больше $10'$, то в обсервации есть промахи, и следует проверить вычисления;

проанализировать на систематические ошибки и промахи, для чего построить при линиях стрелки в направлении азимутов. При двух линиях они укажут $A_{ср}$ — направление возможного сдвига мест при наличии Δ . При трех линиях между стрелками строятся биссектрисы и определяется возможное место M_2 . При четырех линиях выполняется полный анализ: если стрелки в парах направлены одинаково внутрь или наружу, значит есть Δ и можно применить биссектрисы (в парах) и получить место M_2 ; если — различно, то либо есть промахи (при расхождении линий более $5'$), либо действуют случайные ошибки и место (по МНК) в M_1 .

5. Оценку точности при двух линиях выполнять построением эллипса ошибок [формулы (260)] с утроенными осями. При трех и четырех линиях — оценивать круговой ошибкой $R = 2M$.

6. Для повышения надежности обсервации привлекать второго наблюдателя, работающего независимо. Применять наблюдения «через зенит».

Аналитический «обобщенный метод наименьших квадратов» (понятие). Обобщенный метод наименьших квадратов представляет метод уравнивания зависимых наблюдений, т. е. уравнивания с учетом корреляции обсервованных высот, обусловленной ошибками общих поправок. В применении к задачам судовождения этот метод разрабатывали или исследовали В. В. Каврайский, В. Т. Кондрашихин, В. А. Коугия, М. И. Скворцов, Р. А. Скубко, А. Н. Раховецкий, В. В. Вейхман, Е. В. Яковлевич, Б. И. Никифоров, Г. В. Макаров и др.

До уравнивания промахи в измерениях или поправках должны быть выявлены, например, пользуясь формулой (230).

В этом методе повторяющиеся ошибки поправок оцениваются их статистически полученными дисперсиями и величинами m_Δ (в эту величину входят ошибки Δd , Δs , Δi , Δu и личные ошибки наблюдателей). Так как в данной обсервации эти индивидуальные ошибки повторяются во всех линиях, то линии перестают быть независимыми. Однако связь между ними — вероятностная, так как применяются статистические оценки ошибок. При применении обычного МНК уравнения включают только случайные ошибки v и принима-

ются независимыми, их обработка даст место M_1 (см. рис. 130).

Если в уравнениях присутствуют только повторяющиеся ошибки Δ , то получается место M_2 . В действительности уравнения линий включают и случайные, и систематические ошибки (259) и в определенной степени зависимы. В общем виде зависимость линий определяется корреляционной матрицей, включающей m_Δ всех источников ошибок. В применении к линиям положения, по предложению В. Т. Кондрашихина, степень зависимости линий определяется отношением дисперсий случайных ошибок m_n линий и ошибок m_Δ поправок, т. е. величиной λ .

$\lambda = \frac{m_n^2}{m_\Delta^2}$, при этом матрица сведется к коэффициенту корреляции K_m , вычисляемому по формуле

$$K_m = \frac{1}{1 + \frac{m_n^2}{m_\Delta^2}} \quad (261)$$

Здесь величина m_n может получаться из данных наблюдений или оцениваться априорно; величина m_Δ получается по средним статистическим данным.

По данным официальных руководств получаем $K_m = 0,3 \div 0,7$; величина 0,3 принимается при работе с наклономером и новыми секстансами; 0,7 — без наклонометра и со старыми поправками s ; практически линии принимаются равнозначными. В обобщенном МНК уравнивание наблюдений, в данном случае высотных линий положения, производится, также основываясь на принципе наименьших квадратов, но с учетом отношения ошибок m_n^2/m_Δ^2 , т. е. коэффициента корреляции K_m , по формуле

$$\sum p_i v_i^2 + K_m [(N-1) \sum p_i v_i^2 - (\sum v_i \sqrt{p_i})^2] = \min. \quad (262)$$

Выполнив решение аналогично рассмотренному для МНК в § 69 [см. формулы (246), (247)], получим в общем виде:

$$\Delta\varphi = \frac{C_1 E_2 - E_1 C_2}{N_1}; \Delta W = \frac{F_1 C_2 - C_1 E_1}{N_1}, \quad (263)$$

где $N_1 = F_1 E_1 - E_1^2$; C_1 , E_1 , C_2 , E_2 , F_1 — коэффициенты нормальных уравнений, приведенные в работах [4] и [5].

Далее по формулам (248) получают вероятнейшие φ_B и λ_B . Коэффициент корреляции K_m входит во второй член формул коэффициентов. При $K_m = 0$ формулы (263) обращаются в (247), т. е. в обычный МНК, и получается место M_1 ; при $K_m = 1$ получается алгебраическое решение уравнений и место M_2 по методу биссектрис; при этом можно вычислить и повторяющуюся ошибку. При промежуточных значениях K_m места располагаются на прямой $M_1 M_2$ в зависимости от принятого K_m . Это обстоятельство позволило

разработать графические варианты обобщенного МНК. Для случая трех высот, измеренных в секторе, меньшем 180° , место M_0 получается на прямой между местами M_1 и M_2 , полученными графически, в расстоянии $x = \mu M_1 M_2$ от M_1 (см. рис. 130, б), где μ определяется выражением

$$\mu = \frac{1}{1 + \left(\frac{m_n}{m_\Delta}\right)^2 \frac{\sum \sin^2 \Delta A}{(\sum \sin \Delta A)^2}} \quad (264)$$

Различные авторы принимали разные данные о m_n и m_Δ при различных ΔA , отсюда в литературе появились рекомендации принимать x от $1/4$ до $1/2$ расстояния $M_1 M_2$.

Алгоритм обобщенного МНК оказался удобным при решении задач определения места на ЭВМ. Он дает как общее (для средних условий) решение, так и крайние решения — место M_1 и M_2 ; это позволяет в условиях неопределенности выбрать место ближе к опасности, чем при других, более жестких алгоритмах, невозможно.

Можно предполагать, что в дальнейшем алгоритмы обобщенного МНК будут совершенствоваться в сторону учета не среднего K_m , а корреляционной матрицы, вывода Δ , а также выявления промахов.

При ручном решении задачи следует предпочесть рассмотренное выше графическое решение.

Глава 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ СВЕТИЛ

§ 72. ОСОБЕННОСТИ ОДНОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Светила могут быть видны одновременно, тогда их высоты можно измерять в быстрой последовательности. Такие наблюдения называются одновременными, и они практически не зависят от ошибок счисления. Характерным для этой обсервации является то, что вычисления ведутся с одними координатами φ_c , λ_c , а перемещение судна учитывается приведением линий к одному зениту. Куда счисление входит только в виде малых поправок. Если же видно одно светило, например Солнце, и его наблюдают через большой интервал времени, то наблюдения называются разновременными; при этом вычисления линий ведутся с разными φ_c^i , λ_c^i , и обсервация получается счислимо-обсервацией. Оче-

видно, на этом определении сказываются ошибки счисления. Одновременные наблюдения точнее, и их следует предпочитать разновременным.

Одновременная видимость нескольких светил и горизонта бывает только в определенные периоды: в сумерки, иногда лунной ночью, иногда днем — Солнца, Луны, Венеры. Кроме того, необходимы выгодные условия наблюдений, включающие физические и геометрические факторы: качество видимости горизонта и светил, высоты светил, разности их азимутов. Поэтому наблюдения лучше планировать перед их выполнением. Планирование включает выбор или расчет времени наблюдений, подбор светил исходя из выгодных условий, требуемой точности и надежности обсервации и организацию наблюдений. Все вопросы, связанные с наблюдениями и их планированием, рассматривались в предыдущих разделах курса, поэтому далее рассмотрим их практическое применение для сумеречных наблюдений звезд (общий случай), дневных наблюдений Солнца и Венеры или Луны.

Приведение высот к одному зениту (месту на Земле). Одной из особенностей обработки одновременных наблюдений является приведение высот к одному зениту, т. е. намеченному счислимому месту, рассмотренное в § 54. Высоты светил на ходу судна измеряются из разных мест ($C_1, C_2 \dots$, рис. 132), а об-

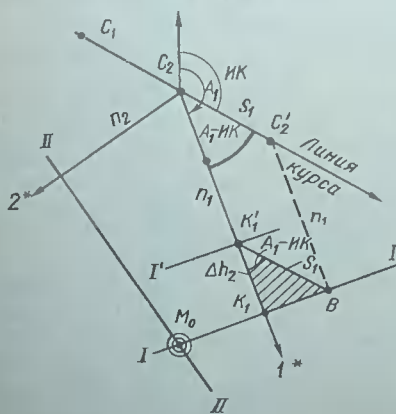


Рис 132

рабатывается с одними координатами (например, точки C_2). К этому зениту и надо приводить все линии. Для этого в высоты вводятся поправки $\Delta h_z = \Delta h_y \Delta T$, вычисленные по таблицам (см. пример 67). Если высота приводится к предыдущему зениту, т. е. назад, то знак поправки Δh_y , приведенный в табл. 16 МТ—75, меняется на обратный. Этот аналитический прием и применяется при обычной обработке наблюдений (по схеме примера 67).

Графический прием приведения к одному зениту. Вместо введения поправки в измеренную высоту можно применить графическое перемещение линии или точки прокладки способом крьюс-расстояния. Для этого после прокладки из C_2 (см. рис. 132) обеих линий, рассчитанных с ее координатами, из определяющей точки K_1 прокладывается плавание S_1 за время между наблюдениями по направлению ИК (при приведении назад — в обратном направлении) и через точку B перпендикулярно A_1 проводится линия $I—I$; смещение $K_1 K_1' = \Delta h_z$ [формула (174)]; аналогично можно смещать точку прокладки C_2 .

Этот прием применяется в ускоренных способах (§ 80—82).

Общая последовательность выполнения обсервации. Выполнение обсервации по одновременным наблюдениям состоит из четырех этапов.

1. Предварительные операции: выбор времени наблюдений, подбор светил, проверка приборов, получение поправок (u, i, e, d).

2. Наблюдения высот с регистрацией моментов; получение навигационной информации $T_{\text{ср.}}, \alpha, \varphi, \lambda, \text{ПУ (ИК)}, V, M_{\text{ср.}}$.

3. Обработка наблюдений: получение $T_{\text{ср.}}, t_m$ и δ светил; исправление высот; вычисление h_c, A_c, n ; прокладка линий.

4. Анализ обсервации: выделение промахов и систематических ошибок, отыскание вероятнейшего места, оценка его точности, использование полученной информации для навигации.

В такой последовательности выполняются обсервации в общем случае. При ускоренных и упрощенных способах, часто применяемых на практике, некоторые операции объединяются и сокращаются.

§ 73. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПО ЗВЕЗДАМ. ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ

Общий случай определения по звездам представляет обсервацию, выполненную в общем теоретическом порядке, без упрощений и сокращений. Она может выполняться в сумерки или ночью и планироваться заранее или выполняться экспромтом при неожиданной видимости, но в любом случае следует стремиться к выполнению рекомендаций по времени наблюдений. $\Delta A, h$ и др. Предпочтительнее выполнять вычисление h и A по таблицам ВАС—58 или по ЭКВМ. Отметим, что на практике обсервацию по четырем и более звездам лучше выполнять ускоренными способами (гл. 19). Обсервация дает лучшие результаты, если ее планировать заранее и выполнять в следующем порядке.

Предварительные операции. *Определение времени наблюдений.* Наибольшее влияние на точность измерения высот звезд оказывает видимость горизонта, а одновременно звезды и горизонт

видны обычно в сумерки. Поэтому надо стремиться начинать наблюдения вечером в самые ранние сумерки, а утром — в поздне, для чего время начала рассчитывается по формулам: $T_{\text{гр}}^{\text{нач}} = T_{\text{гр}}^{\text{акк}} + \frac{\Delta T}{2}$ (вечером) и $T_{\text{гр}}^{\text{нач}} = T_{\text{гр}}^{\text{нав. сум}} + \frac{\Delta T}{2}$ (утром), как показано в § 31, 32 и примерах 28, 67. В лунную ночь наблюдения выполняются в моменты видимости горизонта, т. е. чаще неожиданно.

Подбор светил для наблюдений. Одновременно можно наблюдать звезды, планеты и Луну, но чаще наблюдаются одни звезды, так как обработка при этом проще. Подбор светил производится по глобусу или таблицам ИО-249. Условия подбора: самые яркие звезды с высотами от 10° до 73° и $\Delta A = 90^\circ$ для двух звезд, с ΔA до 120° — для трех и с ΔA до 90° — для четырех (см. § 40 и 71, пример 40).

Подобранные звезды и их h и A записываются в ЗКШ, полезен также рисунок с курсовыми углами звезд (рис. 133).

Проверка приборов, получение поправок. Перед наблюдениями секстан и секундомер приготавливают и проверяют, как показано ранее в § 37 и 48. Поправку i лучше определять по Солнцу (перед заходом), но можно и по звезде; поправка $u_{\text{кр}}$ приводится ко времени наблюдений или получается по сигналам времени (слышным круглые сутки); проверяется высота глаза (или d).

Наблюдения. Наблюдения выполняются, как описано в § 48. Для гарантии от промаха наблюдается по три высоты каждой звезды (см. пример 43), а секундомер останавливается по другому хронометру или сигналам времени, как показано в § 48. Обработка наблюдений ведется по средним os и T . При правильном выборе времени сумерек освещения не требуется (по правилу: «видишь отсчеты — наблюдай, не видишь — вечером заканчивай, утром не начинай»). После конца наблюдений или в момент пуска секундомера получается навигационная информация: T_c ; $ол$; $ПУ$, V ; M_c и φ_c ; λ_c .

Обработка наблюдений. Производится по схеме, приведенной в примере 67. В этой схеме все операции уже известны по предыдущим разделам курса, новым является только приведение к одному зениту. В примере 67 приведение выполнено аналитически и графически. Прокладка выполнена на бланке, причем применен линейный масштаб.

Анализ обсервации. Определение промахов и систематических ошибок. Величины переносов должны укладываться в предполагаемые ошибки счисления [формулы (230)]; линии, выходящие за

эти пределы, следует проверить. После прокладки фигура погрешностей не должна содержать «отскоков» линий за пределы точности. При четырех линиях промах и систематическая ошибка выявляются, как показано в § 71, по направлению стрелок азимутов в парах линий; при двух и трех линиях систематические ошибки и небольшие промахи не выявляются.

Выбор вероятнейшего обсервованного места. При двух линиях место принимается в пересечении линий, а его точность оценивается построением эллипса ошибок [формулы (261)]. При трех линиях, полученных по светилам в разных частях горизонта, вероятнейшее место принимается в середине треугольника по методу весов (M_1). При светилах в одной части горизонта получается два места: M_1 и M_2 (по методу биссектрис); за обсервованное принимаем то из них которое ближе к опасности. Вероятнейшее место в этом случае определяется по обобщенному методу наименьших квадратов, как показано выше. При четырех линиях место лучше всего выбирать по методу весов — в середине фигуры погрешностей. Оценка точности при трех и четырех линиях производится построением круга ошибок по формулам (251) — (253) с удвоением M , что дает вероятность около 95 %. Если получены две обсервации, то после графического приведения к одному зениту они осредняются по методу весов.

Использование полученной информации для навигации. Каждая обсервация должна сопровождаться анализом счисления. По направлению от счислимого места на обсервованное определяется невязка C (например, на рис. 134 $C = 115 - 8,0'$), и далее обсервация анализируется.

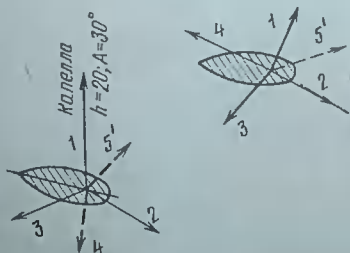
Ошибки в пути $\Delta ПУ$ и в учете расстояния (коэффициенте лага) определяются по приближенным формулам:

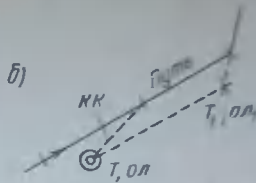
$$\Delta ПУ = \Delta \alpha = 57,3 \frac{D_k}{S}; \quad k_k = -\frac{S + D_s}{S}, \quad (255)$$

где D_k ; D_s — составляющие невязки по боковому смещению и по курсу;

S — расстояние от предыдущей обсервации до счислимой точки.

Величины $\Delta \alpha \pm 1 \div 1,5'$ и коэффициент лага от 0,98 до 1,02 можно считать





следствием обычных случайных ошибок счисления. Если же они превышают эти величины, то отклонения следует отнести к систематическим ошибкам в поправках приборов или принятом течении. Особенно полезен анализ последовательных обсерваций — через 6—12", например в вечерние и утренние сумерки и т. д. Если снос получается в одном направлении и возрастает, то это показывает, что в обсервациях нет промахов и что действует постоянная причина сноса. Анализ позволяет штурману судить о работе приборов, устойчивости их поправок и правильности учета течения и дрейфа.

Перенос счисления в обсервацию. В результате анализа принимается решение о переносе счисления в обсервованное место. Как правило, обсервация по двум и трем звездам недостаточно надежна для переноса счисления; если же привлекался второй наблюдатель или обсервация выполнена по четырем звездам, то после анализа переносить счисление можно с учетом обстоятельств плавания. Перенос счисления сопровождается определенными действиями: либо изменением курса для выхода на путь намеченный предварительной прокладкой (рис. 134, б), либо изменением времени плавания до поворота на следующий путь. Соответствующие расчеты KK или T_1 и $ол_1$ производятся по данным с карты.

Пример 67. 10.05.85 г. в Атлантическом океане требуется определить место по звездам в вечерние сумерки. На $T_c = 20^\circ$ (по предыдущему заходу) $\varphi_c = 27^\circ 40' N$; $\lambda_c = 67^\circ 20' N$ ($M_c = 3W$).

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Расчет времени наблюдений

Заход	T_T	$18^h 27^m$
	ΔT_{φ}	$+12 (+17)$
	T_M	18 39
+	λ	4 29
Заход	$T_{ГР}$	23 08
	$\Delta T/2$	$+ 13$
	$T_{ГР}$	$23^h 21^m$ $T_C = 20^h 21^m$

Начало наблюдений

1.2. Расчет $S_{\text{д}}$

i_T^V	213°40,9'
Δt	3 15,9
i_{TP}^V	218 56,8
λ	67 20
$S_M = i_M^V$	151°36,8'

1.3. Подбор звезд
По звездному гло-
бусу получаем:
 α Б. Пса ($N_2=46$)
 $h_1=24^\circ$, $A_1=233^\circ$
 α Возничего (28)
 $h_2=31^\circ$, $A_2=308^\circ$

2.3. Получение поправок: $u_{\Sigma R} = -0^m 38^s$.

$i = +0,9'$ (по Солнцу); $s_1 = -0,2'$; $s_2 = -0,3'$ (по h с глобуса); $d = 16,5$ м; $i = -22^\circ$;

$B = 750$ мм; пуск секундомера в $T_{\text{гр}} = 23^{\text{ч}} 16^{\text{м}}$;

$$T_{\Delta D} = 23^h 16^m 00^s - (-0^m 38^s) = 11^h 15^m 22^s$$

2. Наблюдения.

2.1. Измерение высот:

	*Сириус		*Капелла	
	$T_{\text{СКМ}}$	α	$T_{\text{СКМ}}$	α
Средние	$4^{\text{м}}58^{\text{с}}$	$24^{\circ}08,5'$	$8^{\text{м}}57^{\text{с}}$	$30^{\circ}31,2'$

(Выполнение осреднения «по разностям», см. пример 43)

$$T_c = 20^{\circ}25^M (\lambda_c = 3^W) \text{ ол} = 21,4;$$

$$\varphi_c = 27^{\circ}35'N; \lambda_c = 67^{\circ}26'W;$$

$$KK = 255^{\circ} (-1^{\circ}); V = 17 \text{ уз};$$

$$m_n = \pm 0,5'; m_{\Delta} = \pm 0,7'.$$

3. Обработка наблюдений.

3.1. *Сириус (46) *Капелла (28)

$T_{\text{ГР}}^n$	23 ^h 16 ^m 00 ^s	23 ^h 16 ^m 00 ^s
$T_{\text{СВМ}}$	4 58	8 57
$T_{\text{ГР}}$	23 ^h 20 ^m 58 ^s	23 ^h 24 ^m 57 ^s 10.05
i_z	213°40,9'	213°40,9'
Δt	5 15,4	6 15,3
$i_{\text{ГР}}^N$	218 56,3	219 56,2
λ_c	67 26	67 26
i_M^N	151 30,3	152 30,2
τ	258 52,9	281 06,7
i_M^*	410 23,2	433 36,9
$i_{\text{ГР}}^*$	50 23,2'	73 26,9'W
δ_*	16°41,8'S	45°59,2'N

	23°55,8'	126,7°
$\varphi = 28^{\circ} - 25^{\circ}N$	+14,9'	-0,2°
$\delta = 17 - 18,2S$	+12,1	-0,3° = 132°
$i = 50 - 23,2W$	-16,6	-0,3
	-0,1	
h_c	24°05,6'	$A_c = 125,9^{\circ}NW =$ $= 234,1^{\circ}$
	30°26,9°	50,8
$\varphi = 28^{\circ} - 25^{\circ}N$	-15,9'	-0,2°
$\delta = 46 - 0,8N$	-0,1	0,0° $\alpha = 80^{\circ}$
$i = 74 - 23,1W$	-15,9	0,0
h_c	30°26,8'	$A_c = 50,6^{\circ}NW =$ $= 309,4^{\circ}$

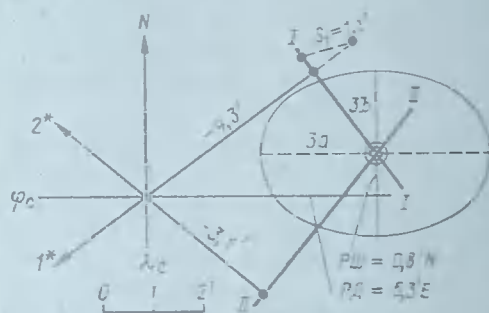


Рис. 135

3.2

α	24°08,5'	30°31,2'
$i+s$	+ 1,1	+1,2
d	- 7,2	-7,2
h_B	24 02,4	30 25,2
Δh_p	- 2,2	-1,6
$\Delta h_{I,B}$	+ 0,1	-
Δh_z	+ 1,0	-
h	24 01,3	30 23,7
h_c	24 05,6	30 26,8
n	- 4,3'	-3,1'
A	234,1°	309,4°

3.4. Приведение к зениту $T_c = 20^{\circ}25^M$:

A_1	234,1°	Графически: $n_1 = -5,3'$
HK	254	$S_1 = 1,1'$ (см. рис. 135)
$A-HK$	340,1	
Δh_V	+0,26' / м	
ΔT^M	4 ^m	
Δh_z	+1,0'	

3.5. Прокладка (см. рис. 135):

φ_c	27°35,0'N	λ_c	67°26,0'W	$C = 80^{\circ} - 4,8'$
$PШ$	+0,8N	$PД$	-5,3E	$T_c = 20^{\circ}25^M$
φ_0	27°35,8'	λ_0	67°20,7'W	$\alpha = 21,4$
Строим эллипс ошибок [формулы (260)]				
с угловыми осями: $3a = 2,3'$, $3b = 1,7'$				
$\Delta A = 75,3^{\circ}$				

Определение места днем по одному Солнцу неудобно тем, что линии положения получаются разновременны (через 2—3 ч), вследствие чего обсервация затягивается, а точность ее из-за погрешностей счисления понижается. Поэтому одновременные наблюдения всегда предпочтительнее разновременных: надо использовать любую возможность наблюдать днем в дополнение к Солнцу Луну, Венеру или навигационную линию.

Точность измерения высот Луны и Венеры днем высокая ($m_n = \pm 0,4 \div 0,5'$), а среднее значение $m_\Delta = \pm 0,7'$, поэтому выгодная $\Delta A = 60 \div 75^\circ$, а допустимая — до 30° (см. § 71). В дальнейшем будем считать минимально допустимой разностью азимутов при дневных определенных по Венере и Солнцу, Луне и Солнцу $\Delta A_{\min} = 30^\circ$. Рассмотрим дневные определения по Венере.

Планету или звезду можно увидеть на фоне неба, если яркость светила больше яркости небосвода. Для дневных наблюдений такие условия возможны только при наблюдениях через трубу секстана.

Исследования условий видимости планеты или звезды днем базируются на следующем:

пороговая освещенность от светила должна быть больше пороговой освещенности от фона неба для глаза, вооруженного трубой секстана;

атмосферное поглощение световых лучей зависит от высоты светила; чем больше высота, тем меньше поглощение (см. § 38);

планеты имеют видимый диск (Венера — от $0,2$ до $1,0'$), что значительно увеличивает их видимость на фоне неба.

На основании полученных теоретических данных и данных о яркости небосвода по азимуту Солнца, приведенных в печати, установлены звездные величины планет, при которых они видны в трубу секстана. Так, около зенита и в обратном азимуте Солнца можно увидеть планету при ее звездной величине $-1,5^m$, а вблизи от Солнца — только при $-3,4^m$. Выяснилось, что лучшие условия видимости планет бу-

дут при расположении их на большой высоте и в обратном азимуте от Солнца. Высота планеты не должна быть меньше 15° . Эти данные показывают значительно большие возможности видимости Венеры, чем считалось ранее. Кроме Венеры, иногда можно наблюдать днем и Юпитер, когда он ярче -2^m , но это более редкие случаи.

Эксперименты подтвердили эти данные, но показали также, что в реальных условиях возможны значительные отклонения видимости, и чаще в сторону ее ухудшения.

Следовательно, видимость Венеры в данном месте зависит от общих причин (ее углового удаления от Солнца, яркости) и частных (высоты, азимута, прозрачности атмосферы и др.).

Влияние на видимость Венеры расположения ее относительно Солнца. Около нижнего соединения 1 (рис. 136) Венера на фоне яркого неба ($-3,5^m$) не видна. Через 10 дней после нижнего соединения (или до него) яркость Венеры увеличивается (до $-3,6^m$; $-3,8^m$), и при угловом расстоянии от Солнца $15-17^\circ$ Венера уже видна на фоне неба. И при ясной атмосфере опытный наблюдатель может измерять ее высоты. Через 15 дней после (или до) нижнего соединения (положение 2 или 9) яркость Венеры увеличивается до $-3,8^m$; $-4,1^m$.

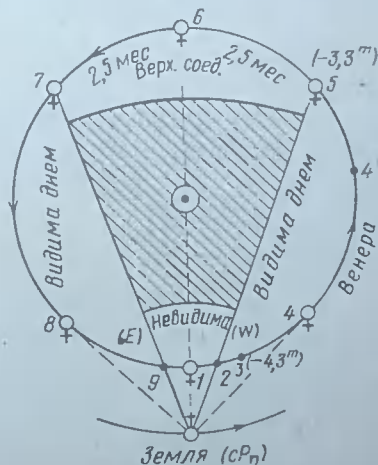


Рис. 136

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
7 мес	9,5 мес	7,5 мес	7 мес	11 мес	7 мес	7 мес	10,5 мес

и при угловом расстоянии от Солнца около 22° Венеру можно свободно наблюдать днем; это ее положение и будем считать началом видимости Венеры днем в трубу секстанта.

Наибольшей яркости (до $-4,3^m$) Венера достигает через 24—28 дней (положение 3) после нижнего соединения (21—24 дня до него) в фазе около 0,25, при угловом удалении 29— 35° от Солнца. В это время она наблюдается лучше всего и почти без ограничений. В элонгациях (положение 4 — W-я; 8 — E-я), наступающих через 2—2,5 мес после и до нижнего соединения, яркость Венеры порядка $-4,0^m$, и при удалении ее от Солнца в $45-48^\circ$ Венера также хорошо видна днем. Между положениями 4 и 5 яркость Венеры постепенно убывает и за 4 мес до верхнего соединения (4') приближается к наименьшей ($-3,4^m$ — $-3,3^m$), но наблюдать Венеру еще можно. За 2,5 мес до верхнего соединения (и после него) угловое расстояние Венеры от Солнца сокращается до $20-22^\circ$ (положения 5 и 7), и начинается период невидимости Венеры, продолжающийся 5 мес.

Даты нижних и верхних соединений приведены в МАЕ на с. 23, поэтому для определения периода невидимости Венеры следует:

выбрать дату ближайшего соединения из МАЕ;

к дате нижнего соединения прибавить и отнять 15 дней (для опытного наблю-

дателя 10 дней); к дате верхнего соединения прибавить и отнять по 2,5 мес, получим периоды невидимости Венеры на всей Земле. Остальное время Венеру можно наблюдать в трубу секстанта.

Полный оборот Венеры в видимом движении относительно Солнца называется синодическим годом и составляет 583,9 дня. В разные календарные годы может быть: одно соединение, оба соединения и части периодов. Эти периоды, так же как и координаты Венеры, приблизительно повторяются через 8 лет (пять синодических лет Венеры приблизительно равны 8 тропическим годам, т. е. $5 \cdot 583,92^d = 2919,6^d$ и $2921,9^d$).

В табл. 11 показано число месяцев, когда можно наблюдать Венеру днем по годам восьмилетнего цикла, начиная с 1984 г. (и с 1992 г.).

Из табл. 11 видно, что наблюдения Венеры возможны большую часть года, и надо их считать не редкостью, а обычными наблюдениями.

Условия наблюдений Венеры в данном месте. При определении места по высотам Венеры важна не только ее видимость вообще, но также условия наблюдений в данный момент, особенно разность азимутов с Солнцем и ее высота. Если суточная параллель Венеры проходит выше параллели Солнца, то условия наблюдений ее лучше — менее яркий фон неба, больше h и ΔA . Следовательно, условия наблюдений зависят от φ и соотношения φ и δ , поэтому выбор условий надо производить по звездному глобусу. На глобус наносятся по α и δ Венера и Солнце. Склонение Венеры приводится в МАЕ на среднюю дату и иногда нуждается в интерполировании, поэтому лучше вычислять его так же, как и для Солнца — по формуле $\alpha = t_{\text{гр}}^V - t_{\text{гр}}^{\text{сн}}$, где величины выбираются на ближайший час $T_{\text{гр}}$, там же выбирается и δ .

После нанесения светил глобус устанавливают по широте места и, вращая

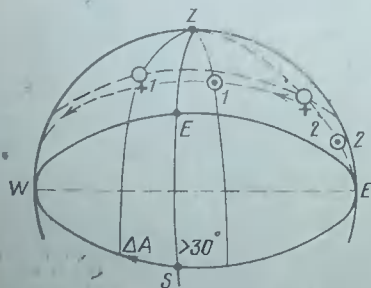


Рис. 137

его, приводят светила по разную сторону меридианного кольца (рис. 137, положение 1); в этом положении имеем $\Delta A_{\text{макс}}$. Если эта разность больше 30° , а высота Венеры больше 15° , то в данном месте определяться можно. Поворачивая глобус, подбираем положение светил около нужного времени наблюдений, если при этом $\Delta A \geq 30^\circ$. Может оказаться, что в это время наблюдать нельзя (положение 2 — утром), так как ΔA недостаточна. При небольших удалениях Венеры от Солнца достаточная разность их азимутов может быть получена только около их кульминации и не всюду. Около элонгаций возможности наблюдений значительно шире, и Венеру можно наблюдать почти на всей Земле.

Отыскание Венеры днем через трубу секстана. Наибольшую трудность при дневных наблюдениях Венеры представляет ее отыскание на светлом фоне неба. Для этого требуется:

- рассчитать высоту и азимут Венеры;
- подготовить секстан, протереть замшей зеркала и стекла трубы до их полной чистоты;

- выбрать удобное место наблюдений — с меньшей вибрацией, без ветра, затененное от прямых лучей Солнца;

- установить на секстане ось $OC = h$, направить трубу по компасу в нужную точку горизонта и очень медленно покачивая секстан, отыскать Венеру.

Для расчета h и A Венеры можно применить три приема:

- по звездному глобусу;

- по таблицам ВАС—58 на целые градусы φ , δ , t_m ;

- предвычислением точных значений h_c и A_c на намеченное время наблюдений.

Расчет h и A по звездному глобусу. Порядок работы — обычный (см. § 40), но облегченный тем, что Венера уже нанесена, требуется только уточнить S_m . Вследствие неточности современных звездных глобусов ошибки в снятых h и A могут достигать $\pm 1,5^\circ$ и отыскать Венеру часто не удается.

При наибольшей яркости планеты и прозрачной атмосфере этот прием применять можно.

Расчет h и A по ВАС—58 приближенно. Этот прием более трудоемок, но дает более точные координаты и более

гибок. Величины φ , δ , t_m получаются приближению на намеченное $T_0 \pm N^e = T_{\text{гр}}$. По этим аргументам, округленным до ближайшего градуса, из ВАС—58 выбираются h_T , A_T и Δh за $\Delta t = 1^\circ$, т. е. за каждые 4^m задержки наблюдений. Если в намеченное время Венера не отыскана, то к h добавляется Δh , получается новое значение высоты, и поиск продолжается. При наличии программируемой ЭКВМ h и A Венеры получаются по набранному φ , δ , t_m , а изменением t_m на 1° получается новое значение высоты.

Предвычисление линии на заданный момент T_c ($T_{\text{гр}}$). Порядок работы при предвычислении рассмотрен в § 80. Так как высота и азимут Венеры рассчитываются на намеченное время со всей доступной точностью, то h_c отличается от получаемого oc не более $15\text{--}20'$, и Венера легко отыскивается в трубу секстана. Этот прием наиболее надежный, но имеет тот недостаток, что при задержках наблюдений более 4^m (а это бывает при ухудшении видимости) часть вычислений приходится повторить. Его лучше применять при ясной, устойчивой погоде.

Выполнение наблюдений Венеры и Солнца. Для наблюдений применяется дневная труба (7 $\times$ 6), стойка которой вдвигается до отказа. Первой всегда наблюдается Венера. Установив на секстане рассчитанную высоту, наблюдатель по компасу определяет положение ее вертикала и, заметив курсовой угол, переходит в намеченное место наблюдений. Если горизонт слишком ярко, то набрасывается фильтр малого зеркала. Проводя трубой по горизонту и время от времени покачивая секстан, отыскиваем Венеру, видимую как белое пятнышко, лучше на фоне неба. Все движения должны быть медленными и осторожными. С горизонтом совмещается середина пятна. Рекомендуется измерять три высоты, не сдвигаясь с места наблюдений, так как повторное отыскание Венеры не менее трудно. Затем наблюдается Солнце, также три раза. Для регистрации моментов применяют секундомер. Обработка наблюдений обычная, с приведением к зениту на то время, при котором сняты φ_c , λ_c (лучше на момент наблюдений Солнца).

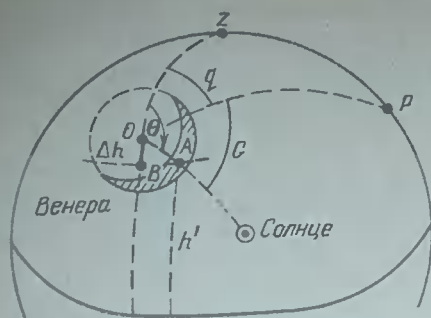


Рис. 138

Поправка фазы. При исправлении высот Венеры, кроме обычных поправок для планет, при точном решении вводится еще поправка Δh за фазу Венеры. При наблюдениях с горизонтом совмещается центр диска Венеры, видимого в данной фазе ее (рис. 138), а не геометрический центр диска O . Поправка высоты Δh за фазу определяется из малого треугольника OAB :

$$\Delta h = -c \cos \theta, \quad (266)$$

где c — расстояние AO , приводимое в табл. 1 приложения 2 МАЕ;

θ — угол между вертикалом Венеры и направлением на Солнце.

Угол θ вычисляется по формуле

$$\theta = G \pm q,$$

где G — угол между кругом склонения Венеры и направлением на Солнце, приводимый в той же табл. 1 приложения 2 МАЕ;

q — параллактический угол, получаемый при вычислении по ВАС—58.

Примечание. Угол θ можно приблизительно определить по звездному карту, что может служить и контролем.

Поправка Δh выбирается с ее знаком из табл. 2 приложения 2 МАЕ и прибавляется к высоте Венеры.

Полезно помнить правило: поправка Δh прибавляется, если Солнце ниже Венеры (над горизонтом), и вычитается, если Солнце выше ее. Величина Δh может достигать $0,4'$ около нижнего соединения, поэтому она обязательна в пределах $\pm 1,5$ мес от него. Если дата наблюдений выходит за ± 2 мес от нижнего соединения, то поправкой Δh можно пренебрегать (с точностью до $\pm 0,1'$).

Определение места по Венере и Солнцу днем, как показали исследования, — удобный прием, хотя и требует умения; по точности приближается к определению по трем, иногда и четырем звездам. Однако в двух линиях выявить промахи и систематические ошибки нельзя без дополнительных данных. Более надежные результаты при определении по Венере и Солнцу получаются, если к этим двум линиям присоединить наблюдения Луны или дополнительно наблюдать Солнце или Венеру через зенит.

Пример 68. 10.05.85 г. в Атлантическом океане, следуя $KK = 221^\circ (-1^\circ)$, $V = 16$ уз, определять место около $11^h 30^m$ ($\lambda = 3^\circ W$). Намечили обсервацию по Венере и Солнцу. С карты на это время $\varphi_s = 35^\circ 30' N$, $\lambda_s = 89^\circ W$ (приближенно).

Решение.

1. Предварительные операции.
- 1.1. Определение видимости Венеры:

Из МАЕ (с. 23) Нижнее соединение Венеры	3 апреля
Невидимость Венеры	+ 15
Видима с	18 апреля — к W от $\odot$

1.2 Условия наблюдений Венеры с Солнцем:

T_c	$11^h 30^m$	t_1^V	$78^\circ 18'$	$78^\circ 18'$
λ	3	α_1^V	$69^\circ 4'$	$30^\circ 54'$
T_{gr}	$14^h 30^m$	α	$9^\circ 14'$	$47^\circ 24'$
		δ	$4^\circ 22' N$	$17^\circ 42' N$

С глобуса:

для Венеры $\lambda = 57^\circ$, $\lambda = 35^\circ SW$

для Солнца $\lambda = 67^\circ$, $\lambda = 51^\circ SE$

$\Delta \lambda = 60^\circ$

1.3 Расчет h и A Венеры для ее отыскания (с табл. ВАС—58 по φ° ; δ° ; t_M° :
 $t_M \approx 69^\circ 4' + 7^\circ 30' - 59^\circ \approx 18^\circ W$. По $\varphi_T = 33^\circ N$,
 $\delta_T = 4^\circ N$, $t_T = 18^\circ W$ имеем: $h = 56^\circ 28'$;
 $A = 146^\circ NW = 214^\circ$

Изменения при $\Delta t = 1^\circ = 4^M$; $\Delta h = -29' / 1^\circ$;
 $\Delta A = -1,5^\circ / 1^\circ$

1.4 Получение поправок: $u_{xp} = -1^M 24^C$;
 $e = 13,5$ м, $s_{1,2} = -0,3'$, $oi_1 = 0^\circ 31'$, 0 ;
 $oi_2 = 359^\circ 27,4'$; $t = +25^\circ$, $B = 770$ мм

Пуск секундомера: $T_{xp} = T_{гр} - u =$
 $= 14^h 25^m 00^s - (-1^m 24^s) = 2^h 26^m 24^s$

2. Наблюдения:

2.1	Венера	Солнце
$T_{СКМ}^{ср}$	$75^M 35^C$	$11^M 15^C$
$oc_{ср}$	$56^\circ 08,0'$	$66^\circ 39,0'$

2.2. Навигационная информация (на конец наблюдений):

$T_c = 11^h 36^M$; $ol = 19,6$; $\varphi_c = 33^\circ 38' N$;
 $\lambda_c = 58^\circ 53' W$; $m_n = \pm 0,4'$; $m_\Delta = \pm 0,6$.

3. Обработка наблюдений:

$T_{гр}^n$	$14^h 25^m 00^s$	$14^h 25^m 00^s$
$T_{СКМ}$	7 35	11 15
$T_{гр}$	$14^h 32^m 35^s$	$14^h 26^m 15^s$ 10,05
t_T	$69^\circ 04,0'$	$30^\circ 54,7' (2,1 / 1,0)$
Δt_1	8 08,2	9 0,31
Δt_2	1,1	0,6
$t_{гр}$	77 13,3	39 58,4
λ	58 53	58 53
t_M	$18^\circ 20,3'$	341 05,4
$t_{пр}$	—	$18^\circ 54,6' E$
δ_T	$4^\circ 22,9'$	$17^\circ 42,1' (0,2 / 0,6)$
$\Delta \delta$	+0,1	+0,4
δ	$4^\circ 23,0' N$	$17^\circ 42,5' N$
oc	$56^\circ 08,8'$	$66^\circ 39,0'$
$i+s$	+0,5	+0,5
d	-6,5	-6,5
h_B	56 02,0	66 33,0

h_B	$56^\circ 02,0'$	$66^\circ 33,0'$
Δh_p	-0,7	-0,4
P/R	+0,2	+15,9
Δh_ϕ	-0,2	—
Δh_z	+1,0	—
h	56 02,3	66 48,5
h_c	56 07,9	66 45,2
n	-5,6'	+3,3
A_c	$214,2^\circ$	$128,6^\circ$

	$55^\circ 38,6'$	$146,9^\circ$
$\varphi = 34^\circ - 22' N$	+18,4'	-0,3
$\delta = 4^\circ + 23' N$	+20,5	-0,3 $q = 27^\circ$
$t = 18^\circ + 20,3' W$	-9,5	-0,5
	-0,1	
h_c	$56^\circ 07,9'$	$A_c = 145,8^\circ NW =$ $= 214,2^\circ$
	$66^\circ 40,8'$	$128,5^\circ$
$\varphi = 34^\circ - 22' N$	+13,6	-0,6
$\delta = 18^\circ - 17,5' N$	-12,9	+0,5 $q = 43^\circ$
$t = 19^\circ - 5,4' E$	+3,5	+0,2
	+0,2	
h_c	$66^\circ 45,2'$	$A_c = 128,6^\circ NE$

Поправка фазы и приведение к Зениту:
Из МАЕ на 10.05

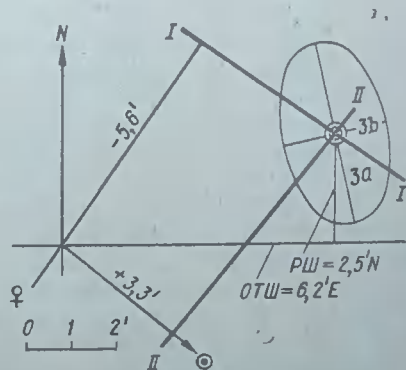


Рис. 139

$$\begin{array}{l}
 p=0,3' \\
 c=-0,2' \\
 G=70' \\
 q=27'
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} p \\ c \\ G \\ q \end{array}} \right\} \text{МАЕ с. 283}$$

A_1	214,2°
ИК	220
$A_1 - \text{ИК}$	354,2°
Δh_v	+0,26'/м
ΔT	3,7 ^м
Δh_z	+1,0'

$$\begin{array}{l}
 \theta=43^\circ \\
 \Delta h_\Phi=-0,2'
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \theta \\ \Delta h_\Phi \end{array}} \right\} \text{МАЕ, с. 283}$$

Прокладка (рис. 139):

φ_c	33°38,0'N	λ_c	58°53,0'W
РШ	+ 2,5	РД	— 7,4Е
φ_o	33°40,5'N	λ_o	58°45,6'W

$$T_c = 11^h 36^m; \alpha = 19,6; C = 68^\circ - 6,7'$$

По формулам (260) на ЭКВМ рассчитываем:
с $\Delta A = 85,8'$; $3a = 2,1'$; $3e = 1,2'$

§ 75. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ДНЕМ ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ЛУНЫ И СОЛНЦА; ВЕНЕРЫ, ЛУНЫ И СОЛНЦА

Определение места по Луне и Солнцу. Луна может быть видна днем около 24 дней в месяц. Однако условия наблюдений — достаточная разность азимутов и $h > 10^\circ$ резко различны в разных широтах и при разных склонениях Луны, так что реальные возможности ее наблюдений значительно меньшие.

Общие условия наблюдений Луны. В фазе серпа, т. е. при возрасте 2—5 и 24—27 дней, $\Delta A_{\odot}$ близка к наивыгоднейшей, и Луну вместе с Солнцем можно наблюдать в большом диапазоне широт, в основном около времени кульминации одного из светил. Около первой и последней четвертей, т. е. при возрасте 7—8 и 22—23 дня наблюдать Луну и Солнце можно повсюду, но в высоких и средних широтах — по половине дня (вторая и первая), а в тропиках и малых широтах — только около кульминации одного из светил. При возрасте 9—20 дней разность азимутов Луны и Солнца больше 120° , при этом ошибки места сильно возрастают. Кроме того, высоты Луны часто бывают меньше 10° , поэтому при этих возрастах Луны получать место по этим светилам не рекомендуется. Однако при возрастах 11—19 дней по Солнцу и Луне можно получить две почти параллельные линии; усреднив их, получим одну надежную линию, которую можно комбинировать с навигационной линией, с линией по Венере или второй линией по Солнцу. Из сказанного вытекает, что Луну днем для получения места можно наблюдать в возрасте 2—9 и 21—27 дней, т. е. около 13 дней в месяц, но только при учете местных условий.

Определение возможности наблюдений Луны с Солнцем в данном месте.

Чтобы определить условия наблюдений Луны, необходимо использовать Ежегодник и звездный глобус. В МАЕ (внизу правой страницы) приводится возраст Луны. При возрасте от 27 до 2 дней Луна не видна, в остальное время ее можно наблюдать.

На начало данных суток выбрать из МАЕ прямые восхождения и склонения Солнца и Луны, причем для α используется формула (127). По этим данным Луна и Солнце наносятся на звездный глобус (см. § 39), и после его установки по широте места эти светила вращением глобуса приводятся по разные стороны от меридиана: если $\Delta A \geq 30^\circ$ (или меньше 120°) и $h_L > 10^\circ$, то их можно наблюдать в данном месте.

Теперь следует проверить, можно ли их наблюдать в желаемое время. Для этого Солнце приводится на приближенный часовой угол от его кульминации (например, за $2^h = 30^\circ$ до кульминации Солнца в $T_c = 13^h$). Если разность азимутов достаточна, то на намечаемое время наблюдений снимают с карты φ_c и λ_c и по МАЕ рассчитывают S_m . Установив глобус по φ и S_m , с помощью вертикалов снимаются высота и азимут Луны (иногда место Луны приходится уточнить по α_c на данное время). При наблюдениях Луну лучше отыскивать по высоте, установленной на секстане, и в направлении A — по компасу; при малой же фазе это условие обязательно, так как Луна бывает плохо видна простым глазом. Определение по Луне и Солнцу при хорошей видимости лучше выполнять с предвычислением и перемещением места (см. пример 72).

Точность получения места по Луне и Солнцу. Некоторые штурманы пола-

Годы цикла	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Число месяцев	2,6	3,7	2,3	2,2	4,5	2,9	2,6	2,9

гают, что линии, полученные по наблюдениям Луны, значительно менее точны, чем по другим светилам. Исследования показали, что это не совсем так. Измерения высот Луны днем имеют ту же точность, что и Солнца, но точность линии Луны все же ниже на $\pm 0,2'$ за счет исправления высот.

Точность места, получаемого по Луне и Солнцу, зависит от их разности азимутов; при $\Delta A = 60 \div 80^\circ$ и средних условиях точность места порядка $\pm 1,5'$. Однако место, полученное этим приемом имеет те же недостатки, что и по любым двум линиям: недостаточная надежность из-за отсутствия критериев промаха и невозможности выявить систематические ошибки. При высотах Солнца и Луны, больших 60° , что бывает в малых широтах, возможны их дополнительные наблюдения через зенит, тогда получаются четыре (или три) линии и надежность места повышается.

Определение места по Венере, Луне и Солнцу. Для одновременных наблюдений Венеры, Луны и Солнца днем необходимо совпадение условий наблюдений Венеры с Солнцем и Луны с Солнцем и дополнительного условия — разность азимутов Венеры и Луны должна быть больше 30° . В восьмилетнем цикле видимости Венеры (начиная с

1984 г. и с 1992 г.) эти условия могут совпадать следующее число месяцев в году (табл. 12).

Из табл. 12 видно, что наблюдать три светила днем можно приблизительно от 2 до 5 мес в году. В данном месте эти возможности реализуются далеко не всегда. Поэтому после определения общей видимости Венеры и Луны надо выполнить подбор условий на звездном глобусе аналогично рассмотренному выше для Венеры. Наблюдения выполняются, как показано выше, для Венеры и Луны. Обработка наблюдений выполняется либо по обычной схеме, либо с перемещенным счислимым местом и по сокращенной схеме вычислений (см. § 80), что при трех светилах дает заметную экономию труда и времени.

Место, определенное по трем светилам днем, по точности дает лучший результат, чем определение по трем звездам. Однако в этом приеме все три светила почти всегда (за исключением тропиков) наблюдаются в одной части горизонта. В случае небольшого промаха в одной из линий (а выявить его при трех линиях нельзя) выбранное место содержит значительную погрешность. Этого можно избежать, если хотя бы одно из светил наблюдать дополнительно через зенит.

Глава 18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА

§ 76. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Если видно только одно светило, то для получения по нему второй высотной линии необходимо подождать, пока его азимут изменится на достаточную величину. Такие наблюдения называются разновременными. Разновременные наблюдения кратко называют «по Солнцу», так как применяются они только днем к Солнцу, хотя в принципе могут быть

применены к любому светилу и к навигационным линиям.

Принцип определения по разновременным линиям положения. Пусть в момент T'_c , находясь по счислению в точке C_1 (рис. 140) с координатами φ'_c , λ'_c , наблюдали Солнце (h'_c , T'_{xp}). Рассчитали n_1 и A_1 и проложили из C_1 линию $I-I$; на ней — место судна. Через пе-

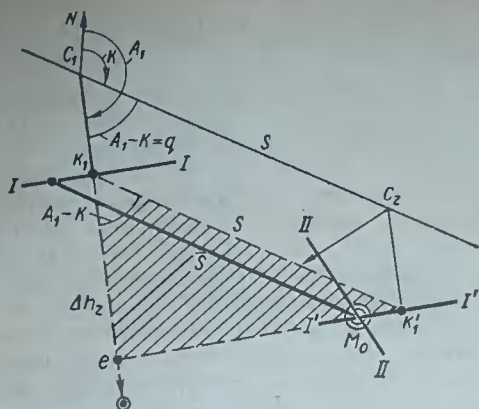


Рис. 140

которое время, когда азимут Солнца изменится на достаточную величину ($30-60^\circ$), производим вторые наблюдения, но судно за это время прошло расстояние S в направлении ПУ (сокращенно K). В T'' , находясь в C_2 (φ'' , λ''), снова наблюдали Солнце (h'' , $T_{\text{сп}}$). Рассчитали n_2 и A_2 и проложили из C_2 линию $II-II$, на ней — место судна в этот момент.

Имеем три условия: в первый момент судно находилось на линии $I-I$, во второй — на линии $II-II$, в промежутке — двигалось путем (курсом) K и прошло расстояние S . Эти условия удовлетворяются, если вставить вектор S между линиями $I-I$ и $II-II$. Тогда в момент T' судно находится на линии $I-I$ (в точке M_1) и, пройдя расстояние S путем K , во второй момент окажется на линии $II-II$ в точке M_0 , которая и представит obserвованное место во второй момент. Как видим, в obserвацию входит счисление (S и K) за время между C_1 и C_2 , следовательно, место будет счислимо-обсервованным.

Из рис. 140 видно, что вместо вставки вектора S можно переместить линию $I-I$ на величину S , как в способе крюйс-расстояния. Так смещая точку k_1 , получим k'_1 и, проведя через k'_1 линию $I'-I'$ линию азимута A_1 , т. е. $C_2k'_1$, видим, что вставка S между двумя линиями равноценно прокладке A_1 , n_1 и линии $I'-I'$ из второго счислимого места. В первом случае M_0 получится в конце вектора S на линии

$II-II$, во втором — в той же точке M_0 на пересечении линий $II-II$ и $I'-I'$.

Найдем связь этого способа с одновременными наблюдениями. Если высоту h'_c обрабатывать с φ'' , λ'' , как и h_c , то в h'_c надо вводить поправку Δh_z , как при одновременных наблюдениях. Действительно, если линию $I'-I'$ продолжить до точки e , то из образовавшегося треугольника $k_1k'_1e$ имеем

$$k_1e = \Delta h_z = S \cos(A_1 - K). \quad (*)$$

Таким образом, перемещение линии $I-I$ в положение $I'-I'$ равноценно в принципе приведению h'_c ко второму зениту и расчету h'_c со вторыми координатами φ'' , λ'' . Однако расчет по формуле (*) справедлив только при небольших S (до 10 миль при точности $0.1'$; см. § 54), поэтому на практике следует каждую линию рассчитывать со своими координатами, а прокладывать из места C_2 .

Прокладка на карте или бумаге может выполняться двумя приемами: одновременной прокладкой обеих линий из второго счислимого места C_2 и последовательной прокладкой сначала первой, затем второй линии из своих мест с последующим перемещением первой линии в точку k'_1 (см. рис. 140). При этом первая линия прокладывается сразу после обработки первых наблюдений и может помочь контролю счисления.

Вариантом последовательной прокладки является перенос счисления из C_1 в определяющую точку k_1 и расчет второй линии с координатами точки k'_1 , из которой обычным порядком прокладывается вторая линия и проводится линия $I'-I'$ параллельно линии $I-I$. Однако этот прием лучше применять лишь в случаях плохого счисления, так как обычно вес точки k_1 недостаточен для переноса в нее счисления. Аналогичный вариант прокладки применяется при перемещении счислимого места. Как правило, одновременная прокладка применяется на бланке, а последовательная — на карте. В рекомендуемом нами ускоренном приеме (§ 81) применяется одновременная прокладка.

Из принципа способа ВЛП (см. § 67) следует, что положение линии не зависит

от принятых при ее расчете счислимых координат, поэтому положение второй линии не зависит от счислимого места C_2 и его ошибок. Аналогично положение первой линии не зависит от места C_1 , но при перемещении ее к месту C_2 все ошибки счисления между местами C_1 и C_2 войдут в линию $I'-I'$. Следовательно, место, полученное по разновременным наблюдениям, является счислимо-обсервованным, аналогично полученному способом крюйс-расстояния, однако его принято обозначать двумя кружками, как и другие астрономические обсервации. Для разновременных определений характерной операцией является расчет вторых счислимых координат относительно первых со всей возможной точностью.

Уравнения разновременных линий. Перемещение первой линии по курсу на величину плавания равносильно приведению ее ко второму зениту (см. рис. 140) по формуле (*)

$$\Delta h_2 = S \cos(A_1 - K).$$

Из рис. 140 видно, что в месте C_1 перенос n_1 увеличился на Δh_2 , поэтому уравнение перемещенной линии $I'-I'$ без учета ошибок имеет вид

$$\Delta \varphi_1 \cos A_1 + \Delta W_1 \sin A_1 = n_1 - \Delta h_2 \quad (267)$$

где $\Delta \varphi_1$ и ΔW_1 — текущие координаты линии $I'-I'$ при начале их в C_1 .

Учитывая, что

$$\Delta h_2 = S \cos(A_1 - K) = S \cos K \cos A_1 + S \sin K \sin A_1 = PШ \cos A_1 + OTШ \sin A_1,$$

получим

$$(\Delta \varphi_1 \mp PШ) \cos A_1 + (\Delta W_1 \mp OTШ) \sin A_1 = n_1$$

или

$$\Delta \varphi_2 \cos A_1 + \Delta W_2 \sin A_1 = n_1 \quad (268)$$

где $\Delta \varphi_2$ и ΔW_2 — текущие координаты линии $I'-I'$ при начале их в C_2 .

Уравнение (268) представляет собой уравнение линии $I'-I'$ в координатах второго места C_2 , поэтому оно совместимо с уравнением линии $II-II$. Для второй линии в тех же координатах имеем:

$$\Delta \varphi_2 \cos A_2 + \Delta W_2 \sin A_2 = n_2 \quad (269)$$

Решая эти уравнения совместно, получим $\Delta \varphi_2$ и $\Delta W_2 = \Delta \lambda_2 \cos \varphi$ для места M , по формулам (217) и далее

обсервованные координаты

$$\varphi_0 = \varphi_2^* + \Delta \varphi_2, \quad \lambda_0 = \lambda_2^* + \Delta \lambda_2 \quad (270)$$

Аналитическое решение уравнений линий положения (268) и (269) равносильно прокладке из второго счислимого места и дает те же координаты.

Уравнения разновременных линий с учетом ошибок. В уравнение первой линии $I'-I'$, перемещенной ко второму счислимому месту, войдут ошибки первой линии, которые можно оценить величиной m_{n_1} , и ошибки от счисления при перемещении линии, оцениваемые величиной m_2 . Общая ошибка в первой линии

$$m_1 = \sqrt{m_{n_1}^2 + m_2^2} \quad (271)$$

превысит величину m_{n_1} — ошибки во второй линии.

Чтобы накрыть действительную линию положения, надо теперь построить не линию $I'-I'$, а полосу положения шириной $\pm m_1$ или более (см. § 68) в зависимости от требуемой вероятности. Уравнение полосы положения для линии $I'-I'$ имеет вид

$$\Delta \varphi_1 \cos A_1 + \Delta W_1 \sin A_1 = n_1 \pm m_1$$

Вторая же полоса положения имеет обычное уравнение

$$\Delta \varphi_2 \cos A_2 + \Delta W_2 \sin A_2 = n_2 \pm m_{n_2}$$

Из рис. 141 видно, что полоса положения линии $I'-I'$ значительно шире полосы $II-II$, т. е. вторая линия точнее. В пересечении этих полос с определенной вероятностью и находится место судна; практически вероятнейшее место

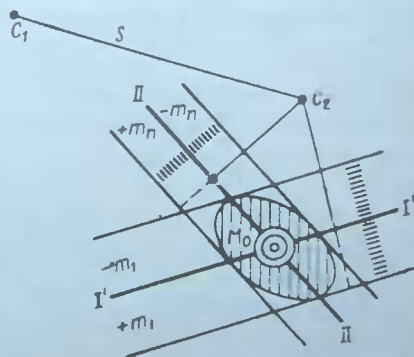


Рис. 141

принимается в точке M_0 , а точность его оценивается площадью эллипса или круга ошибок.

Примечание. Вместо m_z^2 можно применить составляющую радиальной СКО счисления $\frac{1}{2} M_{\Sigma}^2$.

Тогда общая ошибка в первой линии, перемещенной во второе счислимое место, составит

$$m_1 = \sqrt{m_{n_1}^2 + \frac{1}{3} M_{\Sigma}^2}$$

§ 77. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК СЧИСЛЕНИЯ И ВЫГОДНЫЕ УСЛОВИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПО СОЛНЦУ

Ошибки в первой линии от счисления. Перемещение первой линии, т. е. приведение ее ко второму зениту, выражается в первом приближении формулой $\Delta h_z = S \cos(A_1 - K)$, где для краткости принято $K = ПУ$. Ошибку в первой линии от ошибок в плавании и пути можно определить, дифференцируя эту формулу по S и K . Переходя к конечным приращениям и обозначая $d(\Delta h_z) = \Delta z$; $dS = \Delta S$; $dK = \Delta K$ и курсовой угол $A - K = q$ (см. рис. 140), получим ошибку в первой линии, проложенной в C_2 :

$$\Delta z = \Delta S \cos q - \Delta K S \sin q. \quad (272)$$

Применяя известную формулу ошибок суммы, получим m_z :

$$m_z^2 = m_S^2 \cos^2 q + m_K^2 S^2 \sin^2 q. \quad (273)$$

Из этих формул видно, что ошибки в первой линии зависят от ошибок в плавании и курсе и от курсового угла на Солнце, т. е. от положения первой линии относительно курса судна. Ошибки от неизвестного течения и дрейфа включены в m_{Σ} и m_K .

Условия исключения в первой линии предполагаемых ошибок счисления. Ошибки от сноса. Если известно или

предполагается общее направление сноса, то его влияние на перемещаемую первую линию можно исключить, наблюдая Солнце в азимуте, перпендикулярном сносу (рис. 142, а). Прокладывая линию $I-I$ из точек C_2 или C_2' , C_2'' и т. д., получаем то же самое положение линии независимо от величины сноса; это же вытекает из формулы (272) при $q = 90^\circ$. Азимут, по которому необходимо наблюдать Солнце, равен $\alpha + 90^\circ$. По нему можно отыскать в таблицах ВАС—58 часовой угол и определить время наблюдений.

Ошибки в расстоянии. Из формулы (272) видно, что ошибки в линии от ошибок в пройденном расстоянии ($\Delta S \cos q$) обращаются в нуль при $q = 90^\circ$. Следовательно, если предполагается ошибка в пройденном расстоянии, например в поправке лага, то надо наблюдать первую серию высот Солнца, когда оно на траверзе (рис. 142, б). Тогда прокладка линии $I-I$ из ошибочных мест C_2' или C_2'' не изменит ее положения. Так как поправка лага определяется на практике реже, чем ΔK , то этот случай может иметь практический интерес. Необходимый азимут получается как

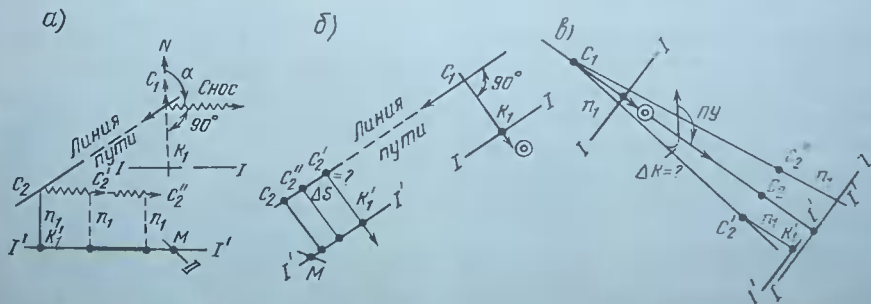


Рис. 142

$K \pm 90^\circ$; по нему из ВАС—58 определяется I и время наблюдений.

Ошибка в направлении. Из формулы (272) видно, что ошибка в линии от ошибок в направлении ($\Delta K \sin q$) обращается в нуль при $q = 0$. Следовательно, если наблюдать Солнце, когда оно расположено по носу или корме, то прокладка первой линии из ошибочных мест C'_2 и C''_2 (рис. 142, в) практически не изменит ее положения.

Случаи ошибок в расстоянии и направлении являются частными случаями общей ошибки в снос: в случае ошибки в расстоянии снос совпадает с курсом, в случае ошибки в направлении — перпендикулярен курсу. Во всех приведенных случаях положение второй линии, разумеется, не изменяется, так как она не зависит от принятых вторых координат. Рассмотренные условия полезно знать, чтобы попутно учитывать при планировании дневных наблюдений.

Общая ошибка обсервованного места. Ошибка в первой линии m_1 складывается из ошибок линий m_{α_1} и ошибок ее перемещения m_2 по формулам (271), (273). Ошибка во второй линии включает только ошибку линии m_{α_2} . Средняя квадратическая ошибка в обсервованном месте получится по выведенной выше формуле (242) для двух линий при равенстве $m_{\alpha_1} = m_{\alpha_2} = m_n$:

$$M = \frac{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}{\sin \Delta A} = \sqrt{2m_n^2 + m_2^2} \operatorname{cosec} \Delta A, \quad (274)$$

где ΔA — разность азимутов первой и второй линий.

Из этой формулы видно, что действие случайных ошибок на место судна в общем случае зависит от ошибок в линии, ошибок счисления и разности азимутов Солнца. Геометрически выгодная разность $\Delta A = 90^\circ$ требует увеличения промежутка времени между линиями до 4—6", при этом резко возрастают ошибки счисления m_2 , и первая линия теряет ценность. Необходимо найти оптимальный промежуток времени при разных условиях.

Выгодные условия определения места по Солнцу. Ошибка в месте M , определяемая формулой (274), будет наименьшей при минимуме ошибок m_n и m_2 и наибольшей разности ΔA . Уменьшение

ошибок m_n достигается общими мерами повышения точности высот. Ошибки счисления связаны с промежутком времени ΔT между наблюдениями, поэтому в общем случае ошибка M будет меньше при наибольшей ΔA за возможно короткий промежуток времени, т. е. при наибольшей скорости $\omega_A = \frac{\Delta A}{\Delta T}$.

Выше (см. § 11) установлено, что азимут меняется быстрее всего около верхней кульминации светила. Чем меньше широта, тем ближе к кульминации получаются эти условия. Поэтому наиболее выгодными являются наблюдения, симметричные относительно кульминации Солнца — до нее и после.

Определение минимума выражения (274) представляет сложную задачу, решаемую последовательными приближениями [6]. По результатам ее решения составлена табл. 13 для выгодных промежутков времени ΔT между наблюдениями (сокращенных на допустимый интервал) при данной величине ошибок и скорости изменения азимута ω_A для $m_n = \pm 0,5'$ и $m_n = \pm 1,0'$.

Из табл. 13 видно, что выгодный интервал колеблется от $40''$ до $5''$. В средних условиях имеем выгодную ΔA от 40° до 50° ($\Delta T = 2 \div 2,5''$) при минимальной допустимой $\Delta A = 30''$, что соответствует также выводам § 71 (см. рис. 127).

Для входа в табл. 13, кроме ошибок счисления и линий, требуется знать $\omega_A = \frac{\Delta A}{\Delta T}$. Лучшее всего эта скорость

определяется по таблицам ВАС—58: входом с q_T , δ_T и $t_{1,2}$ получаем $A_2 - A_1$ за интервал $t_2 - t_1$ и ω_A (см. примеры 69, 70).

Для получения времени первых наблюдений промежуток ΔT вычитается из намеченного второго момента T'' .

При отсутствии табл. 13 приближенный интервал ΔT определяется как

$$\Delta T = \frac{\Delta A}{\omega_A}, \quad (275)$$

где ΔA — задается ($30-60^\circ$);

ω_A — выбирается из таблиц ВАС—58.

Все показанные расчеты ведутся относительно времени кульминации Солнца (T''), так как в это время $t_n = 0$, и вход в таблицы ВАС—58 упрощается.

Ошибки числения	Скорость судна, уз	$\omega_A = 10^\circ/\text{ч}$		$\omega_A = 15^\circ/\text{ч}$		$\omega_A = 20^\circ/\text{ч}$		$\omega_A = 25^\circ/\text{ч}$		$\omega_A = 35^\circ/\text{ч}$		$\omega_A = 45^\circ/\text{ч}$	
		$\pm 0,5'$	$\pm 1,0'$	$\pm 0,5'$	$\pm 1,0'$	$\pm 0,5'$	$\pm 1,0'$	$\pm 0,5'$	$\pm 1,0'$	$\pm 0,5'$	$\pm 1,0'$	$\pm 0,5'$	$\pm 1,0'$
		Промежуток времени между первыми и вторыми наблюдениями Солнца											
Очень малые: $m_K < 0,5^\circ$; $m_S < 1\%$	10	4,4 ^ч	5,5 ^ч	3,3 ^ч	4,0 ^ч	2,8 ^ч	3,0 ^ч	2,5 ^ч	2,6 ^ч	1,9 ^ч	1,9 ^ч	1,6 ^ч	1,6 ^ч
	15	3,7	4,8	2,9	3,7	2,4	2,9	2,1	2,4	1,6	1,8	1,4	1,4
	20	3,0	4,4	2,5	3,3	2,2	2,8	1,9	2,3	1,5	1,7	1,3	1,4
Малые: $m_K = 1^\circ$; $m_S = 2\%$	10	3,1	4,4	2,5	3,3	2,2	2,8	1,9	2,3	1,5	1,8	1,3	1,4
	15	2,3	3,6	2,0	3,0	1,8	2,4	1,6	2,1	1,3	1,6	1,1	1,3
	20	1,9	3,0	1,7	2,5	1,5	2,3	1,4	1,9	1,2	1,5	1,0	1,2
Средние: $m_K = 2^\circ$; $m_S = 3\%$	10	2,5	3,7	2,1	3,0	1,9	2,5	1,6	2,1	1,3	1,7	1,1	1,3
	15	1,8	3,0	1,7	2,5	1,5	2,2	1,4	1,8	1,1	1,5	1,0	1,2
	20	1,5	2,5	1,4	2,1	1,3	1,9	1,2	1,6	1,0	1,3	0,9	1,1
Большие: $m_K \geq 3^\circ$; $m_S \geq 4-5\%$	10	1,8	2,9	1,5	2,4	1,5	2,1	1,3	1,8	1,1	1,5	1,0	1,2
	15	1,3	2,2	1,2	1,9	1,1	1,7	1,0	1,5	0,9	1,3	0,8	1,1
	20	1,0	1,8	1,0	1,6	0,9	1,5	0,8	1,3	0,8	1,1	0,7	1,0

поэтому все задачи начинаются с определения времени кульминации Солнца.

Отметим, что именно знание кратчайшего промежутка между наблюдениями дает возможность пронаблюдать три линии по Солнцу вместо двух за сравнительно короткое время и повысить надежность места.

Пример 69. 24.05.85 в φ 36°10'N, λ = 85°28'E (N_0 = 6E), намечено время вторых наблюдений Солнца $T_c = 12^h$. Определить выгодный промежуток ΔT и время первых наблюдений, если $V = 15$ уз и ожидаются: $m_n = \pm 0,5'$, $m_K = \pm 2'$, $m_S = \pm 3\%$. Скорость ω_A определить по таблицам ВАС—58.

Решение.

1. Верхняя кульминация Солнца T_c^k = 12^h15^m, $\delta_{\odot} = 20^\circ 48'N$ (МАЕ).

2. Определение скорости (средней) изменения азимута ω_A :

2.1. В $T_c = 12^h 15^m$ $t_M = 0^\circ$, но наблюдения раньше — в 12^ч, т. е. за 15^m или приблизительно 4^ч до кульминации, поэтому $t_2 = 4^\circ E$. Считая, что в среднем время между наблюдениями около 2^ч = 30', получим $t_1 = 4^\circ E + 30' = 34^\circ E$.

2.2. По $\varphi_T = 36^\circ$, $\delta_T = 21^\circ$ (одноименны) и $t_T' = 4^\circ$ из таблиц ВАС—58 получим $A_2 = 165,8^\circ$, а для $t_T' = 34^\circ$ получим $A_1 = 107,5^\circ$ (NE).

2.3. Разность азимутов за 2^ч: $A_2 - A_1 = 165,8^\circ - 107,5^\circ = 58,3^\circ$; получим $\omega_A = \Delta A / \Delta T = 58,3^\circ / 2^\circ = 29,1^\circ/\text{ч}$. Так получается средняя скорость; мгновенная скорость получается по МТ—75 (табл. 18).

3. Из табл. 13 или по формуле (275) получаем $\Delta T = 1,2^\circ$. Это соответствует $\Delta A = 35'$.

4. Время первых наблюдений $T_c' = 12^h - 1^h 12^m = 10^h 48^m$.

Оценка точности места по Солнцу. Следует применять полный эллипс погрешностей [3]. Графическое построение его производится в следующем порядке: построить две полосы положения по m_1 ($I'-I'$) и m_n и вписать эллипс случайных ошибок от руки; провести астрономическую биссектрису по A_{cp} ;

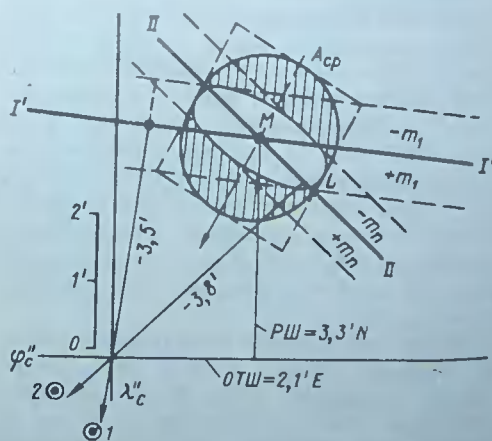


Рис. 143

параллельно A_{cp} провести касательные к эллипсу и отложить от точек касания величину $r = v_1^2 + \sigma_m^2$, где v_1 — векторная ошибка, отсекаемая первой полосой на второй линии (снимается с прокладки — ML на рис. 143); $\sigma_m = m_\Delta \sec \frac{\Delta A}{2}$; m_Δ — СКО повторяющейся ошибки [формула (232)];

построить параллелограмм и вписать в него полный эллипс от руки. Утроив его полуоси, получим предельный эллипс погрешностей (см. рис. 143).

Приемы повышения надежности обсервации по Солнцу. В § 71 показано, что надежное место, т. е. обеспеченное от промахов, систематических ошибок и имеющее достаточную точность, получается только увеличе-

нием числа линий до четырех, наблюдаемых попарно в обратных азимутах. Исходя из этого повышение надежности обсервации по Солнцу может быть достигнуто следующими приемами: дополнительным наблюдением двух высот Солнца через зенит; наблюдением трех линий по Солнцу, причем вторая дополнительно наблюдается через зенит; привлечением второго независимого наблюдателя. Для гарантии от общей ошибки во времени секундомер останавливается по другому измерителю времени (см. § 48). Наиболее надежные результаты дают «одновременные» наблюдения вторых линий «через зенит» (см. § 47), возможные при $h \geq 45^\circ$. При этом обычные линии ($I-I$ и $II-II$) приводятся к зениту дополнительных ($I'-I'$ и $II'-II'$), как обычно [формула (175)], и все четыре прокладки берутся из второго числимого места. Четырехугольник анализируется (см. § 71) и получается надежное место.

§ 78. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПО СОЛНЦУ. ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ

Последовательность выполнения обсервации по Солнцу. Выполнение обсервации состоит из следующих последовательных операций:

предварительные операции (выбор времени наблюдений, проверка инструментов, получение поправок); первые наблюдения (oc_1, T_1); обработка первых наблюдений с φ'_c, λ'_c ; вторые наблюдения (oc_2, T_2); обработка вторых наблюдений; расчет φ''_c и λ''_c , вычисление n_2 и A_2 , прокладка первой и второй линий из φ''_c, λ''_c ; анализ обсервации, выбор и оценка точности места и использование полученной информации для навигации.

Предварительные операции, планирование наблюдений. Определения места по Солнцу получаются лучше, если наблюдения спланировать заранее. Планирование и выполнение обсервации зависят от поставленных целей;

получить место для обычного контроля числения;

получить наиболее точное и надежное место (например, при подходе к берегу);

получить место, свободное от отдельных ошибок числения (ошибок лага, сноса, компаса, — см. § 77).

Для получения обычного контрольного места следует наметить время, к которому оно должно быть получено, определить наивыгоднейший интервал ΔT (по табл. 13 или расчетом) и время

первых наблюдений. Наиболее рациональный прием наблюдений и их обработки в этом случае — предвычисление второй линии — рассмотрен далее в ускоренных способах (см. § 81).

Обстановка на море может помешать наблюдениям в запланированное время, тогда они выполняются в другие моменты по возможности с соблюдением интервала ΔT или ΔA ; во всяком случае ΔA в обычных случаях не должна быть меньше 30° .

Наблюдения. Наблюдения Солнца лучше производить с самой сильной трубой — это повышает точность. Обычно измеряют высоту нижнего края Солнца, так как на фоне неба касание видно лучше (см. рис. 81). Сведение изображений около кульминаций производят вращением барабана, а далеко от меридиана — ожиданием на заранее установленных отсчетах (см. рис. 81, б и пример 44). Когда края Солнца видны нечетко, можно совмещать с горизонтом его центр.

В обычных условиях рекомендуется измерять три высоты, а при повышенных требованиях — пять высот Солнца. Организация наблюдений, запись, контроль и вывод среднего описаны в § 48.

Так же как и для звезд, измерения высот Солнца требуют регулярной тре-

нировки; результаты могут резко ухудшиться при перерыве порядка года.

Обработка наблюдений, получение φ'' и λ'' . При выполнении обсервации по Солнцу особое внимание должно уделяться счислению между обсервациями. Следует принять все меры для уточнения счисления за это короткое время. Для проверки поправки компаса лучше при первых наблюдениях Солнца взять его КП и определить ΔK , если только высота Солнца не чрезмерно велика. Плавание между наблюдениями рассчитывают тремя способами: по $\rho_{01} = \rho_{02} - \rho_{01}$, по времени и скорости, по оборотам машины; затем их сравнивают. Для уменьшения графических ошибок при малом масштабе карты φ'' , λ'' следует определить письменным счислением; особенно это важно в высоких широтах.

Обработка наблюдений производится по схеме, приведенной в примере 70, в ней первые и вторые наблюдения обрабатываются последовательно. Анализ произведенной обсервации включает выявление промахов и оценку точности. Оценка точности производится эллипсом ошибок. В двух линиях выявляются только грубые просчеты — по формуле (230); систематические ошибки не выявляются.

Однократное определение места по двум одновременно полученным линиям не является надежным, и переносить счисление в одиночную обсервацию не следует. Лучше привлечь второго наблюдателя или наблюдать «через зенит».

Пример 70. 11.05.85 в Атлантическом океане, следуя КК — 218° (—1°), $V = 16$ уз, определить место по нижнему краю Солнца на 14^ч; на это время приблизительно $\varphi_c = 38^\circ 40' N$, $\lambda_c = 40^\circ 30' W$, $L_0 = 2 W$.

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Время кульминации Солнца:

T_M	11 ^ч 56 ^м	11.05
$+\lambda$	2 42	
$T_{ГР}$	14 38	$\delta = 18^\circ N$
N_0	2	
T_c^K	12 ^ч 38 ^м	$t_1 = 0^\circ$

1.2. Скорость изменения азимута:

$$t_2 = 14^h - 12^h 38^m = 1^h 22^m \approx 20^\circ$$

Из табл. ВАС—50 по $\varphi_1 = 38^\circ$, $\delta = 18^\circ$, $t_1 = 0^\circ$ имеем

$$A_1 = 180^\circ, \text{ а на } t_2 = 20^\circ,$$

$$A_2 = 133^\circ \text{ NW} = 225^\circ$$

$$\omega_A = (225^\circ - 180^\circ) / 1,37 = 33^\circ / q$$

1.3. Промежуток ΔT . Задавая $\Delta A = 40^\circ$, имеем

$$\Delta T = \frac{\Delta A}{\omega_A} = 1,2^h$$

1.4. Время первых наблюдений: $T_2^* = T_2^* - \Delta T = 14^h - 1^h 12^m = 12^h 48^m$.

1.5. Получение поправок: $u_{ГР} = -1^m 27^s$, $oi_1 = 0^\circ 32,8'$; $oi_2 = 359^\circ 29,0'$; $\varepsilon = 14,8^m$; пуск секундомера $T_{ХР} = 14^h 45^m 00^s - (-1^m 27^s) = 2^h 46^m 27^s$.

2. Первые наблюдения: $T_c^* = 12^h 48^m$, $oi = 20,3$; $\varphi' = 38^\circ 45' N$; $\lambda_c = 40^\circ 20' W$.

$T_{СКМ}^{ср} = 3^m 25^s$, $oc_{ср} = 68^\circ 53,4'$, $s_1 = -0,4$, $t = +25^\circ$, $B = 750$.

3. Обработка первых наблюдений:

$T_{ГР}^n$	14 ^ч 45 ^м 00 ^с	t_1	30°55,2'
$T_{СКМ}$	3 25	Δt_1	12 05,4
$T_{ГР}$	14 ^ч 48 ^м 25 ^с	Δt_2	0,8
δ_r	17°57,6'	$t_{ГР}$	43 01,4
$\Delta \delta$	+ 0,5	λ	40 20
$\delta_{\odot}$	17°58,1' N	t_M	2°41,4
oc	68°53,4'	$\bar{\lambda} \Delta$	1,0 0,6
$t \rightarrow s$	— 0,5		
d	— 6,8		
h_b	68 46,1	h	69°01,7'
$\Delta h_{p,p}$	— 0,3	h_c	69°05,2
R	+ 15,9	n	— 3,5'
h	69°01,7'	A_1	187,2

h_T	68°50,3'	A_T	172,1
$\varphi = 39^\circ - 15,0' N$	+ 14,9		— 0,1
$\delta = 18^\circ - 1,9' N$	— 1,9		+ 0,0 $q = 6^\circ$
$t = 3^\circ - 18,6 W$	+ 1,9		+ 0,8
h_c	69°05,2'	A_c	172,8° NW
		A_1	187,2°

4. Вторые наблюдения: $T_{ХР}^n = 15^h 58^m 00^s - (-1^m 27^s) = 3^h 59^m 27^s$. Среднее $T_{СКМ} = 1^m 55^s$, $oc_{\odot} = 62^\circ 42,1'$, $s_2 = +0,5'$; $T_c = 14^h$, $oi = 39,7$, $\Delta A = -2^\circ$, $HK = 217^\circ$, $V_{ср} = 15,9$ уз.

5. Обработка вторых наблюдений

5.1. Расчет вторых координат: $\Delta T = T''_{гр} -$

$-T''_{гр} = 1^h 11^m 30^s = 71,5^m$. Плавание $S = 18,9'$ (по $V_{ср}$), $S_{\Delta} = 19,0'$, с карты $\varphi_c'' = 38^{\circ} 29,9' N$; $\lambda_c'' = 40^{\circ} 34,6' W$ (проверка на ЭКВМ дает отклонения на $0,1'$).

5.2. $T_{гр} = 15^h 59^m 55^s$

t_1	45° 55,2'
Δt_1	14 57,8
Δt_2	1,0
$t_{гр}$	60 54,0
λ_2	40 34,6
t_M	20° 19,4'
δ_c	17° 58,9' N

5.3.	h_T	63° 26,6' A_1	133,3
$\varphi = 38^{\circ} 29,9' N$		— 20,6'	— 0,7
$\delta = 18^{\circ} - 1,1 N$		— 0,9	— 0,0
$t_2 = 20^{\circ} + 19,4 W$		— 10,9	— 0,5
$q = 37^{\circ}$	h_c	62° 54,2' A_c	133,5 NW = = 226,5

5,4.

α_{c2}	62° 42,1'
λ_{c2}	— 0,4
d	— 5,8
h_b	62 34,8
$\Delta h_{p.p}$	— 0,4
R	+ 15,9
h	62 50,4
h_c	62 54,2
n	— 3,8'

5.5. Прокладка (см. рис. 143):

φ_c''	38° 29,9' N	$C = 31^{\circ} - 3,9'$
$PШ$	+ 3,3 N	$T_0 = 14^{\circ}$
φ_0	38° 33,2' N	
λ_c''	40° 34,6' W	
$PД$	— 2,6 E	
λ_0	40° 32,0' W	

5.6. Анализ обсервации.

Принимая $m_z = 0,4'$, $m_n = \pm 0,5'$, $m_{\Delta} = \pm 0,6'$, $\Delta A = 39,3^{\circ}$, строим эллипс погрешностей.

§ 79. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА КОМБИНИРОВАНИЕМ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И НАВИГАЦИОННЫХ ЛИНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОЙ ВЫСОТНОЙ ЛИНИИ

Комбинирование линий положения. В практике мореплавания часто бывают случаи, когда к уже имеющейся навигационной линии или линиям для получения места судна или его уточнения можно присоединить соответствующую расположенную высотную линию. Иногда порядок бывает обратным — к высотной линии присоединяется навигационная. Наблюдения при этом могут быть как одновременными, так и разновременными. При подборе объектов наблюдений необходимо, чтобы угол между двумя линиями был близок к 90° , а между тремя — к 120° .

С высотными линиями можно комбинировать следующие навигационные линии положения: по РНС «Декка», «Лоран», радиопеленги как обычных, так и секторных радиомаяков, расстоя-

ния по радиолокатору, пеленг отдаленной вершины, надежно опознанную изобату.

Прокладка линий, как правило, выполняется на путевой или на радионавигационной карте. Приведение линий к одному зениту при одновременных, а также разновременных наблюдениях лучше выполнять графически на карте путем смещения одной линии по курсу на величину плавания между наблюдениями.

Обсервованное место при двух линиях принимается в точке их пересечения и помечается знаком менее точной обсервации, например: численно-обсервованное, по радиопеленгам, опознанное по глубинам, астрономическое. При определении по трем линиям место получают центрографическим методом.

подсчитывая веса по формуле (237), или приближенно — ближе к точке пересечения более надежных линий.

Оценку точности полученного места можно выполнить по формуле

$$M = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\left(\frac{m_U}{g}\right)^2 + m_n^2} \quad (276)$$

где θ — угол пересечения линий;

m_U и m_n — средние квадратические ошибки навигационного параметра и высотной линии;

g — модуль градиента навигационного параметра.

Опытом установлено, что ошибки m_U в радиопелегн в среднем будут равны: для дневных наблюдений — $1-1,5^\circ$ при $D < 100$ миль; при ночных наблюдениях — порядка $\pm 2,5^\circ$; для визуального пеленгования m_U составляет порядка $\pm 0,6^\circ$ (при спокойном море) и $\pm 1,5^\circ$ (при качке). Для пеленга в формулу (276) вводим

$$\frac{m_U}{g} = \frac{m_n D}{57,3}$$

В соответствии с этим линия по радиопелегнгу может иметь ошибку $\pm 2 \div 5'$ и в общем случае будет менее точна, чем высотная линия. Визуальный пеленг, например вершины горы, на небольших расстояниях точнее высотной линии, а на расстояниях в 30—60 миль их точности примерно одинаковы. Линия, полученная по радиолокационному расстоянию, имеет ошибку порядка 1 % от D для точечных ориентиров и порядка 2—3 % до D для береговой линии. Например, для расстояния 26 миль имеем в первом случае $m = \pm 0,3'$, во втором $m = \pm 0,5 \div 0,8'$. Следовательно, линия по радиолокационному рас-

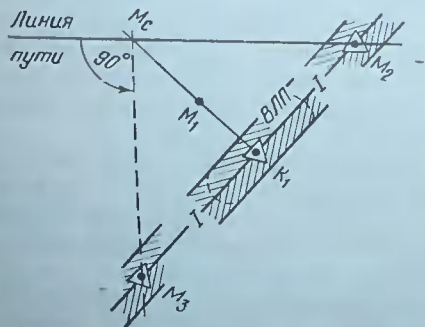


Рис. 144

стоянию до точечного объекта точнее астрономической, до береговой линии — одного порядка или ниже астрономической. Линии, полученные по РНС «Декка», обычно точнее астрономических, по РНС «Лоран-С» того же порядка точности.

Не надо забывать, что все сказанное выше относительно анализа обсервации относится также и к навигационным линиям, и к комбинированному определению.

Комбинированные способы определения места можно применять как вне видимости берегов, так и при подходе к берегу; они значительно расширяют возможности получения надежного места.

Применение одной высотной линии. Высотная линия, проложенная в нужном направлении, может оказаться полезной судоводителю для подправки счисления, в качестве ограждающей линии или для выхода к намеченной точке берега.

Подправка счисления. 1. Если ошибки счисления очень велики и счисляемое место M_c ненадежно, то можно перенести его в определяющую точку k_1 и считать счислимо-обсервованным (рис. 144). Площадь вероятного места изобразится здесь эллипсом, расположенным вдоль линии положения.

2. Если ошибки счисления M_c и ошибки m_n линии одинаковы, то место M_1 принимается посередине между M_c и k_1 .

3. Если лаг работал ненадежно, а компас надежно, то место можно перенести в точку M_2 пересечения высотной линии с линией пути.

4. Если обнаружен боковой снос, то место можно перенести в точку M_3 пересечения высотной линии положения с перпендикуляром, проведенным из счислимой точки к линии пути.

Предупреждение о приближении к опасности. 1. При следовании путем, идущим вдоль опасных мест, нужно наблюдать светило на траверзе. Тогда высотная линия, имея направление, параллельное опасности, укажет, опасен ли путь.

Если полоса положения проходит слишком близко от опасностей, то следует наметить безопасное расстояние,

отвернуть перпендикулярно проложенной линии и выйти на новый путь, за который принять смещенную линию.

2. При подходе к опасности, расположенной по курсу, следует наблюдать светило по носу или корме. Высотная линия, имея направление, перпендикулярное курсу, с учетом возможных ошибок укажет расстояние до опасности. Аналогично определяются расстояние и время следования до точки поворота.

Выход к намеченной точке берега. При подходе к какому-либо плохо опознаваемому пункту берега или при отсутствии видимости берега следует наблюдать светило (Солнце), линия азимута которого расположена вдоль линии берега. Высотная линия $I—I$ пройдет при этом приближенно под прямым углом к берегу (рис. 145).

С помощью параллельной линейки перемещаем линию, пока она не пройдет через намеченный пункт A . Это и будет путь, на который следует выйти. Измеряем расстояние S_1 между линией $I—I$ и смещенной линией $I'—I'$ с учетом расстояния ΔS , пройденного за время обработки. Ложимся перпендикулярно высотной линии и выходим по счислению на путь $I'—A$ (по времени $\Delta T = \frac{S_1}{V}$ и по *рол*), которым и следуем в полосе $\pm m_n$ до выхода к намеченному пункту A (до безопасных глубин).

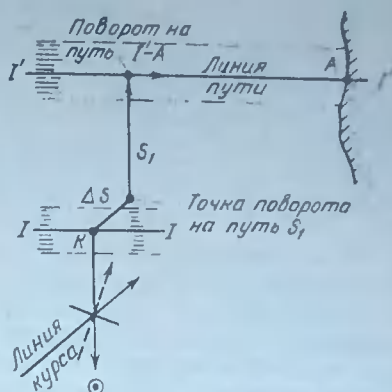


Рис. 145

Вообще при наблюдении светила по курсу величина переноса $n = h - h_c$ покажет снос по курсу; при наблюдении светила по траверзу — укажет величину и сторону бокового сноса судна.

При применении одной высотной линии можно использовать метод предвычисления (см. § 80), при котором с координатами φ_c и λ_c , снятыми вперед для намеченного объекта (опасность, поворот) и момента, вычисляются h_c и A_c . Высота исправляется поправками, взятыми с обратным знаком, и нужным переносом и линия прокладывается на карте. С этой высотой сравнивается высота, наблюдаемая около намеченного момента.

Глава 19. УСКОРЕННЫЕ СПОСОБЫ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА

§ 80. ПРИЕМЫ УСКОРЕНИЯ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ СЧИСЛИМОГО МЕСТА. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА (ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕ)

Определение места способом линий положения требует значительных затрат времени на подготовку, наблюдения и их обработку. В среднем затрачивается от 35 м при определении по двум линиям до 1 ч — по четырем. Основные затраты времени приходятся на предварительные и окончательные вычисления, причем предварительные вычисления служат для организации наблюдений, и их большая часть в дальнейшем не используется. Основные вычисления должны вестись интенсивно, с полной отда-

чей внимания, что во время вахты не всегда возможно. Между наблюдениями и получением места на карте образуется большой интервал времени, т. е. происходит задержка в использовании информации, даваемой обсервацией. Эта задержка иногда обесценивает обсервацию, так как при современных скоростях полученное место оказывается позади в 10—20 милях.

Все это приводит к требованиям ускорить и упростить обработку наблюдений и автоматизировать ее, как то и

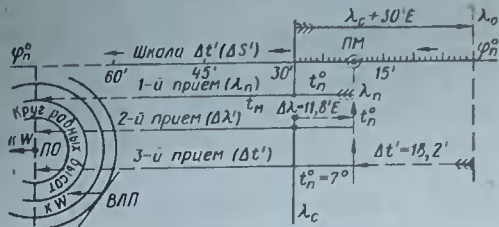


Рис. 146

происходило в авиации. Ускорение получения места и сокращение задержки информации можно в настоящее время достичь следующими путями:

применением приема перемещения места при обработке по численным таблицам, что сокращает вычисления;

применением предварительных вычислений — предвычислений линий положения, что сокращает задержку информации;

использованием предварительных вычислений в обработке путем применения более рациональных схем и приемов наблюдений;

применением специальных таблиц «Подобранных звезд», которые с использованием всех предыдущих приемов дают быстрое определение места по звездам;

применением малых ЭВМ;

применением навигационных комплексов.

В настоящее время лучшим решением является применение автоматизированного ввода данных от ручного секстана и хронометра в специальную ЭВМ или в навигационный комплекс, где и производится все решение и выдача готовых координат. Однако ручные вычисления с таблицами остаются пока основными, и приемы их упрощения должны быть освоены штурманами; эти приемы и рассмотрены ниже. Рассмотрены также вычисления на микрокалькуляторах.

Прием перемещения счислимого места. При обработке наблюдений по всем численным таблицам, а также по некоторым более старым таблицам применяется прием входа с целыми градусами по φ'' и t_m , не интерполируя на $\Delta\varphi$ и Δt . Тогда в схеме вычислений, например по таблицам ВАС—58, остаются только поправки Δh_b и ΔA_b . Полученные эле-

менты высотной линии h и A_b относятся не к счислимому месту, а к месту с φ'' и такой долготой λ_m , которая в сумме с $t_{гр}$ дает целое t_m , причем φ'' и λ_m берутся ближайšie — в пределах $\pm 30'$ от счисляемых. Это место называется **перемещенным местом (ПМ)**, и из него на карте производится прокладка данной линии (см. рис. 116). Возможность перемещения места вытекает из третьего свойства В.П. — независимость высотной линии от принятых счисляемых координат (см. § 67).

Перемещение места значительно сокращает вычисления по таблицам ВАС—58, что особенно заметно при трех линиях и более. Однако перемещение места вызывает некоторые дополнительные погрешности, особенно при крайних положениях точек, т. е. при $\Delta\varphi_m$ и $\Delta\lambda_m$ по $30'$. Из исследований, проведенных на основе анализа формулы (227) и экспериментальным путем вытекает, что дополнительные ошибки в линии оказываются порядка $\pm 0,4' - 0,7'$; они и должны учитываться при оценке точности места.

Приемы перемещения места по долготам. Получение целого градуса t_p и нанесение перемещенного места можно выполнять тремя приемами (рис. 146):

подбором долготы λ_m такой, чтобы $t_{гр} \mp \lambda_m$ оказался целоградусным;

добавлением к t_m такой $\Delta\lambda$, чтобы t_p оказался целоградусным, т. е. $t_p = t_m \pm \Delta\lambda$;

использованием шкалы t_m или S_m , считаемой от меридиана $\lambda_0 = \lambda_c + 30'E$ — к западу, по которой откладываются минуты сверх целого градуса, т. е. $t_m = t_p + \Delta t'$. Здесь t_m получен с долготой $\lambda_c + 30'E$; t_p используется для входа в таблицы, а $\Delta t'$ откладывается от λ_0 всегда к W в масштабе долгот. Этот прием наиболее удобен своей стандартностью и тем, что дает смещение всегда к W . Он и будет применяться в дальнейшем, особенно при наблюдениях с секундомером и работой с таблицами ВАС—58 и НО-249. В этом случае $\lambda_c + 30'E$ вводится в расчеты времени, а все часовые углы (или S_m) применяются «на шкалах», как показано выше.

Примечание. Так как шкала имеет $60'$, то при $\Delta t' = 60'$ на меридиан λ_0 при-

ходит следующий градус t_M и отстояния ПМ от λ_c никогда не превысят $30'$.

Если не вводить $\lambda_c + 30' E$, то отстояние ПМ от λ_c будут превышать $30'$ (до $60'$), что неудобно и дает дополнительные ошибки.

Пример 71. 11.05.85 в $\varphi_c = 55^\circ 45' N$; $\lambda_c = 22^\circ 50' W$ наблюдали Венеру $T_{гр} = 11^h 20^m 40^s$; $\Delta\lambda = 1 W$; определить перемещенное место.

Решение (см. рис. 146). $\varphi_n = 56^\circ N$.
Определение долготы:

1-й прием		2-й прием	
$t_{гр}^\circ$	$29^\circ 38.2'$	$t_{гр}^\circ$	$29^\circ 38.2'$
λ_n	$22^\circ 38.2'$	λ_c	$22^\circ 50'$
t_n^0	7°	t_M	$6^\circ 48.2'$
		$\Delta\lambda'$	$11.8' E$
		t_n^0	7°

3-й прием	
$t_{гр}^\circ$	$29^\circ 38.2'$
$\lambda_c - 30' E$	$22^\circ 20'$
t_M	$7^\circ 18.2'$
t_n	7°
Δt	$18.2' \text{ к } W \text{ от } \lambda_c$

При использовании ПМ схема вычислений может быть упрощена и расположена в колонку (см. примеры 72, 73).

В обычной обстановке способ перемещенного места имеет смысл применять при обработке трех и более линий; для двух линий по Солнцу этот прием не рационален. При обработке высот более 73° по таблицам ВАС—58, а также для таблиц «подобранных звезд» этот прием обязателен.

Определение места с предвычислением линий положения. Вычисления линий положения можно выполнить заранее на заданное T_c ($T_{тр}$) и с координатами φ_c , λ_c на это время. Возможно полное предвычисление почти всех операций и частичное предвычисление времени пуска секундомера или одной из линий. Полное предвычисление позволяет: сократить затраты времени на получение места после наблюдений до 2—5 м; получить место точно на намеченное T_c , например на конец вахты.

время поворота и т. п.; выполнить обработку в спокойной обстановке не спеша, что сокращает промахи.

Однако полное предвычисление имеет существенный недостаток: при ухудшении видимости или облачности в период более 5—8 м от намеченного времени вычисления надо переделывать. Кроме того, требуется опытный наблюдатель. Частичное предвычисление позволяет упростить схемы обработки и наблюдения путем использования предварительных операций в окончательной обработке. Предвычисление можно рекомендовать при обработке наблюдений Венеры и Солнца, Луны и Солнца, а также при работе с таблицами подобранных звезд в сумерки. При наблюдениях Солнца выгодно предвычислять только вторую линию (см. § 81). При сумеречных наблюдениях и обработке по таблицам ВАС—58 выгодно частичное предвычисление.

Предвычисление выполняется в следующем общем порядке. На заданное T_c по средней скорости судна рассчитываются вперед его координаты и получают другие данные. Интервал между наблюдениями светил обычно принимается равным 4 м.

По этим данным на намеченное $T_{гр}$ ($T_{гр} = 4^m$; $T_{гр} = 8^m \dots$) обычным путем рассчитывают h_c и A_c . В h_c вводят поправки i , s , d , p , R (выбранные из таблиц по h_c), но с обратным знаком, т. е.

$$h_{np} = h_c - \Delta h, \quad (277)$$

где $\Delta h = i + s + (-d) + (-p + r) \pm R + \Delta h_{l, B} + \Delta h_z$, а Δh_z вычисляется для ΔT^m от средней минуты интервала до намеченного T_c .

После выполнения вычислений производятся предварительная прокладка линий азимутов из намеченной числимой точки. После наблюдений, выполненных (по возможности) ближе к намеченной минуте, находят переносы $n = oc - h_{np}$, прокладывают их по линиям азимутов и получают точки k_1 , k_2 (рис. 147). Если наблюдения выполнены точно в намеченное время, то линии прокладываются из этих точек, и в их пересечении, как обычно, получается место. Если же наблюдения не совпадают по времени (в пределах 1—4 м),

будет наблюдаться. Первым планируется наблюдение более трудного светила (Венеры, Луны), поэтому в схеме обработки оно стоит первым. Интервал между наблюдениями 4^м, что достаточно для измерения трех высот и перехода к наблюдениям следующего светила. При исправлении высот для входа в таблицы применяется h_c , а для приведения к зениту интервал $\Delta T = 4^m$. Пример 72 показывает предвычисление с перемещенным местом ($\lambda_c + 30'E$).

Предвычисление при определении места по звездам. Предвычисление линий по звездам выполняется аналогично рассмотренному, за исключением того, что наблюдения звезд могут выполняться в основном в сумерки, поэтому начало наблюдений намечается на середину гражданских сумерек вечером и на середину навигационных — утром. Интервал между наблюдениями звезд берется также 4^м. Полные предвычисления линий по таблицам ВАС—58 для звезд невыгодны, так как намеченная звезда в намеченное время может оказаться невидимой и часть вычислений, а иногда и все, пропадают. Предвычисления по звездам удобны с таблицами типа НО-249, рассмотренными в § 82. С таблицами ВАС—58 выгоднее производить частичное предвычисление линий, названное нами «рациональным приемом» и рассмотренное ниже.

Пример 72. 12.05.85 в Атлантическом океане, следуя ИК = 325°, $V = 16$ уз. определить место на $T_c = 12^h$; видны Луна и Солнце. На это время $\varphi_c = 27^\circ 40'S$, $\lambda_c = 78^\circ 45' W$ ($N_b = 4 W$). Применяем предвычисление линий с перемещенным местом.

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Условия наблюдений. С глобуса: $h_c = 38^\circ$; $A = 92^\circ SW$; $h_\odot = 41^\circ$; $A = 23^\circ NE$. 1.2. Поправки: $u_{xp} = -1^m 13^s$; $e = 16,2$ м; $i = +20^\circ$; $B = 775$; $i = -1,2'$; $s_1 = +0,4'$, $s_2 = +0,3'$ (по h с глобуса); интервал наблюдений принимаем 4^м.

2. Предвычисление с перемещенным местом:

$$\varphi_n = 28^\circ S;$$

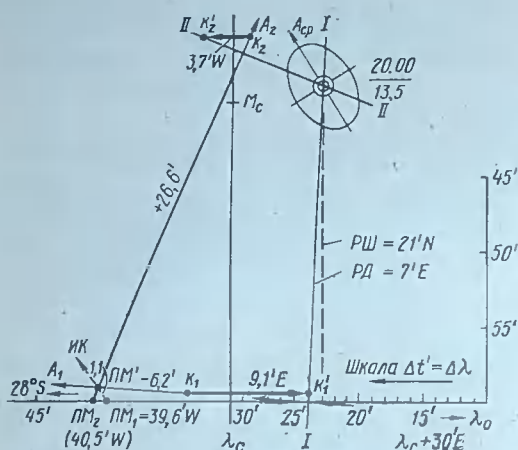
$$\lambda_c + 30'E = 78^\circ 15' W.$$

Луна		☉ Солнце
T_c	$11^h 56^m 00^s$	$12^h 00^m 00^s$
$N_b W$	4	4
$T_{гр}$	$15^h 56^m 00^s$	$16^h 00^m 00^s 12,05$
ι_T	$119^\circ 19,7'$	$60^\circ 55,5' \begin{bmatrix} 14,0 \\ 1,0 \end{bmatrix}$
$\Delta \iota_1$	13 21,7	
$\Delta \iota_2$	13,2	
$\iota_{гр}$	132 54,6	60 55,5
$\lambda_c + 30'E$	78 15	78 15
ι_M	54 [39,6]	342 [40,5]
ι_0^n	$54^\circ W$	$18^\circ E$
δ	$15^\circ 31,4'S$	$18^\circ 14,0' N$
$\Delta \delta_1$	— 11,2	$\begin{bmatrix} -11,9 \\ + 0,6 \end{bmatrix}$
$\delta + \Delta \delta$	$15^\circ + 20,2'$	$18^\circ + 14,0'$
h_T	$38^\circ 31,3'$	$40^\circ 48,6'$
$[q] \Delta h_\delta$	[66] — 8,2	[159] — 13,1
h_c	$38^\circ 39,5'$	$40^\circ 35,5'$
$A_T = +$	$92,8^\circ - 0,4 SW$	$157,2 - 0,1 SE$
$+ \Delta A_\delta$		
$i = s$	— 0,8'	— 0,9'
a	— 7,1	— 7,1
Δh	+ 26,7	— 1,0
R	—	+ 15,9
$\Sigma \Delta h$	+ 18,8	+ 6,9
h_{np}		
$= h_c - \Delta h$	$38^\circ 20,7'$	$40^\circ 28,6'$
$A_{кр}$	$272,4^\circ$	$22,7^\circ$
Плав.	1,1'	—
T_{xp}^n	$15^h 57^m 13^s$	$16^h 01^m 13^s$
$T_{гр} - u$		

НАС. 58

3. Предварительная прокладка (рис. 148). На параллели $\varphi_n = 28^\circ S$ от $\lambda_c + 30'E$ к западу откладываем 39,6' и 40,5', получаем $ПМ_1$ и $ПМ_2$. Из $ПМ_1$ прокладываем курс, откладываем плавание 1,1' вперед — ко второму зениту, получим $ПМ_1'$. Из $ПМ$ строим линии азимутов.

Ср ос	38°14.5'	40°55.2'	T_{xp}^{cp}	3°56'35"	4°01'28"
h _{пр}	38 20.7	40 28.6	$T_{xp}^{пр}$	3 57 13	4 01 13
5. После наблюдений:					
	—6,2'	+ 26,6'	ΔT	— 35°	+ 15°
n				Раньше	Позже
		Из МАЕ	$\Delta t^{\odot}$	9,1'	3,7'
			$\Delta \lambda$	9,1E	3,7W



6. Результат обсервации: $T_c = 12^h 00^m$, $\alpha = 13,5$ (см. рис. 148)

φ_{II}	28°00' S	λ_c	78°45' W
P_{III}	— 21' N	P_D	— 7 E
φ_0	27°39' S	λ_0	78°38' W

Оценка точности производится построением эллипса

но $m_h = \pm 0,8'$ для ПМ:

$$m_A = \pm 0.6'$$

$\Delta A = 110,3;$

$$3\alpha = 3.6'; \quad 3\theta = 2.0'$$

Рациональными приемами обсервации названы нами¹ приемы, объединяющие наиболее передовые разработки по «ручному» выполнению обсервации одним штурманом и получению им надежного места. Эти приемы включают некоторые новые предварительные операции, усовершенствованные приемы обработки и выполнение анализа обсервации на надежность. Для звезд эти приемы включают перемещение места; для Солнца — предвычисление второй линии. Наиболее рациональной для звезд является обработка по таблицам типа НО-249, рассмотренная в следующем параграфе.

Рациональный прием определения по звездам с таблицами ВАС—58. Ре-

комендуемый прием предполагает выполнение следующих требований: наблюдения выполняют при максимально ярком горизонте (когда звезды без трубы секстана обычно не видны), поэтому обязателен подбор звезд по глобусу или таблицам; наблюдения проводят с секундомером, время пуска которого и звездное время на этот момент предвычисляются; рекомендуемый прием рассчитан на одного наблюдателя (он наблюдает, фиксирует моменты секундомера, записывает α и T в бланк или блокнот, не уходя с места наблюдений). При этом возможны наблюдения пяти-шести звезд за самые короткие сумерки); схемы обработки новые — для перемещения места по шкале от $\lambda_c + 30'E$ (см. § 80, третий способ). Предлагается следующий порядок работы при определении места по звездам.

¹ Приемы разработаны в ЛВИМУ автором совместно с доц. А. А. Чебаном.

1. Предварительные операции (до наблюдений)

1.1. Расчет времени начала наблюдений, звездного времени, времени пуска секундомера (см. пример 73). Рассчитать по МАЕ и приближенным φ_c ; λ_c гринвичское время середины сумерек (гражданских — вечером, навигационных — утром) и уменьшить его на 4^m для запаса при выходе на наблюдения; получим время начала наблюдений $T_{гр}^{ин}$.

На это время по МАЕ рассчитать звездное время S_m — с долготой $\lambda_c + 30'E$; получить целые градусы S_p^n , отбросив (или добавив) избыток ΔS сверх градуса. Превратить это ΔS в ΔT по МАЕ обратным входом и отнять (или добавить) его от $T_{гр}^{ин}$. Получим $T_{гр}^п$ пуска секундомера. Например, по $T_{гр}^{ин} = 18^h56^m$ получим $S_m = 261^\circ27.6'$; отняв $27.6'$, получим $S_p^n = 261^\circ$ и $T_{гр}^п = 18^h56^m00^s - 1^m50^s = 18^h54^m10^s$, где 1^m50^s получена по $\Delta S = 27.6'$ обратным входом в основные интерполяционные таблицы МАЕ (с. 286, точка Овна); затем получим время пуска секундомера по хронометру:

$$T_{хр} = T_{гр}^п - u_{хр},$$

где $u_{хр}$ — рассчитана на момент наблюдений.

В момент $T_{гр}^п$ на меридиане $\lambda_c + 30'E$ будет звездное время S_p^n , например $S_p^n = 261^\circ$.

1.2. Подбор звезд для наблюдений. Установить звездный глобус по φ_p^n и S_p^n , $S_p^n + 1^\circ$; $+2^\circ$... Наблюдения начинаются с E — половины горизонта (вечером — с самой яркой звезды; утром — с самой неяркой) — так и производится подбор. Например: яркая звезда, далее вторая с $\Delta A = 90^\circ$ и так четыре-пять звезд; их h и A вносят в схему.

1.3. Определение поправок, проверка приборов. Выполняется до наблюдений в обычном порядке.

2. Наблюдения. Запустить секундомер в рассчитанное $T_{хр}^п$, заметить $ол$ и T_c ; снять φ_c ; λ_c ; установить на секстансе h_1 первой звезды, по A_1 и компасу отыскать звезду и произвести измерения; записать $ос$ и $T_{скм}$ в книжку или прямо в схему (см. пример 73), но не уходя с места наблюдений; аналогично наблюдать остальные 3—4 звезды. После на-

блюдений остановить секундомер (по другому хронометру) и получить снова $T_{гр}^п = T_{хр}^{ост} + u_{хр} - T_{скм}^{ост}$ для контроля времени.

3. Обработка наблюдений. Обработка производится по схеме примера 73. При этом применяется перемещенное место с введением шкалы от $\lambda_c + 30'E$, по которой будут откладываться минуты часовых углов (см. рис. 146).

Моменты секундомера переводят в $\Delta t^у$ по таблице МАЕ (для Овна). Эти ΔS добавляют к выписанному вверх S_p^n , получают S_m , добавляют t и получают t_m , как показано в схеме. Склонение звезд записывают сразу для входа в ВАС—58, т. е. в виде $\delta_t + \Delta\delta$. Выборки из ВАС—58 производят в этой же схеме по φ_p^n , δ_t и t_p^n , как обычно, с последующим введением поправок Δh_δ и ΔA_δ из табл. 1. Приведение к зениту на момент пуска секундомера выполняется графически на карте, для чего в схему вносят плавание за время $T_{скм}$.

Ряд операций в схемах вычислений может быть выполнен на калькуляторе, например суммирование поправок, расчет плаваний и др.

4. Прокладка (рис. 149) производится на карте или карте-сетке. По параллели φ_p^n (в примере $\varphi_p^n = 32^\circ N$) откладывают $\Delta\lambda = 30'E$ от λ_c . Этот меридиан — начало шкалы часовых углов. По ней (всегда к W) откладываются $\Delta t' = \Delta\lambda$ сверх градусов t_p^n , которые уже применены при входе в ВАС—58 (в схеме $\Delta t'$ подчеркнуты). Полученные ПМ смещаются по курсу назад на величину плавания и из приведенных ПМ производится прокладка линий положения.

5. Анализ обсервации. Необходимо: выявить промахи и систематические ошибки, оценить случайные, выбрать способ уравнивания (выбор места) и оценить точность места. Подробно анализ рассмотрен в § 71 (для четырех В.П.), а итоги обсервации — в § 73. При оценке точности применяем круговую ошибку $R = 2.2m_n'$. Здесь $m_n' = \pm \sqrt{m_n^2 + 0.6^2}$, где $\pm 0.6'$ — ошибка за перемещение места.

Пример 73. 11.05.85 в Средиземном море, следуя ГКК — $126^\circ (-1')$, $V = 16$ уз, определить место по звездам вечером. На $T_c = 20^h$ ($\lambda_c = 3 E$) $\varphi_c \approx 31^\circ50' N$, $\lambda_c \approx 28^\circ20' E$. Применим предварительный расчет

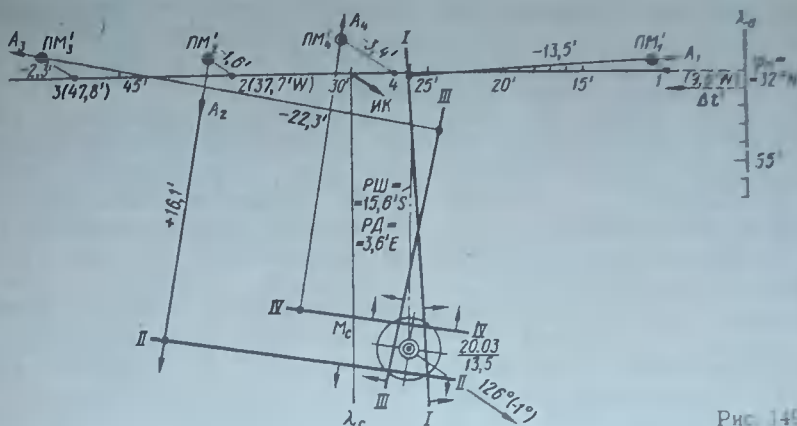


Рис. 149

времени пуска секундомера и перемещенное место.

Решение. 1. Предварительные операции.
1.1. Время начала наблюдений

Заход ☉	T_M	18 ^h 48 ^m
	λ	1 53
$(T_c = 19^h 55^m)$	$T_{гр}$	16 55
	$\Delta T / 2$	+ 13
Начало наблюдений	$T_{гр}$	17 08
Запас времени		4 ^m
Начало наблюдений	$T_{гр}^{ин}$	17 ^h 04 ^m

1.2. Звездное время:

t^V_T	124° 25,2'
Δt^V	1 0,2
t^V	125 25,4
$\lambda_c + 30^\circ E$	28 50
t^V_M	154 15,4
ΔS	- 15,4 $\rightarrow \Delta T_S =$ $= -1^m 01,5^s$
S^0_P	154°

1.3. Время пуска секундомера:

$T_{гр}^{ин}$	17 ^h 04 ^m 00 ^s
ΔT_S	- 1 01,5
$T_{гр}^n$	17 02 58,5
u_{xp}	(-43,5)
T_{xp}^n	5 ^h 03 ^m 42,0 ^s

1.4. Получение поправок, пуск секундомера $u_{xp} = -0^m 43,5^s$; $i = -0,7^\circ$; $z = 17^m 5^s$ (по h с лобуса) $\rightarrow 0,4^\circ - 0,3^\circ$; $0,0'$; $-0,2'$; $i = +22^\circ$; $E-755$; $m_n = \pm 0,5'$; $m_{им} = \pm 0,6'$ (от перемещения места). Пуск секундомера в $T_{xp}^n = 5^h 03^m 42^s$; $T_c = 20^h 03^m$; $o_1 = 13,5$; $\psi_c = 31^\circ 46' N$; $\lambda_c = 28^\circ 20' E$.

2. Наблюдения. Моменты $T_{скм}$ и S_c вносятся в схему обработки, приведенную ниже.

Примечание. В пункте 1.1 $T_{гр}$ наблюдений уменьшено на 4^m, так как вечером, при хороших условиях, наблюдения следует начинать на 4—6^m раньше.

3. Обработка наблюдений: $\Phi_{II} = 32^\circ N$; $S^0_P = 154^\circ$.

Звезды $h = A =$	Арктур 36°; 88°	Регул 70°; 188°	Кастор 54°; 280°	Дубхе 59°; 7°	Сириус 19°; 234°
$T_{скм}$	3 ^m 38 ^s	6 ^m 05 ^s	8 ^m 48 ^s	12 ^m 38 ^s	Не наблюдался
Δt^V	0° 54,6'	1° 31,5'	2° 12,4'	3° 10,0'	

Звезды $h = A =$	Арктур $36^\circ; 88^\circ$	Регул $70^\circ; 188^\circ$	Кастор $54^\circ; 240^\circ$	Дубхе $59^\circ; 7^\circ$	Сиренс $19^\circ; 231^\circ$
i_m^V	154 54,6	155 31,5	156 12,4	157 10,0	
τ_*	146 15,0	208 06,2	246 35,4	194 17,3	
i_m^*	$301^\circ 09,6$	$363^\circ 37,7'$	$402^\circ 47,8'$	$351^\circ 25,3$	
i_0^p	$59^\circ E$	$3^\circ W$	$42^\circ W$	$9^\circ E$	
$\delta + \Delta\delta$	$N19^\circ + 15,4'$	$N12^\circ + 2,5'$	$N32^\circ - 4,5'$	$N62^\circ - 9,9'$	
ос	$35^\circ 52,5'$	$70^\circ 15,8'$	$54^\circ 22,4'$	$59^\circ 29,5'$	
$i + s - d$	— 7,6	— 8,3	— 8,0	— 8,2	
$\rho + \Delta h_{t, B}$	— 1,3	— 0,3	— 0,7	— 0,6	
h_0	35 43,6	70 07,2	54 13,7	59 20,7	
h_T	$35^\circ 50,3'$	$69^\circ 48,6'$	$54^\circ 36,9'$	$59^\circ 26,6'$	
$[q] \Delta h_\delta$	$[64] + 6,8$	$[7] - 2,5$	$[79] - 0,9$	$[165] + 9,6$	
h_c	$35^\circ 57,1'$	$69^\circ 51,1'$	$54^\circ 36,0'$	$59^\circ 36,2'$	
$h_0 - h_c$	— 13,5'	+ 16,1'	— 22,3'	— 15,5'	
$A_T + \Delta A_\delta$	$88,7 - 0,3^\circ$	$171,5 - 0,0^\circ$	$78,5 + 0,1^\circ$	$8,3 + 0,1^\circ$	
Наименование	NE	NW	NW	NE	
$A_{\text{круг}}$	$88,4^\circ$	$188,5^\circ$	$281,4^\circ$	$8,4^\circ$	
Плавание	— 1,0'	— 1,6'	— 2,3'	— 3,4'	
Результат обсервации	$T_c = 20^h 03^m$; $\tau_0 = 31^\circ 44,4' N$; $C = 118^\circ - 3,5$; $m_0 = \pm 0,8'$; $2M = \pm 1,7'$ $ol = 13,5$; $\lambda_c = 28^\circ 23,6' E$. $\Delta = +1,1'$				

4. Прокладка. Производится на карте или планшете (см. рис. 149).

Примечания. 1. В строке i_m^* подчеркнутые цифры минут дают смещение ПМ по параллели $\varphi_0 = 32^\circ$ от λ_0 к западу. Градусы i_m^* дают i для входа в таблицы ВАС—58. 2. В квадратных скобках даны q из таблиц ВАС—58. 3. Плавание рассчитывается по V и $T_{\text{сум}}$ для приведения линий к месту пуска секундомера и откладываются назад по курсу из ПМ.

Рациональный прием определения места по Солнцу. При разновременных определениях по высотам Солнца линии обычно обрабатываются отдельно — после первых и вторых наблюдений. При этом после вторых наблюдений требу-

ется около 20—25^м на их обработку и прокладку. Более рационально после первых наблюдений производить обработку сразу двух линий: первой — как обычно, второй — предвычислением, а также выполнить предварительную прокладку. Тогда после вторых наблюдений требуется только подправка второй линии и снятие координат, на что требуется около 2^м. При этом место получается точно на намеченное время, например смены вахты (12^ч, 16^ч). Вычисления выполняются между наблюдениями в более свободное время.

Рекомендуемый прием предполагает выполнение следующего:

время вторых наблюдений намечается произвольно из нужд плавания;

время первых наблюдений определяется вычитанием из T'_c выгодного промежутка ΔT , определяемого, как показано в § 77;

координаты второго счислимого места определяются после первых наблюдений по реальному промежутку ΔT и средней скорости судна, прокладкой на карте или расчетом по табл. 24 и 25 МТ—75.

При вычислении линий можно применять перемещенные места, но в этом приеме они заметной выгоды не дают, поэтому лучше обычный расчет по ВАС—58.

Пример 74. 11.05.85 в Тихом океане требуется определить место по Солнцу на $T_c = 12^h$. На это время приближенно $\varphi_c = 39^\circ N$, $\lambda_c = 128^\circ W$; $\lambda_2 = 8 W$. Применяем предвычисление второй линии.

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Кульминация Солнца:

T_M	$11^h 56^m$
λ_W	$8 \ 32$
$T_{гр}$	$20 \ 28$
λ_2	8
T_c	$12^h 28^m$
$\delta_{\odot}$	$\cong 18^\circ N$

1.2. Расчет интервала ΔT и времени первых наблюдений.

Задаемся $\Delta A = 40'$. Определяем t_2 в 12^h : $t_2 = 12^h 28^m - 12^h = 28^m E = 7' E$.

По таблицам ВАС—58 с $\varphi = 39^\circ$; $\delta = 18^\circ$, $t = 7'$ получаем: $A_2 = 162^\circ$; тогда $A_1 = 162^\circ - 40^\circ = 122^\circ$; в этой строке получает $t_1 = 29^\circ$.

Интервал $\Delta t = 29^\circ - 7^\circ = 22^\circ = 1^h 28^m$ или $\Delta T \approx 1^h 30^m$. Время $T'_c = T_c - \Delta T = 12^h - 1^h 30^m = 10^h 30^m$.

1.3. Получение поправок, пуск секундомера: $u_{хр} = +0^m 35^s$; $e = 15,5 \text{ м}$; $i = +0,9'$; $t = +20^\circ$; $B = 750$; $m_n \pm 0,6'$; $m_z \pm 0,5'$.

Пуск секундомера: $T''_{гр} = 18^h 25^m 00^s$; $T''_{хр} = 6^h 24^m 25^s$.

2. Первые наблюдения. Средние: $\lambda_2 =$

$56^\circ 38,1'$; $T_{зем} = 2^m 57^s$; $T_{г} = 10^h 28^m$; $\lambda_2 = 6,7$; $\varphi_c = 38^\circ 56' N$; $\lambda_c = 127^\circ 35' W$; $V_{ср} = 16,2$; $ПУ = 306^\circ$; $s_1 = -0,3'$.

3. Обработка первых и предвычисление вторых наблюдений. 3.1.

	Наблюдения	Предвычисления	
$T''_{гр}$	$18^h 25^m 00^s$	T_c	$12^h 00^m 00^s$
$T_{скм}$	$2 \ 57$	λ_2	8
$T'_{гр}$	$18^h 27^m 57^s$	$T'_{гр}$	$20^h 00^m 00^s$
t_T	$090 \ 55,2$		$120 \ 55,3$
Δt_1	$6 \ 58,8$		
Δt_2	$0,5$		
$t_{гр}$	$97 \ 54,5$		
$\lambda_{2,1}$	$127 \ 35,0$		$128 \ 01,2$
$t_M^{\odot}$	$29^\circ 40,5' E$		$7^\circ 5,9' E$
δ_T	$18^\circ 00,1' N$		$18^\circ 01',4' N$
$\Delta \delta$	$+0,3$		
$\delta_{\odot}$	$18^\circ 00,4' N$		

3.2. Расчет вторых координат

$\Delta T_{гр} = 1^h 32^m 57^s = 92,95^m$; $S = (V \ 60) \Delta T^m = 25,1'$. С карты или по ЭКВМ получаем:

$\varphi_c = 39^\circ 10,8' N$; $\lambda_c = 128^\circ 01,2' W$.

3.3. Расчет h_c и A_1

	$56^\circ 34,2'$	$120,3^\circ$
$\varphi = 39^\circ$	$-04,0'$	$+2,0$
$\delta = 18^\circ$	$+0,4'$	$-0,0$
$t = 30'$	$-19,5'$	$+13,1$
h'_c	$56^\circ 49,6' A_1$	$120,6^\circ NE$
	$68^\circ 08,2'$	$161,9^\circ$
$\varphi = 39^\circ + 10,8'$	$-10,3$	$+0,1$
$\delta = 18^\circ + 1,4'$	$+1,4$	$-0,0$
$t = 7^\circ + 5,9'$	$-1,4$	$-0,2$
h''_c	$67^\circ 57,9' A_2$	$161,8^\circ NE$

Выбрали $s_2 = -0,6'$.

3.4. Исправление высот:

$m_{\text{C}}^{(2)}$	$56^{\circ}38,1'$	Поправки
$i+s$	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$
d	$- 7,0$	$- 7,0$
h_j	$56^{\circ}31,7$	
Δh	$- 0,5$	$- 0,3$
R	$15,9$	$15,9$
h	$56^{\circ}47,1$	$\Sigma - \pm 8,9'$
h_{C}	$56^{\circ}49,6$	$h_{\text{C}}'' = 67^{\circ}57,9'$
n_1	$- 2,5'$	$\Sigma = - 8,9$
A_1	$120,6$	$h_{\text{np}} = 67^{\circ}49,0'$

T''_{rp}	20 ^h 00 ^m 00 ^s
u	0 35
T''_{xp}	7 ^h 59 ^m 25 ^s

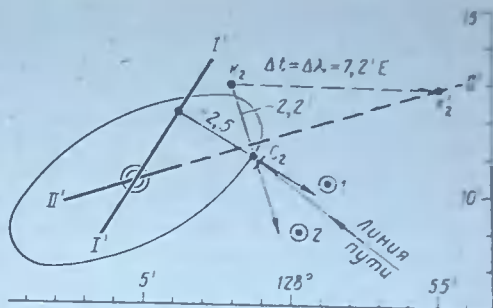


Рис. 150

Наблюдения α''	67° 46.8'	7 ^h _{хр}	75° 56' 54"
Предвычисления h''	67° 49.0'	7 ^h _{пр} хр	75° 54' 25"
После наблюдений	— 2.2'	ΔT	— 29"
	$\Delta \alpha$ $\Delta \lambda$		Равные 7.2.10

4. Прокладка второй линии (см. рис. 150),
результат обсервации.

4.1. Вторая линия из точки b_2 смещается к E на $7,2'$.

4.2. Ha $T_c = 12^h 00^m$, $a_2 = 31.8$; $q_0 = 39^\circ 10,2' N$; $\lambda_0 = 128^\circ 5,3' W$; $C = 260 - 3.3$

Для оценки точности строим эллипс (с утроенными осями — рис. 150).

3.5. Предварительная прокладка (рис. 150).

3.6. Схема записей предвычисленных величин вторых наблюдений и их обработки:

§ 82. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПО ЗВЕЗДАМ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ ТАБЛИЦАМИ «ПОДОБРАННЫХ ЗВЕЗД» (ТИПА НО-249)

Во время второй мировой войны в ряде стран были выпущены численные таблицы, в которых по φ , S_m и названию звезд приводились готовые значения h_c и A_c . Таким путем исключались выборы τ_* и δ_* из МАЕ, а при выборке высот и азимутов исключались поправки за склонение, и для перемещенного места сразу получались h_c и A_c без всяких поправок. Первоначально эти таблицы предназначались только для авиации, но их последующие издания распространялись и на флотах.

Таблицы подобранных звезд по сути дела представляют табличный астрогофик, иногда их называют «Таблицы-ежегодник», так как они в принципе не требуют применения МАЕ. Для расчета $S_{\text{гг}}$ к ним приложены постоянные эфемериды на ряд лет; однако практически

удобнее рассчитывать $S_{гр.}$ как обычно, — по МАЕ.

Устройство таблиц подобранных звезд. Рассмотрим таблицы НО-249, том I как наиболее распространенные. устройство других таблиц аналогично. Основания устройства таблиц несложны: по формулам $\sin h$ и $\operatorname{ctg} A$ (или другой системе формул), задаваясь через l^* значениями φ , $S_m = l_m + \alpha_*$ и склонениями определенных звезд, вычислены h_c и A_c (в таблицах обозначены H_c и Z_n) для семи звезд на каждый градус S_m (обозначенный $LHA\vee$).

Эти данные сведены в один том (том I) таблиц для широт от $89^{\circ}N$ до $89^{\circ}S$, причем каждый градус широты занимает развернутый лист — слева для S_m от 0 до 179° , справа от 180 до 360° (для широт свыше 69° — через $2^{\circ}S_m$). Всего ис-

LHA T	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn
	ARCTURUS		ANTARES		PEACOCK		ACHERNAR		CANOPUS		SUMAIL		REGULUS	
180	16 18 033		34 20 093		23 59 151		17 14 193		39 14 231		59 52 253		24 56 329	
181	16 58 032		35 00 082		24 18 151		17 05 193		38 43 231		59 13 252		24 35 328	
182	16 59 031		35 41 081		24 38 150		16 56 192							
183	17 19 030		36 21 090											
	ENIF		DIPHDA		ACHERNAR		MIAPLACIDUS		RIGIL KENT		ANTARES		ALTAIR	
315	31 26 012		36 08 076		48 54 130		27 40 181		38 08 218		33 44 267		31 06 340	
324	32 12 002		41 52 068		53 36 128		27 43 178		34 32 215		27 45 260		28 32 330	
325	32 13 001		42 29 067		54 08 128		27 44 177		34 09 215		27 05 260		28 11 329	
326	32 13 000		43 06 066		54 39 128		27 46 177		33 46 214		26 26 259		27 50 328	
327	32 12 359		43 43 065		55 11 127		27 48 177		33 24 214		25 47 258		27 28 327	
328											25 07 258			

Рис. 151

пользована 41 звезда; их названия приведены в колонках по собственным именам (рис. 151), например α Центавра — *Rigil Kent*. Для их расшифровки по координатам τ_* и δ_* на с. 3 таблиц приведена таблица, где звезды даны в алфавитном порядке и по τ_* .

Поправки за прецессию и нутацию. При расчете таблиц координаты звезд взяты на середину (или начало) какого-либо года, названную эпохой, поэтому без поправок таблицы пригодны только в год эпохи. На следующие 5 лет (обычно ± 5 лет) необходимо вводить поправки за изменение координат звезд (см. § 19). Учитываются только процессия и нутация, причем формулы (63) преобразованы так, что вместо изменения $\Delta\delta$ и $\Delta\alpha$ каждой звезды получаются сразу изменения места наблюдателя:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\delta = 0,33' \cos S_0 \Delta T + \Delta\delta_{\text{нут}}; \\ \Delta\lambda &= \Delta\alpha = (0,77' + 0,33' \operatorname{tg} \varphi_0 \sin S_0) \Delta T + \Delta\alpha_{\text{нут}}; \\ \Delta W &= \Delta\lambda \cos \varphi_0; \\ C_n &= \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta W^2}; \\ \operatorname{tg} A_n &= \frac{\Delta W}{\Delta\varphi}, \end{aligned} \right\} (279)$$

где S_0 — задается через 30° ;

φ_0 — через $10-20^\circ$;

ΔT — число лет от эпохи составления;

$\Delta\delta_{\text{нут}}$; $\Delta\alpha_{\text{нут}}$ — определяются по формулам (5) приложения 2.

Так получаются направление A_n и величина C_n смещения места наблюдателя на карте под действием процессии

и нутации. Эти величины сведены в табл. 5 в конце тома I НО-249 (с. 322). Эпоха, на которую составлены таблицы, указывается в заголовке таблиц, например «ЭПОХА 1980.0».

После прокладки линий и выбора места входят в табл. 5 с ближайшими φ_0 и S_0 , выбирают перемещение C_n , его направление A_n и смещают место на эти величины; получается obserванное место. Например, по $\varphi_0 = 50^\circ S$ и $S_n = 320^\circ$ на 1985 г. имеем $4' - 71^\circ$, и место M (рис. 152), полученное по координатам эпохи 1980 г., перемещается в M_0 на данный 1985 г. В таблицах не учитываются изменения координат от aberrации и другие, более мелкие факторы, вследствие чего точность линии ниже обычной.

Точность определения места с НО-249. При обработке наблюдений по этим таблицам появляются следующие дополнительные источники погрешностей:

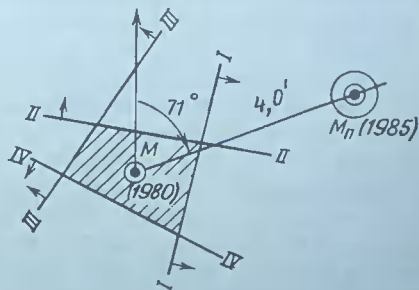


Рис. 152

погрешности от перемещения места $m_1 = \pm 0,5$;

погрешности от округления h до $1' m_2 = \pm 0,3'$;

погрешности от пренебрежения аберрацией и других неточностей в координатах $m_3 = \pm 0,3'$.

Следовательно, теоретически может ожидаться (с вероятностью 68 %) дополнительная ошибка в линии порядка $\pm 0,7'$. Экспериментальная проверка показала, что в среднем расхождение с ВАС—58 около $\pm 0,6'$, но в 50 % случаев расхождения менее $0,3'$, а расхождения в $1'$ крайне редки. Ошибка в линии в среднем увеличится с $m_n = \pm 0,6'$ до $m'_n = \pm 0,9'$. Учитывая, что с НО-249 обычно наблюдают четыре—шесть звезд, расхождения с ВАС—58 в месте практически незаметны (менее $0,5'$). Дополнительные погрешности должны учитываться при оценке точности полученного места увеличением радиальной ошибки. Следовательно, для контроля счисления в океане и открытом море эти таблицы вполне пригодны.

Достоинства и недостатки таблиц типа НО-249. Прежде всего следует отметить, что это единственные таблицы, данные которых помогают наблюдать и заменяют звездный глобус. Полученные h_c и A_c близки к действительным и позволяют отыскивать звезды через трубу секстана в гражданские сумерки, когда они простым глазом не видны. Обработка наблюдений по этим таблицам простейшая, промахи при выборках редки, а большое число наблюдаемых звезд позволяет выявить и исключить ошибочные линии и тем повысить надежность обсервации. Таблицам присущи и недостатки: неприменимость к планетам, Луне и Солнцу (для них нужны другие таблицы); количество звезд все же ограничено; наконец, точность таблиц ниже, чем при обычной обработке по ВАС—58.

Определение места с таблицами подобранных звезд. Можно применить три приема обработки с таблицами НО-249: общий случай с обработкой по схеме, аналогичной рассмотренной в § 81; определение с предвычислением высот; определение с работой «астробригады» (наблюдатель и обработчик).

В любом случае наблюдения производятся с секундомером в гражданские сумерки, а звезды отыскиваются по h и A .

Общий случай определения с НО-249. Время начала наблюдений рассчитывается, как обычно: на середину гражданских сумерек вечером и середину навигационных — утром с приближенными φ_c и λ_c на это время; точно так же рассчитывается t'_m (с $\lambda_c + 30'E$) и время пуска секундомера.

Подбор звезд производится с интервалом в $4^m = 1'$, т. е. для S''_n : $S''_n = 1'$, $+2'$ и т. д.

Для входа в НО-249 требуются φ и S''_n в целых градусах, поэтому применение перемещенного места (ПМ) обязательно, причем для λ_n применяется третий прием (см. § 80), т. е. шкала избытка ΔS сверх градуса (см. рис. 146). Чтобы меридиан λ_c был при прокладке в центре, а ПМ не смещался от него более чем на $\pm 30'$, в расчет S''_m вводится $\lambda_0 = \lambda_c + 30'E$; тогда прокладка $\Delta S'$ будет вестись от λ_0 всегда к W от $0'$ до $60'$. В момент пуска секундомера на λ_0 приходится целый градус S''_n , поэтому полученные при наблюдениях T_{-km} нужно перевести в $\Delta S''_{-k}$ (по МАЕ), градусы добавить к S''_n , по S'' выбрать h_c и A_c соответствующих звезд, а $\Delta S'$ отложить от λ_0 к W по параллели φ'' , получим ПМ, в которых S''_m равно целым градусам.

После приведения полученных ПМ к одному зениту (на момент пуска секун-

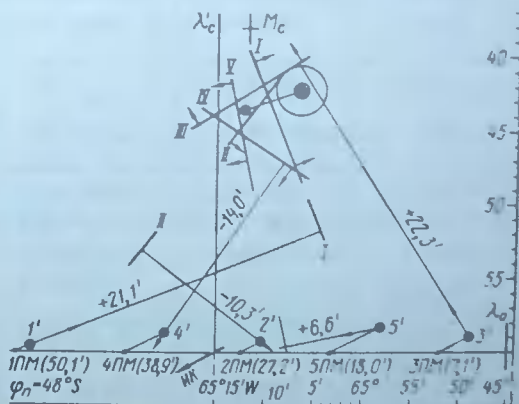


Рис. 153

домера) прокладкой назад по курсу на величину плавания, из них проклады-
вают азимуты и линии положения.

Пример 75. 10.05.85 в Атлантическом океане, следуя ГЛК 241° (— 1°), $V = 17$ уз, утром определить место по звездам. На $T_c = 6^h 40^m$ ($\lambda_0 = 4^W$) $\varphi' = 47^\circ 35' S$; $\lambda'_c = 65^\circ 15' W$. Применим таблицы типа НО-249 (на эпоху 1980.0).

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Время начала наблюдений:

T_m	$06^h 02^m$
λ	4 21
$T_{гр}$	10 23
$(\Delta T' / 2)$	+ 20
$T_{гр}^{нп}$	$10^h 43^m$

1.2. Звездное время:

$\lambda'_0 = \lambda'_c + 30' E = 64^\circ 45' W$	
t_T	$18^h 08,8'$
Δt	10 46,8
$t_{гр}^V$	28 55,6
λ_0	64 45
t_M^V	324 10,6
ΔS	— 10,6' — $42^c = \Delta T_S$
S_{II}^o	324

1.3. Время пуска секундомера:

$T_{гр}^{нп}$	$10^h 43^m 00^s$
ΔT_S	— 0 42
$T_{гр}^{п}$	10 42 18
$u_{гр}$	(— 45)
$T_{хр}^{п}$	$10^h 43^m 03^s$

1.4. Подбор звезд (см. схему):

$$\mu \text{ и } \eta_{II} = 48^\circ S$$

$$\text{и } S_{II} = 324, 325 \dots (\text{через } 4^m).$$

1.5. Поправки. пуск секундомера: $u_{гр} =$

$$= -0^m 45^s; i = +0,8'; e = 16,5 \text{ м}; t = -15$$

$$B = 770; s = -0,4'; -0,3'; +0,4'; +0,4'$$

$$-0,5' \text{ (по } h \text{ из табл. НО-249); } m = \pm 0,5'$$

$$m_{пм} = \pm 0,6'$$

Пуск секундомера в $T_{хр}^{п} = 10^h 43^m 03^s$:

$$T_c = 6^h 42^m; \mu = 47,5; \eta_c = 47^\circ 37,8' S;$$

$$\lambda_c = 65^\circ 12' W$$

2. Наблюдения: $T_{скм}$ и ΔS заносятся в схему обработки.

3. Подбор звезд, наблюдения, обработка:

$$\eta_{II} = 48^\circ S, S_{II}^o = 324$$

Звезды $h = ^\circ$; $A = ^\circ$	Дифда $11^\circ 52' 068''$	Ахериар $54^\circ 08' 128''$	Альтаир $27^\circ 50' 328''$	Риг. Кент. $33^\circ 21' 214''$	Антарес $25^\circ 07' 258''$
$T_{скм}$	$3^M 10^C$	$5^M 48^C$	$8^M 27^C$	$10^M 34^C$	$13^M 10^C$
$\Delta S = \Delta t^V$ S_M	$0^\circ 50,1'$ 324 [50,1]	$1^\circ 27,2'$ 325 [27,2]	$2^\circ 07,1'$ 326 [07,1]	$2^\circ 38,9'$ 326 [38,9]	$3^\circ 18,0'$ 327 [18,0]
oc	$42^\circ 20,2'$	$54^\circ 04,5'$	$28^\circ 19,7'$	$33^\circ 39,5'$	$26^\circ 01,5'$
$i + s - d$	— 6,0	— 6,1	— 6,0	— 6,0	— 5,9
$\Delta h_{\rho, t, B}$	— 1,1	— 0,7	— 1,5	— 1,5	— 2,0
h	42 13,1	53 57,7	28 12,3	33 32,0	25 53,6
$-h_c$	41 52	54 08	27 50	33 46	25 47
n	+ 21,1	— 10,3'	+ 22,3'	— 14,0'	+ 6,6'

Описание					
Звезды $h = \circ'; A = \circ$	Дифда $41'52'' 068''$	Ажернар $54'08'' 128''$	Альтанр $27'50'' 328''$	Рип, Кент $33'24'' 214''$	Атарас $15'07'' 258''$
$A_{кр}$	$68''$	$128''$	$328''$	$214''$	$258''$
Плавание	$- 0,9'$	$- 1,6'$	$- 2,4'$	$- 3,0'$	$- 3,7'$
Результат обсервации	$T_c = 6^h 42^m; \varphi_0 = 47^\circ 42,2' S; C = 140' - 5'5''; R = 2M = 1,5'$ $ол = 47,5; \lambda_0 = 65^\circ 07,0' W; m_n = \pm 0,8''; \Delta = -1'$				

4. Прокладка производится на карте или карте-сетке (рис. 153). Поправка места за прецессию и нутацию (табл. 5 в НО-249) $C_n; A_n = 4' - 71''$.

Применение предвычисления с таблицами НО-249. Если наблюдения выполнять, укладываясь в интервал 4^m , то выбранные при подборе (через $1^s S_m$) h_c и A_c звезд останутся при обработке теми же. Поэтому их можно заранее исправить поправками, взятыми с обратным знаком и получить предвычисленные высоты $h^{пр} = h_c - \Delta h$, где $\Delta h = i + s - d - \rho + \Delta h_{i,в}$. Для приведения высот к одному зениту в точке φ_n, λ_c проводится линия пути и по ней откладываются «назад» плавания за 2, 4, 6^м и т. д. При обработке нужные отрезки переносятся параллельно в ПМ. После наблюдений $T_{скм}$ переводится в $\Delta S'$, откладывается от λ_0 к W , ПМ приводятся к зениту пуска, образуются $n = oc - h_{пр}$ и прокладываются, как показано выше в общем случае. В этом

приеме схема вычислений (аналогичная примеру 75) содержит всего 10 строк.

Определение с работой «астрономической бригады» (наблюдателя и обработчика). Предварительно выполняются все вычисления и подбор звезд, как показано выше. В случае, если есть возможность работать двоим руководителям, они разделяются на «наблюдателя» и «обработчика».

Более опытный штурман наблюдает, второй, находясь у карты, фиксирует (по команде «товсь — ноль») $T_{скм}$ и сообщаемый аз. Пока наблюдатель переключается на следующую звезду, обработчик получает по МАЕ ΔS и откладывает его по параллели φ_n к W от λ_0 , приводит к зениту, образует $n = oc - h^{пр}$ и прокладывает линию положения. По очередной команде «ноль» снова фиксирует $T_{скм}$ и oc_2 следующей звезды и так для пяти звезд (одна для контроля). Если обработчик натренирован, то к концу наблюдений место по пяти звездам уже находится на карте.

Примечание. Прокладку можно производить на планшете (типа М-63) или на специальном приборе «Астроплот», выпускаемом иностранными фирмами, таким путем прокладка несколько ускоряется.

§ 83. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И МАШИН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОРЕХОДНОЙ АСТРОНОМИИ

При решении основных задач астронавигации (определение места на карте и определение поправки компаса) выполняются следующие основные операции (табл. 14).

Выполнение всех операций и составляет решение астрономической задачи, а не только вычисление h_c и A_c , как иногда считают. Наиболее трудоемки, примерно в равной степени, операции 1, 3, 5, 7, 8. Обзор приборов и машин для решения задач мореходной астрономии произведем с точки зрения охватываемых операций и сокращения вре-

мени и вычислительного труда при этом.

Вычислительные приборы для получения h и A . В XIX и XX вв. было создано много приборов для вычисления высоты и азимута, которые можно подразделить по следующим принципам решения.

Моделирование небесной сферы или систем координат. Приборы представляют сферу или системы точно разделенных координатных кругов, например машина Виллса, определитель Хегнера и т. п. Эти приборы не ускоряют вычис-

Таблица 14

№ п/п	Операции
1	Выбор времени наблюдений [(103), (74), (83)]; подбор светил для создания выгодных условий
2	Проверка приборов, получение поправок i_{xp} [(122)], i [(134)], s , $e(d)$, t , B
3	Наблюдения секстаном или пеленгатором с регистрацией моментов: os , T_{xp} , $KП$, m
4	Получение навигационной информации: T_c , ol , φ_c , λ_c , $ПУ$, V , погрешности счисления
5	Получение координат светил δ , t , t_m по $T_{ГР}$ и дате [(112), (1)–(22), приложение 2]
6	Исправление высот светил поправками [(164), (157), (144), (149), (150), (153), (174), (175) и др.]
7	Вычисление A_c , h_c , n , ΔK [(280), (282), (226), (185)]
8	Прокладка линий, выбор места, получение φ_0 , λ_0 или аналитический расчет φ_0 , λ_0 [(247), (248), (250) или (263), (268)–(270)]
9	Анализ погрешностей, решение о надежности места, ΔK , оценка точности [(230), (231), (239), (253), (260)]
10	Итоги обсервации: использование полученной навигационной информации [265]

Примечание. В скобках даны номера формул в курсе, по которым можно составлять варианты данной операции

ления, точность же их ниже, чем у таблиц.

Графические изображения сферы или систем координат. В основе приборов лежат координатные сетки в различных проекциях, например выпускаемый до сих пор в ГДР прибор ARG-3 с оптическим увеличением сеток; он дает точность около 0,5', решение занимает 4–5", т. е. почти равноценно таблицам.

Решение формул $\sin h$ и $\text{ctg } A$ по номограммам. Выпускались различные номограммы: Вейра для A , S-номограмма для h и A и др. Иногда они входили в состав прибора; теперь почти не применяются.

Решение формул $\sin h$, $\sin A$, $\text{ctg } A$ с помощью приборов, основанных на математическом или физическом моделировании. В 20-х годах применялось шкальное моделирование, например цилиндрическая линейка Байгрева со шкала-

ми $\lg \tg \alpha$ и $\lg \sec \alpha$ для вычисления h и A по формулам (13); она давала точность 0,5'–0,7', время вычислений — 5". Позже в литературе упоминались электрические аналоговые машины, но для h и A они себя не оправдали. Решение по этим формулам на ЭКВМ рассмотрено ниже.

Анализ опыта применения вычислительных приборов на судах показывает, что отдельное вычисление h и A на любой машине (в том числе ЭКВМ) или приборе не имеет преимуществ перед табличными решениями. Выгода появляется только при серийном решении или при выполнении ряда операций, упомянутых в табл. 14.

Вычисление h и A на микрокалькуляторах. Решение на ЭКВМ выгоднее начинать с A , а затем уже получать h , так как такая программа пригодна как для линий положения, так и для поправки компаса (A). Величины t_m и δ предварительно получают по МАЕ (или по подпрограмме), φ снимается с карты. Для вычисления A применяется формула для $\text{ctg } A$ в виде:

$$A' = \arctg \left[\frac{\sin t}{(\tg \delta \tg \varphi - \cos t) \sin \varphi} \right]. \quad (280)$$

Для вычисления h на ЭКВМ с ограниченным числом ячеек памяти выгоднее применять формулу:

$$h = \arccos \left(\frac{\sin t \cos \delta}{\sin A} \right). \quad (281)$$

Для ЭКВМ со сравнительно большим числом ячеек памяти лучше применить общую формулу $\sin h$ в виде:

$$h = \arcsin [(\tg \varphi \tg \delta + \cos t) \cos \varphi \cos \delta]. \quad (282)$$

По формуле (280) A' получается в четвертном счете. При наличии достаточного числа ячеек памяти (например, на ЭКВМ БЗ-34) можно получить круговой счет, для чего в программу необходимо ввести следующее исследование: $A' \geq 0$, если «да», то $A''_{кр} = A'$, если «нет», то $A''_{кр} = 180^\circ - A'$; $\sin t \geq 0$, если «да», то $A_{кр} = A''_{кр}$, если «нет», то $A_{кр} = 180^\circ - A''_{кр}$.

Для формул (280)–(282) в ЭКВМ надо применять следующие правила знаков:

φ и δ нордовым приписывается знак «+» (он не набирается);

φ и δ зюйдовым приписывается знак «—» [клавишей (—) — смены знака];

часовому углу востовому всегда приписывается знак «—» (той же клавишей смены знака); t_m можно набирать как в круговом счете, так и в практическом, т. е. меньше 180° , в этом случае t_E имеет знак «+».

Вычисление A и h на ЭКВМ «Электроника БЗ-34». При составлении программы применяем формулы (280) и (282) с

исследованием и получением $A_{кр}$ и переводом десятых градуса h в минуты (первые две цифры после запятой) и их доли.

1. Составление программы.

1.1. Перейти в режим программирования нажатием клавиш «В О», «F», «ПРГ».

2. Набор программы.

2.1. Распределение памяти.

Ячейка регистра	A	B	C	0	4	5	6	7	8	9
Вход	φ	δ	t	180°	10/6					
Выход						$\lg \delta$	$\lg \varphi$	$\cos t$	$\sin t$	h°

2.2. Программа:

Адрес	Клавиши	Примечание	Адрес	Клавиши	Примечание	Адрес	Клавиши	Примечание
1	2	3	1	5	6	7	8	9
00	«ИП», «В»	δ	19	«F», «arc tg»	A'	38	«+»	
01	«F», tg»		20	«F», $x < 0$		9	«ИП», «A»	
02	«П», «5»	$\lg \delta$	1	«24»		40	«F», «cos»	
03	«ИП», «A»	φ	2	«ИП», «0»		1	«X»	
04	«F», tg»		3	«+»		2	«ИП», «В»	
05	«П», «6»	$\lg \varphi$	4	«ИП», «8»		3	«F», «cos»	
06	«÷»		5	«F», $x < 0$		4	«X»	
07	«ИП», «C»		6	«32»		5	«F», «arc sin»	
08	«F», cos		7	«±»		6	«П», «9»	
09	«П», «7»	$\cos t$	8	«ИП», «0»		7	«K», «ИП», «9»	h°
10	«—»		9	«+»		8	«±»	
11	«ИП», «A»		30	«БП»		9	«ИП», «9»	
12	«F», sin		1	«33»		50	«—»	
13	«X»		2	«±»		1	«ИП», «4»	
14	«ИП», «C»		3	«C/П»	$A_{кр}^0$	2	«÷»	
15	«F», sin		4	«ИП», «5»		3	«ИП», «9»	
16	«П», «8»		5	«ИП», «6»		4	«+»	
17	«±»		6	«X»		55	«C/П»	$h^{0.1}$
18	«÷»		37	«ИП», «7»				

3. Решение по программе.

3.1. Перейти в режим «автоматическая работа» нажатием клавиш «F», «АВТ».

3.2. Записать в регистры памяти исходные данные φ , δ , t по схеме:

$$\Delta \varphi', \uparrow, 60, \div, \varphi^\circ, +$$

(и |—|, если φ_S), П, А.

Аналогично для δ (В) и t (С). Записать в «П», «4» величину 10/6 (для перевода долей градуса в минуты) и в «П, 0» записать 180.

3.3. Пустить машину клавишами «В О», «С П».

3.4. Прочесть на индикаторе $A_{кр}$ и записать. Нажать клавишу «С П». Прочесть на индикаторе $h^{0.1}$.

3.5. Если вычисляется вторая линия (при той же φ_c), то нажать «В О», ввести новые значения δ и t и снова пустить нажатием «С П»; получим вторые A_c и h_c и т. д.

3.6. Программа сохраняется, пока ЭКВМ включена.

Пример 76. По данным примера 72 рассчитать A и h Луны, $\varphi_c = 27^\circ 40' S$, $\delta = 15^\circ 20,2' S$, $t = 54^\circ 9,6' W$; а затем A и h Солнца: $\delta = 18^\circ 14,0' N$; $t = 17^\circ 49,5' E$.

Решение.

В режиме «F», АВТ» набираем:

- а) $40'$, $\uparrow$, 60 , $\div$, 27° , $+$, $(-)$, П, А;
 б) $20,2'$, $\uparrow$, 60 , $\div$, 15° , $+$, $(-)$, П, В;
 в) $9,6$, $\uparrow$, 60 , $\div$, 54° , $+$, $(-)$, П, С;
 г) 180 , П, 0; 10 , $\uparrow$, 6 , $\div$, П, 4;

д) пустить машину нажатием клавишей «В О», «С П»; прочесть $A_c = 272,047$. Записать $272,0$; нажать клавишу «С П», прочесть $h = 38,3178$... или $h_c = 38^\circ 31,8'$.

е) ввести данные для Солнца:

$14'$, $\uparrow$, 60 , $\div$, 18° , $+$, П, В;
 $49,5$, $\uparrow$, 60 , $\div$, 17° , $+$, П, С; С П; $A_c =$
 $= 22,64^\circ$;
 С П; $h_c = 40,576$... $= 40^\circ 57,6'$.

Вычисление φ и λ места или элементов ВЛП на микрокалькуляторах. На программируемых микрокалькуляторах со значительным числом ячеек памяти (более 12—14) можно решать и более полные задачи.

Так, возможно аналитическое решение задачи двух высот, т. е. определение φ и λ по h , t , δ двух светил; можно рассчитывать элементы ВЛП для определения по звездам, но не полностью, а в той или иной степени «машинизации». Остановимся на одном варианте, решаемом с ЭКВМ «Электроника—БЗ-34».

Вычисление переносов и азимутов звезд (до четырех)¹. Предполагается смешанное решение с вычислением $T_{гр}$ начала наблюдений, S_m^c по МАЕ (для наблюдений с секундомером, см. § 81), выбором t_* и δ_* также из МАЕ, частичным исправлением высот $[(i + s + (-d))]$, затем основным решением по ЭКВМ и, наконец, «ручной» прокладкой полученных переносов и азимутов анализом и получением φ_0 и λ_0 .

Для вычисления A_c и h_c применены формулы (280), (281); для исправления высот — формула (165) (без Δh_i), в ней Δh_p вычисляется по формуле (144).

Δh_z по формуле (175), после чего $h = h + \Delta h_z - h_c$.

Для вычисления t_* применена новая формула:

$$t_* = S_m^c + t_* + 0,250684 \Delta T^* \quad (283)$$

где S_m^c — звездное время на момент пуска секундомера, вычисленное по МАЕ (см. пример 73, но с вводом L_c);

ΔT^* — показания секундомера в * и из долях при наблюдении φ .

Это решение интересно как реализация на ЭКВМ «рационального» приема определения по звездам из § 81 в «смешанном» решении. Программа, составленная по этим формулам (около 50 шагов), приедена в указанной статье.

Возможно еще множество других решений этих задач, но ни одно из них на подобных калькуляторах не имеет преимуществ по времени и простоте перед табличным методом. Только при массовых решениях (более двух-трех задач подряд) без выключения ЭКВМ получим заметную экономию труда и времени.

Вычислительные машины, выполняющие ряд операций. Современный уровень техники позволяет выполнить 1, 4, 5, 6, 7, 8 и 9-ю операции, перечисленные в табл. 14, не только на больших ЭВМ (входящих, например, в навигационные комплексы), но и на настольных клавишных ЭВМ со сменными программами и на специальных навигационных ЭВМ с постоянными программами. Вместе с тем следует подчеркнуть трудность и нерентабельность для морского флота полной автоматизации решения астрономических задач, т. е. выполнения всего перечня операций табл. 14. Наблюдения секстаном и пеленгатором следует оставить штурману, обеспечив дистанционный ввод этих наблюдений в ЭВМ. По-видимому, в ближайшем будущем за штурманом останутся операции 2, 3, 10-я и контроль за надежностью обсервации.

Математические основы решения задач астронавигации на ЭВМ. В машинном решении нуждаются 1, 5, 6, 7, 8, 9-я операции табл. 14, т. е. выбор времени наблюдений; подбор светил; вычисление эфемерид светил; исправление

¹ Мишик Н. А., Халеев О. Г., Применение программируемого калькулятора «БЗ-34» при определении места по звездам. Экспресс-информация «Морской транспорт», сер. «Судоходство и связь», вып. 8/63, М., ЦБНТИ ММФ, 1983.

высот; вычисление A , h , ΔK , n ; выбор места и получение φ_0 , λ_0 ; анализ обсервации и оценка точности. Составление алгоритмов этих операций и представляет математические основы решения задач астронавигации. В настоящее время почти все операции имеют простые и достаточно точные алгоритмы, только выбор времени наблюдений, подбор светил и анализ обсервации разработаны недостаточно или находятся в стадии разработки. Формулы, по которым можно

составить программы, выведенные в соответствующих разделах курса и их номера приведены в табл. 14. Вычисление видимых координат звезд и Солнца можно достаточно точно и наиболее просто произвести по формулам, приведенным в приложении 2. В морском флоте сейчас распространяются программы для ЭВМ «Искра» и «Электроника 60», для операций с 5-й по 9-ю (Солнце и звезды), при применении которых астронавигационная обсервация потребует всего 5—10 мин.

Глава 20. ЧАСТНЫЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МЕСТА СУДНА

§ 84. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ МЕСТА ПО МЕРИДИОНАЛЬНОЙ И НАИБОЛЬШЕЙ ВЫСОТАМ СОЛНЦА

Раздельное получение координат φ и δ места наблюдателя по высотам светил с достаточной точностью возможно только в частных положениях светила (см. § 65). Широту следует определять по светилу на меридиане ($A = 180^\circ$; 0°), а долготу — по светилу на первом вертикале ($A = 90^\circ$; 270°). До открытия метода высотных линий координаты места в море определялись раздельно. В настоящее время значение аналитических приемов определения координат уменьшилось, но в силу традиций и вследствие простоты обработки наблюдений сохранилось несколько способов получения широты места в море.

Определение широты по меридиональной высоте светила. Если светило находится в верхней кульминации (рис. 154), то его высота является меридиональной H , азимут $A = 180^\circ$ (0°), $t_m = 0$. Уравнение круга равных высот (209), т. е. формула $\sin h$, примет вид:

$$\sin H = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos 0^\circ$$

или

$$\sin H = \cos (\varphi - \delta).$$

Так как $H = 90^\circ - Z$, то $\sin H = \cos Z = \cos (\varphi - \delta)$ и для аргументов в первой четверти

$$Z = \varphi - \delta,$$

откуда

$$\varphi = Z + \delta.$$

Эта формула применяется для определения φ в момент верхней кульминации светила, причем δ имеет знак «+» при одноименных φ и δ и знак «-» — при разноименных.

Напомним, что наименование Z обратнo H , а H одноименно с точкой горизонта (N или S), над которой измеряется высота. Наименование широты получается одинаковым с наименованием большего члена формулы. В общем виде получим

$$\varphi = Z \pm \delta. \quad (284)$$

Формулу (284) для разных положений светил можно получить и по сфере (см. рис. 154). Для светила C_1 , у которого δ одноименно с φ , имеем:

$$Z_1 = 90^\circ - H_1 \text{ и } \varphi = Z_1 + \delta_1.$$

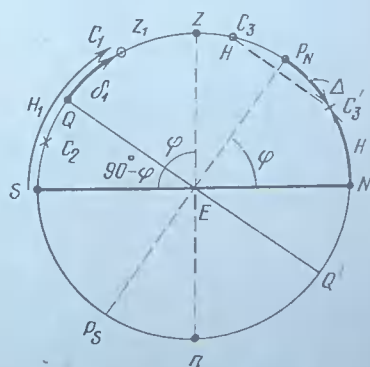


Рис. 154

Для светила C_2 , у которого δ равно-
именно с φ , имеем:

$$\varphi = Z_2 - \delta_2.$$

Для светила C_3 , у которого δ одно-
именно с φ и больше ее, имеем

$$\varphi = \delta_3 - Z_3.$$

Для нижней кульминации светила
 C_3 получим

$$\varphi = H - \Delta. \quad (285)$$

где Δ — полярное расстояние светила, рав-
ное $90^\circ - \delta$.

Практически метод определения φ
по H применяется теперь только к Солн-
цу. В формулах (284) и (285) применя-
ется высота светила H на меридиане
наблюдателя.

Наибольшая высота. В море высоту
 H можно получить только как наи-
большую из высот, измеряемых около
кульминации; в формуле (285) — на-
именьшую. Однако движение светила
происходит симметрично меридиану
только для неподвижного наблюдателя
и при условии, что его склонение по-
стоянно. На ходу судна и при измерении
высот Солнца, Луны и планет, т. е. све-
тил с непостоянным δ , наибольшая вы-
сота не совпадает с меридиональной, и
в формулу (284) надо ввести поправку
широты из табл. 19 МТ—75. Это проис-
ходит потому, что при движении наблю-
дателя, положим, к светилу его гори-
зонт непрерывно наклоняется (рис. 155)
на величину, которую мы выражаем по-
правкой Δh_z . Вследствие этого высота
светила увеличивается. Положим, что

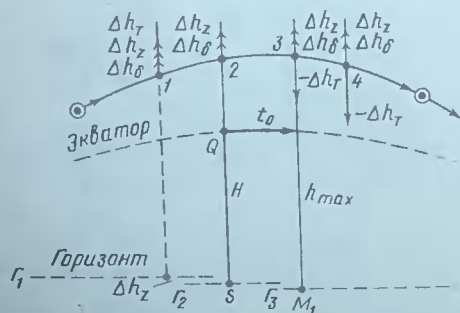


Рис. 155

склонение светила одноименно с φ , и
также увеличивается, этот приводит к
увеличению высоты на Δh_z . Оба при-
ращения накладываются на основное
приращение вследствие суточного дви-
жения светила Δh_t . До кульминации
светила (в точке 1) все три приращения
складываются, и его высота быстро воз-
растает. В момент кульминации (в то-
чке 2) $\Delta h_t = 0$, но Δh_z и Δh_δ продолжа-
ют увеличивать высоту светила до то-
чки 3, где $(\Delta h_z + \Delta h_\delta) - \Delta h_t = 0$, и
высота перестанет возрастать. Эта наи-
большая высота h_{max} получается в море
в результате непрерывного слежения за
высотой. Как только изменение $-\Delta h_t$
превысит $(\Delta h_z + \Delta h_\delta)$, высота начнет
убывать (точка 4); при этом h_{max} ока-
зывается после кульминации при часовом
угле t_0 .

Если Δh_z и Δh_δ уменьшают высоту,
то наибольшая высота будет до кульми-
нации; при разных знаках преоблада-
ет большая величина; обычно движение
судна (Δh_z) сказывается больше. Для
звезд $\Delta h_\delta = 0$, но для Солнца и осо-
бенно Луны оно может быть большим.
Следовательно, принятый в море метод
измерения меридиональных высот дает
наибольшую, а не меридиональную вы-
соту.

Вывод формулы для часового угла t_0
в момент наибольшей высоты. В момент
верхней кульминации $t_M = 0$ (точка Q
на рис. 155); для момента же максимал-
ной высоты h_{max} имеем $t_M = t_0$. Очеви-
дно, для его отыскания надо определить
максимум функции $f(h)$. Найдем экстре-
мальное значение функции $\sin h =$
 $= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_M$,
дифференцируя ее по всем переменным
и времени:

$$\begin{aligned} \cos h \frac{\partial h}{\partial T} &= (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t_M) \times \\ &\times \frac{\partial \varphi}{\partial T} + (\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos t_M) \frac{\partial \delta}{\partial T} - \\ &- \cos \varphi \cos \delta \sin t_M \frac{\partial t_M}{\partial T}. \end{aligned}$$

Приравнявая это выражение нулю
(по правилам отыскания максимума),
обозначив для этого момента $t_M = t_0$
и учитывая, что $\cos t_0 = 1$, $\sin t_0 =$

$t'_0 \operatorname{arc} 1'$ (с точностью до 0,1'), получим

$$\begin{aligned} & (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cdot 1) \frac{\partial \varphi}{\partial T} + \\ & (\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cdot 1) \frac{\partial \delta}{\partial T} = \\ & = \cos \varphi \cos \delta t'_0 \operatorname{arc} 1' \frac{\partial t_M}{\partial T} \end{aligned}$$

Переменив знаки в первых скобках, вынесем общий множитель, равный вторым скобкам, после чего определим неизвестное t'_0 :

$$\begin{aligned} t'_0 &= \\ &= \frac{(\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta) \left(\frac{\partial \delta}{\partial T} - \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right)}{\cos \varphi \cos \delta \operatorname{arc} 1' \frac{\partial t_M}{\partial T}} = \\ &= (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \delta) \left(\frac{\partial \delta}{\partial T} - \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right) \frac{1}{\operatorname{arc} 1' \frac{\partial t_M}{\partial T}} \quad (*) \end{aligned}$$

Производные $\frac{\partial \delta}{\partial T}$ и $\frac{\partial \varphi}{\partial T}$ равны скоростям изменения склонения и широты в данный момент; практически их можно получить как изменения $\Delta \delta$ и $\Delta \varphi$ за данный час. Обозначим их $\frac{\Delta}{1^h}$ и $\frac{\Psi}{1^h}$ или, в градусных минутах, $\frac{\Delta'}{900'}$ и $\frac{\Psi'}{900'}$.

Производная $\frac{\partial t_M}{\partial T}$ получится дифференцированием $t_M = t_{\text{гр}} \pm \lambda_{\text{W}}^E$, где $t_{\text{гр}}$ выражается формулой (96). Пренебрегая $\Delta \alpha_{\odot} - \Delta \alpha_{\ominus}$ за 1^h и обозначая через $\frac{\Delta \lambda'}{900'}$ изменение долготы за 1^h , получим

$$\frac{\partial t_M}{\partial T} = 1 \pm \frac{\Delta \lambda_{\text{W}}^E}{900'}$$

Подставляя полученные значения производных и $\operatorname{arc} 1' = \frac{1}{3438}$ (в формулу (*)) и учитывая перемену знака при переносе $\Delta \lambda$ в числитель, получим окончательно

$$t'_0 = 3,82 (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \delta) (\Delta - \Psi) \left(1 \mp \frac{\Delta \lambda_{\text{W}}^E}{900'} \right) \quad (286)$$

Пренебрегая в этой формуле величиной $\frac{\Delta \lambda'}{900'}$, так как в широтах до 70° ее влияние при современных скоростях мало замети, получим рабочую формулу, в

которой приближенное значение t'_0 обозначим τ :

$$\tau = 3,82 (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \delta) (\Delta - \Psi) \quad (287)$$

В этой формуле знак $\operatorname{tg} \delta$ определяется как обычно при исследовании, поэтому в первых скобках при одноименных φ и δ будет «—», при разноименных «+». Правила знаков Δ и Ψ , приведенные в пояснениях к табл. 19 МТ—75, следующие: Δ — часовое изменение склонения из МАЕ — имеет знак «—», если светило приближается к повышенному полюсу; Ψ — часовое изменение широты (РШ), снятое с карты, имеет знак «—», если судно приближается к ближайшему полюсу, т. е. если РШ одноименна с широтой; в обратных случаях знак будет «+».

В результате вычислений получаем $\pm \tau$; знак «+» означает, что h_{max} была после кульминации, а знак «—» — до кульминации.

Вычисления по формуле (287) рекомендуется выполнять с ЭКВМ или с логарифмической линейкой и табл. 6-а МТ—75. Величина τ применяется на практике для определения долготы в способе соответствующих высот.

Пример 77. 5.10.85 в $\varphi_{\text{с}} = 71^\circ 20' N$, следуя $IK = 5^\circ$; $V = 18$ уз, наблюдали Солнце. Определить τ — расхождение моментов кульминации и h_{max} .

Решение.

1. Из МАЕ имеем $\delta_{\odot} = 4^\circ 49' S$; $\Delta = -1,0'$ (светило удаляется от повышенного P_N).

2. С карты: РШ за $1^h = \Psi = +17,8'$ (РШ можно получить из табл. 24 МТ—75).

3. $\varphi = 71^\circ 20' N$	$\operatorname{tg} \varphi$	2,96
$\delta = 4^\circ 49' S$	$(-\operatorname{tg} \delta)$	0,08
	$1'$	$+3,04$
	$I = 3,82 \cdot 3,04 =$	$+11,6$

4. $\Delta = -1,0$

$\Psi = (+17,8)$

$II = -18,9'$

5. По ЭКВМ или по логарифмической линейке получаем $\tau = 1 \cdot 11 = (+11,6) \times (-18,9) = -219,5 = -3^\circ 39,5' = -14^\circ 38'$.

Следовательно, наибольшая высота была за $14^\circ 38'$ до кульминации, азимут Солнца при этом был 176° (таблицы ВАС—58).

Определение широты по наибольшей высоте Солнца. Меридиональная высота H в данной точке Земли всегда больше высоты около меридиана, поэтому $h_{\max}$ для данной точки меньше ее H , и для приведения этой близмеридиональной высоты на меридиан в этой же точке с постоянными φ и δ следует к $h_{\max}$ добавить редукцию r , т. е. $H = h_{\max} + r$. Но $Z = 90^\circ - H$, поэтому редукция в виде поправки $\Delta\varphi$ широты вычитается из φ' , полученной по формуле (284), т. е.

$$\varphi_0 = \varphi' + (-\Delta\varphi). \quad (288)$$

В случаях, когда одноименное $\delta > \varphi$, поправка $\Delta\varphi$ имеет знак «+». Поправка $\Delta\varphi$ получается, если t подставить в формулу редукции [9, с. 485]. После преобразований получаем

$$\Delta\varphi = (tg \varphi' - tg \delta) \left(\frac{\Delta - \psi}{21,7} \right)^2. \quad (289)$$

По этой формуле составлена табл. 19 МТ—75, в которую надо входить с $I' = tg \varphi' - tg \delta$ и $II = \Delta - \psi$. Например, по данным примера 78 имеем: $I' = 3,04$ и $II = 18,9$; из табл. 19 после интерполяции имеем $\Delta\varphi = 2,3'$. Как видим, широта, полученная по формуле (284) без учета поправки $\Delta\varphi$, может содержать значительную ошибку. Поправкой $\Delta\varphi$ при определении φ по Солнцу можно пренебрегать в широтах до $35-40^\circ$ при скоростях судов до 18 уз. В высоких широтах и курсах, близких к N и S , эта поправка может быть большой.

Пример 78. 10.05.85 в Тихом океане, следуя $IK = 310^\circ$, $V = 17$ уз, определить φ по наибольшей высоте Солнца.

Решение. На полдень снимаем $\lambda_c = 145^\circ 20' E$; ($\lambda_c = -9$).

а) кульминация Солнца:

T_M	11 ^h 56 ^m
λ	9 41
$T_{ГР}$	2 15 10.05
λ^0	9
T_c	11 ^h 15 ^m

б) наблюдения:

$$T_c = 11^h 16^m; \alpha = 3.2;$$

$$\varphi_c = 33^\circ 31.5' N;$$

$$\alpha_{\odot} = 73^\circ 49.4' S; T_{\text{хр}} = 2^h 14^m 57^s;$$

$$i = -0,5';$$

$$s = +0,2'; u_{\text{хр}} = -0^m 46^s;$$

$$e = 9,8 \text{ м};$$

в)

$T_{\text{хр}}$	2 ^h 14 ^m 57 ^s
$u_{\text{хр}}$	0 46
$T_{\text{ГР}}$	2 ^h 15 ^m 43 ^s
δ_{Γ}	17° 34.3' (0,7)
$\Delta\delta$	0.2
$\delta_{\odot}$	17° 34.5' N

г)

$\alpha_{\odot}^{\max}$	73° 49.4' S
$i + s$	- 0.3
d	- 5.5
h_b	73 43.6
Δh	15.6
$h_{\max}$	73 59.2 S
Z	16 00.8 N
δ	17 34.5 N
φ'	33° 35.3' N

д) проверяем величину $\Delta\varphi$: $I' = 0,38$

$$\begin{aligned} \Delta &= +0,7' \\ \psi &= -12,2' \\ II &= -12,9' \end{aligned}$$

Из табл. 19 $\Delta\varphi = 0,1'$; $\varphi_0 = \varphi' + (-\Delta\varphi) = 33^\circ 35,2' N$. (Величиной $0,1'$ можно пренебречь).

Высота полюса мира над горизонтом равна широте места, поэтому если бы в каждом из полюсов мира находилось по звезде, то стоило бы только измерить высоту такой звезды и исправить ее поправками, чтобы получить широту места.

В самих полюсах звезд нет, но недалеко от северного полюса находится довольно яркая звезда α Малой Медведицы, называемая за свое близкое расположение к полюсу Полярной звездой. Для Полярной на 1985 г. $\Delta = 48'$, поэтому суточным движением она описывает параллель со сферическим радиусом меньше 1° (рис. 156). Вследствие того азимут Полярной всегда близок к 0° (см. § 61) и она расположена всегда в выгодных условиях для определения φ . По этой же причине высота Полярной всегда близка к широте и может отличаться от последней лишь на небольшую величину x . Задача определения φ по высоте Полярной сводится к нахождению этой поправки x , равной разности между высотой Полярной в данный момент и широтой места.

В точке a параллели $x = -\Delta$; в противоположной точке $a_1x = +\Delta$; в точках p и p_1 , лежащих на альмукантарате полюса, $x = 0$. Из рис. 156 видно, что для промежуточных точек C или C_1 получим

$$\varphi = h \pm x, \quad (290)$$

Из треугольника P_NDC , принятого за плоский, получим приближенно:

$$x = \Delta \cos t_M.$$

Чтобы получить знак x , в эту формулу вводим «—» и заменяем t_M по формуле (71), т. е. $t_M = S_M + \tau_*$. Получим

$$x = -\Delta \cos (S_M + \tau_*). \quad (291)$$

Точную формулу для x , учитывающую сферичность треугольника, придем без вывода [9, с. 488]:

$$x = -\Delta_0 \cos (S_M + \tau_0) + \frac{\Delta_0^2}{2} \sin^2 (S_M + \tau_0) \operatorname{tg} h \operatorname{arc} 1' + + [\Delta_0 \cos (S_M + \tau_0) - \Delta \cos (S_M + \tau_*)]. \quad (292)$$

Значения τ и Δ Полярной довольно быстро изменяются, поэтому таблицы для x помещены в МАЕ.

По этой формуле, в которой Δ_0 и τ_0 — среднегодовые значения координат Полярной, в МАЕ на каждый год составлена таблица, озаглавленная «Широта по высоте Полярной» (табл. I—III, с. 277—280). Первая основная поправка I приводится по аргументу S_M , данному через $30'$; поправка II за сферичность треугольника приводится по h и S_M ; изменение поправки в течение года учитывается в поправке III, приводимой в МАЕ по S_M и дате. Широта получится добавлением к высоте этих поправок с их знаками:

$$\varphi_0 = h + I + II + III. \quad (293)$$

До широт 50° параллель φ_0 можно принимать за линию положения.

Определение φ по Полярной можно выполнять в северных широтах от 5° до 70° в сумерки и ночью при видимом горизонте. Однако при наличии более ярких звезд, видимых над более четким горизонтом, следует предпочесть обычный способ высотных линий. Действие ошибок наблюдений на параллель φ_0 , или линию положения, аналогично рассмотренному выше для высотной линии, т. е. действительная параллель находится внутри полосы шириной $\pm m_\varphi$.

Пример 79. 10.05.85 в Тихом океане, следуя $IK = 282^\circ$, $V = 17$ уз, предполагаем определить по звездам в вечерине сумерки одна звезда — Полярная. Получить φ_0 и ВЛП по Полярной.

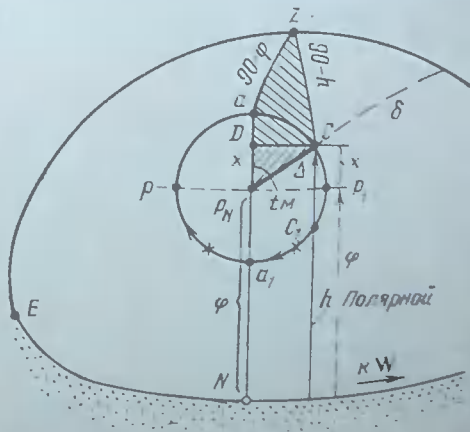


Рис. 156

Решение.

1. Предварительные операции выполняются как обычно для определений по звездам (см. примеры 67, 73).

2. Наблюдения: пуск секундомера $T_{гр}^n = 9^h 28^m 00^s$; $T_{скм} = 4^m 17^s$; $oc = 40^\circ 55,4'$; $i = +0,7'$; $s = -0,3'$; $e = 12,5$ м; $t^o = +15$; $B = 760$; $T_c = 20^h 32^m$; $\varphi_c = 41^\circ 20,8' N$; $\lambda_c = 148^\circ 25' E$.

3. Обработка наблюдений:

$T_{гр}^n$	$9^h 28^m 00^s$	oc	$40^\circ 55,4'$
$T_{скм}$	4 17	$i + s$	0,4
		d	- 6,2
$T_{гр}$	$9^h 32^m 17^s 10,05$	h_v	40 49,6
t_T	$3^\circ 06,4'$	Δh_p	- 1,1
Δt	8 5,6	h	40 48,5
$t_{гр}^v$	11 12,0	I	+ 28,7
λ	148 25	II	+ 0,2
$S_m = t_m^v$	$159^\circ 37,0'$	III	- 0,4
Азимут Полярной		φ_n	$41^\circ 17,0' N$
$A - 0^\circ 52' NW \approx 359,1^\circ$		φ_c	41 20,8
		Δq	- 3,8' S

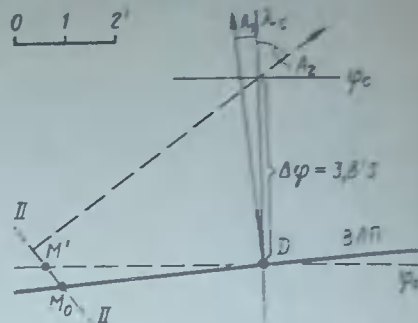


Рис 157

Нанесение ВЛП по найденной φ_c . Параллель φ_c не является линией положения (не круг равных высот). Для получения ВЛП следует: по меридиану λ_c (рис 157) отложить Δq , в полученной точке D проложить линию азимута A_c , перпендикулярно ей в точке D провести ВЛП. Если имелась вторая ВЛП, то получим место M_0 (но не M'). В прошлом широко применялись определения по Солнцу: «утро—полдень» (ВЛП — φ_n) и «полдень—вечер» (φ_n — ВЛП), однако они не полностью отвечают выгодным условиям.

§ 86. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПО СОЛНЦУ В МАЛЫХ ШИРОТАХ И ТРОПИКАХ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПО СПОСОБУ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ВЫСОТ И НАИБОЛЬШЕЙ ВЫСОТЕ

Влияние особенностей движения Солнца на способы определения места. В малых широтах и тропиках высоты Солнца в полдень могут превышать 70° и тогда в суточном движении его появ-

ляются особенности, приводящие к изменениям в порядке и в методах определения места. Как видно из рис. 158, в малой широте параллель суточного движения Солнца может проходить вблизи от зенита, при этом:

азимут Солнца от восхода и вплоть до моментов, близких к кульминации, изменяется очень мало (точки $C_1 - C_4$);

около моментов кульминации азимут Солнца за короткое время (Δt) меняется на значительную величину (точки C_4, C_5, C_6);

незадолго до кульминации (точки C_4, C_5) Солнце еще близко к первому вертикалу, и можно определять долготу; через короткое время Солнце подходит к меридиану (точка C_6), и можно определять широту. Точка C_5 недалеко и от первого вертикала, и от меридиана и в ней допустимо определение λ и φ .



Рис 158

Особенности способов определения

Из этих особенностей движения Солнца вытекает: все наблюдения для определения места по ВЛП следует производить около кульминации; за короткий промежуток времени здесь получается достаточная разность азимутов между линиями положения; в это же время можно определять и широту, и долготу места. Появляется возможность применить следующие приемы.

В способе ВЛП большая скорость ω_d и большие высоты Солнца позволяют применять четыре линии, для чего Солнце наблюдается симметрично кульминации и дополнительно «через зенит».

При высотах Солнца 75° — 88° можно применять аналитический расчет координат, привлекающий своей простотой (φ — по наибольшей высоте, λ — по способу соответствующих высот). Если высоты Солнца превышают 88° , то наблюдения можно выполнить на 3—6 мин до и после кульминации и полученные линии нанести как круги равных высот — графическим приемом.

Что касается одновременных наблюдений Солнца, Луны или Венеры, то выполняются они здесь как обычно, но часто появляется также возможность наблюдать «через зенит» и получать обсервацию по четырем линиям. Наблюдения в сумерки также обычные, но следует учитывать более короткие сумерки и лучше организовывать наблюдения.

Определение координат места по соответствующим высотам и наибольшей высоте Солнца. При высотах Солнца от 75° до 87° координаты места можно определить аналитическим приемом, в котором долгота определяется способом соответствующих высот, а широта — по наибольшей высоте. Определение долготы в этом способе основано на использовании координат полюса освещения $\lambda_p = t_{\text{гр}}^\odot$; $\varphi_p = \delta_\odot$. В момент верхней кульминации Солнца полюс освещения его находится на меридиане данного места и $\lambda_m = t_{\text{гр}}^\odot$. Это вытекает и из соотношения $t_m = t_{\text{гр}}^\odot - \lambda_m$ при $t_m = 0$; $\lambda_w = t_{\text{гр}}^\odot$. В море невозможно точно определить момент (T_k) прихода солнца на меридиан, так как меридиан ничем не отмечен, а компас дает приближенное направление. Наибольшая

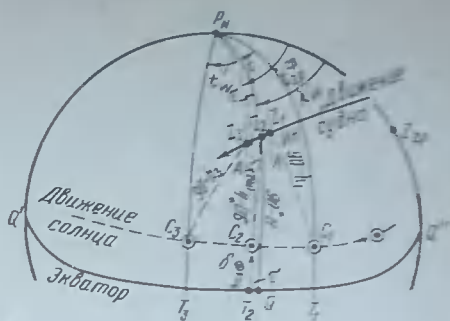


Рис. 159

высота Солнца наблюдается обычно вне меридиана и по времени точно не фиксируется. Имеется и принципиальная трудность: по наимыгоднейшим условиям долгота должна определяться по светилу на I вертикале или вблизи его; на меридиане же долготу определять нельзя.

Эти затруднения разрешаются измерением двух соответствующих высот, т. е. высот Солнца до и после кульминации и равных друг другу; средний из замеченных $T_{\text{гр}}$ должен быть близок к T_k . При этом высоты должны быть далеки от меридиана — не ближе 20 — 30° по азимуту. Подобное требование может быть выполнено только в малых широтах, если высота Солнца около меридиана больше 75° . При высотах меньше 60° промежуток времени между соответствующими высотами будет слишком велик, равенство условий нарушается и способ дает неточные результаты.

Положим, что на движущемся судне зенит его расположен на сфере в точке z_1 (рис. 159), измерена высота h_1 Солнца C_1 и замечен момент T_1 по хронометру. Далее около момента кульминации в точке z_2 измерена наибольшая высота h_{max} Солнца C_2 . Так как судно и Солнце перемещаются, то Солнце и его h_{max} не совпадают с меридианом z_2Q , а смещены от него на часовой угол t . Через некоторое время в точке z_3 высота h_3 Солнца C_3 снова будет равна h_1 , т. е. $h_3 = h_1$, время T_3 прихода Солнца на эту соответствующую высоту точно фиксируется по хронометру.

Если перемещение судна за это время происходило равномерно, то средний момент $T_{\text{ср}} = \frac{T_1 + T_3}{2}$ будет относиться

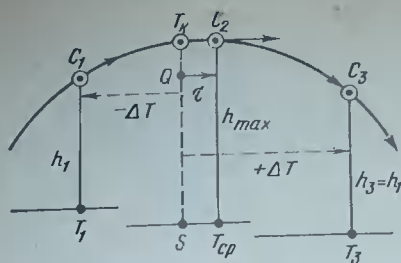


Рис. 160

ся к моменту наступления $h_{\max}$ (к положению Солнца C_2), так как при равномерном изменении высоты симметричны относительно наибольшей высоты.

По моменту T_{cr} можно получить из МАЕ $t_{\text{гр}}^{\odot}$, но в этот момент часовой угол $t_m^{\odot}$ равен не нулю, а дуге QT_2 (см. рис. 159), и, чтобы привести полюс освещения на меридиан, надо вычесть из $t_{\text{гр}}^{\odot}$ величину τ , т. е.

$$\lambda_w = t_{\text{гр}}^{\odot} - \tau, \quad (294)$$

где τ вычисляется по формуле (287).

Широту получим по измеренной около среднего момента $h_{\max}$. В малых широтах поправка $\Delta\varphi$ не превышает 0,1—0,2' и ею можно пренебречь, т. е. принять $h_{\max} = H$. Тогда $Z = 90^\circ - H$ и $\varphi = Z + \delta$.

При измерении $h_{\max}$ рекомендуется заметить момент T_2 по хронометру, сравнивая его с T_{cr} , можно произвести контроль записей моментов.

Из рис. 159 видно, что высоты h_1 и h_3 измерены довольно далеко от меридиана ($\Delta A \geq 30^\circ$) и определять долготу по ним допустимо. Полученные φ_0 и λ_0 относятся к среднему моменту наблюдений.

Рассмотренный вариант способа соответствующих высот требует измерения соответствующих высот и $h_{\max}$ — это так называемый вариант трех высот. Между тем по двум соответствующим высотам можно получить и φ и λ . Для этого высоты должны быть измерены в условиях, где допустимо получение φ и λ , т. е. там, где пределы близмеридиональных высот перекрывают пределы получения λ ; однако на флоте этот прием практически неприменим.

Наблюдения по варианту трех высот выполняются следующим образом (рис. 160). Время первых наблюдений получается вычитанием интервала ΔT , полученного по формуле (275) с $\Delta A = 30^\circ$, из времени T_c кульминации Солнца.

В намеченное время измеряется одна h_1 (или три—пять высот) нижнего края Солнца и замечаются $T_{\text{кр}} (T_1)$. Вторые наблюдения выполняются около кульминации; измеряется наибольшая высота, замечаются T_2, T_c , и снимаются φ_c и λ_c . Время грядущих наблюдений получается как $T_c + \Delta T$, но приступить к ним надо несколько раньше, чтобы не пропустить высоту $h_3 = h_1$. Для этого на секстане устанавливается α_s , и при тех же условиях (фильтры, место и т. п.) наблюдатель ожидает касания нижнего края Солнца к горизонту. При этом точно замечается момент $T_{\text{кр}} (T_3)$. Если измерялась серия высот, то последовательно устанавливаются отсчеты трех—пяти высот и аналогично замечаются три—пять пар моментов. При этом возможен контроль точности: полученные $T_{\text{кр}}$ не должны расходиться более чем на 2° . Если измеряется одна высота h_1 и нет уверенности в надежности секстана, то рекомендуется не сбивать установки α_s , а положить секстан в тень до измерения h_3 . Высота $h_{\max}$ измеряется в этом случае другим секстаном. Таким путем можно даже неисправным секстаном получить точную долготу.

Для вычислений служит следующая система формул:

$$1) T_{\text{cr}} = \frac{T_1 + T_3}{2} + T_{\text{кр}} - \mu_{\text{кр}} - T_{\text{гр}}^{\text{cr}},$$

$$\delta_{\odot}; t_{\text{гр}}^{\odot};$$

при измерении серии N высот:

$$T_{\text{cr}} = \frac{\sum T_i^{\text{cr}}}{N}, \quad \text{где } T_i^{\text{cr}} = \frac{T_1^i + T_3^i}{2} \quad (295)$$

$$2) \varphi_0 = Z + \delta_{\odot};$$

где $Z = 90^\circ - h_{\max}$.

$$3) \tau = 3,82 (\text{tg } \varphi_0 - \text{tg } \delta) (\Delta - \psi);$$

$$4) \lambda_0 = t_{\text{гр}}^{\odot} - (\pm \tau),$$

если $\lambda_w > 180^\circ$, то $\lambda_E = 360^\circ - \lambda_w$.

Долгота, найденная этим методом, свободна от систематических ошибок высот, так как высоты $h_1 = h_3$ не участ-

вуют в вычислениях, а служат только для регистрации моментов. Случайные же ошибки уменьшаются измерением серии высот. В широте систематические ошибки остаются, а высота $h_{\max}$ единственная, поэтому долготу определяется точнее, чем широта.

Основное преимущество способа соответствующих высот — это простота вычислений, однако наблюдения требуют большего внимания, чем обычные.

Пример 80. 10.05.85 в Индийском океане, следуя ГРК $= 112^\circ (0^\circ)$; $V = 16$ уз, определить $\varphi_0 \cdot \lambda_0$ на полдень по соответствующим высотам и $h_{\max}^{\odot}$. На $T_c = 12^h (5E)$ $\varphi_c = 10^\circ N$; $\lambda_c = 65^\circ E$.

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Кульминация Солнца:

T_m	$11^h 56^m 10.05$
λ	$4 \ 20$
$T_{гр}$	$7 \ 36 \ \delta = 18^\circ N$
N_2	5
T_c	$12^h 36^m, t_2 = 0^\circ$

1. 2. Расчет $\Delta T, T'_c, T''_c$ (по табл.

ВАС—58): Задаемся $\Delta A = 30^\circ$.

Из табл. 1 ВАС—58 пс $\varphi = 10^\circ N$; $\delta = 18^\circ N$; $t_2 = 0^\circ$, имеем $A_2 = 0^\circ$; $A_1 = 30^\circ$ и из таблиц имеем $t_1 = 5^\circ$; следовательно, $\Delta T = 5^\circ \times$

$\times 4^m / ^\circ = 20^m$; $T'_c = 12^h 36^m - 20^m = 12^h 16^m$;

$T''_c = 12^h 56^m$

1.3. Поправки: $u_{xp} = -0^m 35^s$; $i = 0,5'$; $s_2 = +0,3'$; $e = 15,5$ м; $t = +30^\circ$, $B = 755$.

2. Наблюдения: $T'_c = 12^h 15^m$; $oc = 80^\circ 57,0'$; $T_{xp} = 7^h 15^m 55^s$; $T''_c = 12^h 36^m$; $ol = 13,2$; $\varphi_c = 10^\circ 24' N$; $\lambda_c = 65^\circ 06,0' E$; $oc_{\odot}^{\max} = 82^\circ 34,0' N$;

$T''_{xp} = 7^h 36^m 36^s$; $T'''_c = 12^h 57^m$; $oc = 80^\circ 57', 0'$

$T'''_{xp} = 7^h 57^m 25^s$.

3. Обработка наблюдений

3.1.	T'_{xp}	$7^h 15^m 55^s$		
	T'''_{xp}	$7 \ 57 \ 25$		
	Σ	$14 \ 72 \ 80$		
	T_{cp}	$7 \ 36 \ 40$		
	u	$- \ 35$		
	$T_{гр}$	$7^h 36^m 05^s$		$1,0/0,6$
	t_T	$285^\circ 54,5'$	δ	$17^\circ 37,6$
	Δ_1	$9 \ 00,6$	$\Delta \delta$	$+ \ 0,4$
	Δ_2	$0,6$	$\delta_{\odot}$	$17^\circ 38,0' N$
	$t_{гр}^{\odot}$	$294^\circ 55,7'$		

3.2.	$oc_{\odot}^{\max}$	$82^\circ 34,0' N$		
	$i + s$	$+0,8$		
	d	$-7,0$		
	h_b	$82 \ 27,8$		
	Δh	$- \ 0,1$		
	R	$+ \ 15,9$		
	$H = h_{\max}$	$82 \ 43,6 \ N$		
	Z	$7 \ 16,4 \ S$		
	δ	$17 \ 38,0 \ N$		
	φ_0	$10^\circ 21,6' N$	$(\Delta \varphi = 0)$	

3.3.	$\varphi_0 = 10^\circ 22'$	$\operatorname{tg} \varphi$	$+0,138$	Δ	$+0,6$
	$\delta = 17^\circ 38'$	$\operatorname{tg} \delta$	$+0,318$	ψ	$-6,0$
		I	$-0,135$	II	$+6,6$
		$\tau = 3,82 \cdot (-0,135) \cdot 6,6 = -3,4'$			

3.4.

$t_{гр}^{\odot}$	$294^\circ 55,7'$
τ	$(-3,4)$
λ_0	$294^\circ 59,1' W$
λ_0	$65^\circ 00,9' E$

§ 87. ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПРИ ВЫСОТАХ СОЛНЦА, БОЛЬШИХ 88°

При очень больших высотах Солнца порядка $88-89^\circ$, когда оно проходит вблизи зенита, отмеченные выше особенности его суточного движения про-

являются особенно резко: изменение азимута за 1^m может достигать здесь $7-15^\circ$ и более. Вследствие этого для получения достаточной разности азиму-

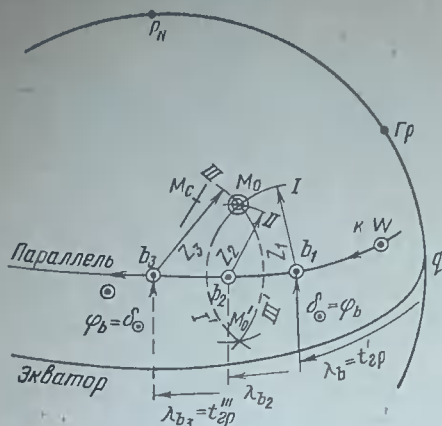


Рис. 161

тов в 30—50° между двумя линиями положения требуется всего 2—5" вместо нескольких часов в средних широтах, но наблюдения должны выполняться обязательно около кульминации. Промежуток времени между наблюдениями определяется, как и выше, от кульминации по ВАС—58 или графическим приемом, поясненным ниже.

В этих условиях применим графический способ нанесения круга равных высот на глобус по координатам полюса освещения [см. § 63, формула (208)]:

$$\varphi_b = \delta_{\odot}; \quad \lambda_b = t_{\odot}^{\odot} \quad (*)$$

и радиусу круга $z = 90^\circ - h_{\odot}$, где $h_{\odot}$ измерена на судне.

Полюс освещения Солнца за несколько минут перемещается в положения b_1, b_2, b_3 (рис. 161) и вследствие малости z направления на M_0 , т. е. азимуты, резко меняются. Поэтому, если из точек b_i радиусами z_i провести круги I, II, III, то они пересекутся под достаточными углами и дадут место M_0 .

Точек пересечения кругов получается две — севернее и южнее параллели $\varphi_b = \delta_{\odot}$. Для разрешения этой неопределенности есть два приема:

при измерении высоты заметить азимут Солнца и, если оно наблюдалось к S, то место будет в M_0 севернее параллели $\delta_{\odot}$, если к N — то в M'_0 .

принять то место, которое ближе к числимому. Например, на рис. 161 M_0 ближе к M_r .

Есть, кроме того, практический прием: если видимое движение Солнца происходит по часовой стрелке, то место к северу от параллели $\delta_{\odot}$; если против часовой стрелки — к югу.

Этот метод обработки может реализоваться на карте или листе бумаги, так как прокладка на глобусе неточна из-за малого его масштаба.

Графический способ на карте. В малых широтах искажения изображений на карте в меркаторской проекции невелики, поэтому построения, выполняемые на глобусе, могут производиться и на путевой карте без значительных искажений.

В первом приближении, принятом в навигационной практике, считается, что полюс освещения совпадает с центром O_1 кривой равных высот на карте с ошибкой менее 1' и его можно наносить по соотношениям (*). Принимается также, что циклическая кривая первого типа (см. рис. 103), в виде которой круг равных высот изображается на карте, при больших высотах Солнца близка к окружности, поэтому радиус кривой $z = 90^\circ - h_{\odot}$ с ошибкой менее 1'.

Для выполнения этих условий высоты Солнца не должны быть меньше 88° ($z \leq 2^\circ$) и наблюдения должны выполняться в тропиках ($\varphi \leq 23.5^\circ$). Аналогичные границы вытекают и из практических соображений: радиус, больший 120' (2'), может выйти за рамки карты, а вычерчивать слишком большие окружности затруднительно. В показанных пределах графический способ обычно и применяется на карте.

Во втором приближении, которое необходимо при точности построений до 0,2', следует учитывать смещение центра O_1 кривой к полюсу на величину $\Delta y = b_1 O_1$ (см. рис. 103), а радиус кривой следует уменьшать на величину Δz :

$$\Delta y = (D_0 - D_b) \cos \delta_{\odot}; \quad (296)$$

$$\Delta z = 0,4011 z \cos A. \quad (297)$$

где D — меридиональные части для центра кривой O_1 и полюса освещения φ .

По этим формулам составлены табл. 15, А, Б.

Введя эти поправки по формулам $\varphi_b = \delta_{\odot} + \Delta y$ и $\rho = z - \Delta z$, производим обычные построения.

При условии введения этих поправок пределы высот несколько расширяются — до $87^\circ 30'$ ($z \leq 2^\circ 30'$), а φ — до $24^\circ - 25^\circ$.

А. Поправки $\Delta\gamma$ Б. Поправки Δz

δ z	А. Поправки $\Delta\gamma$						A z	Б. Поправки Δz			
	4°	8°	12°	16°	20°	24°		0°	30°	60°	90°
1°	0,0'	0,1'	0,1'	0,2'	0,2'	0,3'	40'	0,0'	0,2'	0,1'	0'
1°40'	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1°20'	0,5	0,4	0,2	0
2°	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	2°	0,8	0,7	0,4	0
2°30'	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,5	2°40'	1,0	0,9	0,5	0

Исследования показывают также, что в средних и высоких широтах в применении к звездам этот способ сильно ограничен и практически неприменим.

Построение кругов на карте. Положим, что измерены и исправлены три высоты Солнца h_1, h_2, h_3 и рассчитаны $z_i = 90^\circ - h_i$, а по замеченным T'_{xp} получены T'_{rp} и из МАЕ выбраны три часовых угла t'_{rp} и склонение $\delta_\odot$, которое за несколько минут наблюдений практически не изменилось.

На основании соотношений (*) получаем координаты полюсов освещения: $\varphi_b = \delta_\odot$ — общая для всех $\lambda'_b = t'_{rp}$; $\lambda''_b = t''_{rp}$; $\lambda'''_b = t'''_{rp}$. Следует помнить, что полюс освещения движется всегда к западу (см. рис. 161), поэтому в λ_w долгота его возрастает, а в λ_E — убывает. Наносим на карту первый полюс b_1 по $\varphi_b = \delta_\odot$ и $\lambda'_b = t'_{rp}$ (положим, что λ_b — Е-я, см. рис. 163) и проводим из него параллель $\varphi_b = \delta_\odot$ к западу. По найденным долготам $\lambda''_b, \lambda'''_b$ наносим на эту параллель полюсы освещения b_2 и b_3 к западу от b_1 . Эти точки являются в первом приближении центрами кругов равных высот. Так как наблюдения выполнялись неодновременно, то линии положения (круги) надо привести к одному зениту (z_2). Вместо приведения к зениту линий (кругов) можно приводить их центры, что значительно удобнее. Для этого надо сместить полюсы b_1, b_3 по проложенному из них курсу на величину плавания S_1, S_3 за время между наблюдениями. Приведение можно сделать к любому из полюсов, но удобнее делать его к среднему моменту $T_2 (z_2)$, близкому к полудню; при этом b_1 смещается вперед, b_3 — назад по курсу (см. рис. 163). Полученные точки b_1 и b_3 являются центрами кругов, приведенных к зениту на момент T_2 . Из этих точек радиусами z_1, z_2, z_3 , выраженными в

градусных минутах и снятыми с боковой рамки карты, проводятся дуги кругов I, II, III вблизи счислимого места M_c , которые и являются линиями положения судна. Построения окружностей выполняются с помощью полосы твердой бумаги, например от карты, или картона, в которой прокладываются отверстия на расстояния z_1, z_2, z_3 . Обсервованное место M_o принимается в середине образовавшегося треугольника ошибок.

Как видим, место судна определялось здесь относительно полюсов освещения Солнца совершенно независимо от счисления. При разрешении неопределенности счислимое место также необязательно, так как достаточно азимута Солнца.

Особенности измерения больших высот Солнца. Измерение больших высот секстаном представляет некоторые трудности в связи с быстрым изменением азимута Солнца и изменением скорости движения его по высоте. В связи с этим измеряются не серии высот, а отдельные высоты через 2—3^м. Измерение лучше выполнить совмещением изображения без покачивания секстана, но с относительно точной его ориентировкой по компасу. Азимут, по которому нужно наблюдать Солнце, находится совместно с высотой следующим графическим приемом.

Определяется счислимое место на полдень и время кульминации; на это время выбирается $\delta_\odot$. Около счислимого места строится параллель $\varphi_b = \delta_\odot$ и на меридиане λ_c помечается судовое время кульминации, например 12°31^м (рис. 162).

Вправо и влево от меридиана по параллели откладывается $\Delta\lambda = \Delta T = 1^m = 15'$ (в масштабе долгот) несколько раз. Полученные точки соединяются со

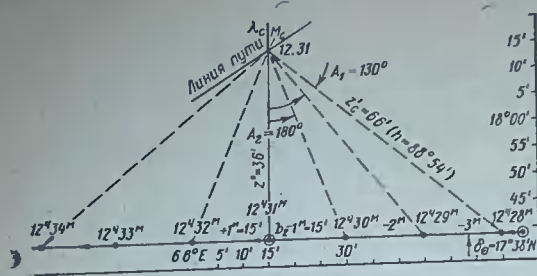


Рис. 162

счислимым местом и помечаются найденным временем, например $12^{\text{h}}31^{\text{m}}$ — $1^{\text{m}} = 12^{\text{h}}30^{\text{m}}$ и т. д. С карты теперь можно найти необходимые разности азимутов и счислимые азимуты в намеченные моменты, а также приближенные z_c для установки на секстане. Таким путем приближенно получим время наблюдений, азимуты и высоты. Для повышения точности определения можно наблюдать не три линии, а пять.

Достоинствами рассмотренного способа определения по высотам, большим 88° являются: простота и наглядность обработки, уменьшающая промахи. Недостаток способа — редкость его применимости: только при движении судна вдоль параллели $\varphi = \delta_\odot$ он применим 3—5 дней подряд, обычно же только один день. Порядок работы приведен в примере 81.

Построение на листе бумаги В случаях, когда построения не помещаются на карте вследствие смещения чертежа за ее рамки, а также при слишком мелком ее масштабе, когда теряется точность построений, рекомендуется производить прокладку на листе бумаги, например на обратной стороне карты. Прокладка на бумаге выполняется также и при обучении в аудиторной обстановке.

В принципе прокладка на бумаге менее удобна, чем на карте, так как дает только поправки координат $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$, а не место. Эти поправки, в отличие от способа Сент-Илера, получаются относительно координат полюса освещения b_2 , т. е. относительно Солнца, а не относительно счислимого места M_c . Поэтому обсервованные координаты судна получаются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \delta_\odot + PШ; \\ \lambda_0 &= t_{\text{гр}}^\odot + PД, \end{aligned} \right\} \quad (298)$$

где $\delta_\odot$ и $t_{\text{гр}}^\odot$ выбраны на момент $T_{\text{гр}}$ к зениту которого приведены все линии, а $PШ$ и $PД$ сняты относительно b_2 .

Прокладка на бумаге начинается с выбора линейного масштаба, который должен быть не менее чем 1 миля = $3 \div 5$ мм. Затем определяют направление прокладки: к N или S от параллели Солнца. Если Солнце наблюдалось к S , то место будет севернее полюсов освещения, поэтому параллель Солнца проводится внизу листа; если Солнце наблюдалось к N , то параллель проводится сверху листа. Посередине листа проводят меридиан полюса b_2 ; вправо от него будет b_1 , влево — к W — b_3 . Расчет часовых углов в случае прокладки на бумаге упрощается: на второй момент $T_{\text{гр}}$ получается $\delta_\odot$ и $t_{\text{гр}}^\odot$, находят разности $\Delta T_{\text{хр}}$ между вторым и первым, третьим и вторым моментами, эти разности переводят в $\Delta t^\odot$ по таблицам МАЕ, а полученные разности долгот $\Delta\lambda = \Delta t^\odot$ обращаются в отшествие умножением на $\cos \delta_\odot$, т. е. $ОТШ_1 = \Delta t_1 \cos \delta_\odot$; $ОТШ_3 = \Delta t_3 \cos \delta_\odot$. Эти величины в принятом масштабе откладывают от b_2 соответственно к E ($ОТШ_1$) и к W ($ОТШ_3$) и получают b_1 и b_3 . Приведение их ко второму зениту и построение кругов производят аналогично показанному для карты. После выбора обсервованного места с чертежа определяют $PШ$ и отшествие относительно параллели и меридиана точки b_2 . Отшествие переводят в $PД$, по табл. 25-а МТ—75 или ЭКВМ и по формулам (298) определяют φ_0 и λ_0 .

Пример 81. 10.05.85 в Индийском океане, следуя $ГКК = 56^\circ (0^\circ)$, $V = 16$ уз, определить место по высотам Солнца, большим 88° . На полдень приближенно имеем $\varphi_c = 18^\circ 14' N$; $\lambda_c = 66^\circ 15' E$ ($\Delta E = 5E$).

Решение.

1. Предварительные операции.

1.1. Кульминация Солнца.

T_m	$11^{\text{h}}56^{\text{m}}10.5$	
λ	4 25	
$T_{\text{гр}}$	7 31	$\delta = 17^\circ 38' N$
$+ \lambda E$	5	
T_c	$12^{\text{h}}31^{\text{m}}$	

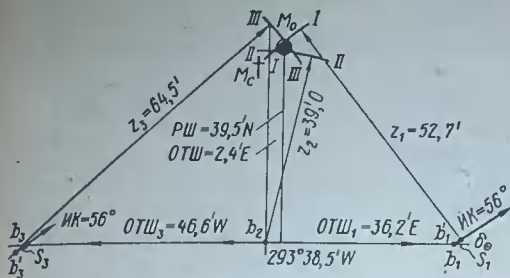


Рис. 163

1.2. Определение ΔT , приближенных h и A :

Производим графические построения (прокладкой на карте, см. рис. 162). Проведя параллель $\delta_{\odot} = 17^{\circ}38'$ и меридиан $\lambda_c = 66^{\circ}15' E$, в их пересечении получим полюс освещения Солнца в $T_c = 12^h31^m$ (θ_2). Отложив по $\Delta\lambda = 15'$ (1^m) вправо и влево, несколько

ко раз получим места полюсов освещения Солнца за $1^m, 2^m, 3^m \dots$ до и после кульминации, т. е. в $12^h28^m, 12^h29^m$ и т. д. Соединив эти точки с M_0 , получим A и z . Выбираем: $T_c = 12^h28^m$; $A_1 = 50^{\circ} SE$ или 130° ; $z' = 56'$ или $h_1 = 89^{\circ}04'$. $T_c'' = 12^h31^m$; $A_2 = 180^{\circ}$; $h_2 = 89^{\circ}24'$; $T_c''' = 12^h34^m$; $A_3 = 230^{\circ}$.

1.3. Поправки: $u = -0^m43^s$, $i = -2.1'$, $e = 14.5$ м, $s_{1-3} = +0.4'$.

2. Наблюдения: $T_c = 12^h28^m$; $\alpha_{\odot} = 88^{\circ}59.8'$; $T'_{xp} = 7^h29^m07^s$; $T''_c = 12^h31^m$; $\alpha_l = 6.7$; $\varphi_c = 18^{\circ}15.4' N$; $\lambda_c = 66^{\circ}20.2 E$; $\alpha_{\odot} = 89^{\circ}13.5'$; $T''_{xp} = 7^h31^m39^s$; $T'''_c = 12^h34^m$; $\alpha_{\odot} = 88^{\circ}48.0'$; $T'''_{xp} = 7^h34^m55^s$.

3. Обработка наблюдений.

3.1. Обработка для прокладки на бумаге (в тетради).

$T'_{xp} = 7^h29^m07^s$; T''_{xp}	$7^h31^m39^s$	$T'''_{xp} = 7^h34^m55^s$	δ_T	$17^{\circ}37.6'$
$\Delta T_{2-1} = 2^m32^s$; u	-0.43	$\Delta T_{3-2} = 3^m16^s$	$\Delta\delta$	$+0.3$
$T_{гр}$	$7\ 30\ 56$	10.05	$\delta_{\odot}$	$17^{\circ}37.9' N$

$\Delta t'_{\odot} = 38.0'$	t_T	$285^{\circ}54.5'$	$1.0/0.6$
$\times$	Δ_1	$7\ 43.5$	$\Delta t'''_{\odot} = 48.9'$
$\cos \delta = 0.953$	Δ_2	0.5	$\times$
$OTШ = 36.2'$	$t_{гр}$	$293^{\circ}38.5'$	$\cos \delta = 0.953$
$S_1 = 0.7'$			$OTШ_3 = 46.6'$
			$S_3 = -0.9'$

α_c	$88^{\circ}59.8'$	$89^{\circ}13.5'$	$88^{\circ}48.0'$
$i+s$	-1.7	-1.7	-1.7
d	-6.7	-6.7	-6.7
h_B	$88\ 51.4$	$89\ 05.1$	$88\ 39.6$
R	$+15.9$	$+15.9$	$+15.9$
h	$89^{\circ}07.3'$	$89^{\circ}21.0'$	$88^{\circ}55.5'$
z	$52.7'$	$39.0'$	64.5

Прокладка на бумаге
(рис. 163). Результаты
обсервации:

$\delta_{\odot}$	$17^{\circ}37.9' N$	$t'_{гр}$	$293^{\circ}38.5 W$
$PШ$	$39.5 N$	PD	$2.5 E$
φ_o	$18^{\circ}17.4' N$	λ_o	$293^{\circ}36'.0 W$
		λ_o	$66^{\circ}24.0' E$

$T_c = 12^h31^m$; $\alpha_l = 6.7$

3. 2. Обработка для прокладки на карте:

T_{xp}	$7^h 24^m 07^s$	$7^h 31^m 39^s$	$7^h 34^m 57^s$		
u	— 0 43	— 0 43	— 0 43		
$T_{гр}$	$7^h 28^m 24^s$	$7^h 30^m 56^s$	$7^h 34^m 14^s$		
t_T	$285^\circ 54,5'$	$285^\circ 54,5'$	$285^\circ 54,5'$	δ	$17^\circ 37,6'$
Δ_1	7 05,5	7 43,5	8 32,9	$\Delta\delta$	+ 0,3
Δ_2	0,5	0,5	0,6	$\delta_\odot$	$17^\circ 37,9' N$
$t_{гр}^\odot$	295 00,5	293 38,5	294 28,0 W		
$\lambda_{по}$	$66^\circ 59,5' E$	$66^\circ 21,5' E$	$65^\circ 32,0' E$		

Остальные вычисления и прокладка на карте аналогичны указанным в п. 3.1.

§ 88. ОСОБЕННОСТИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Особенности в выполнении астрономических наблюдений появляются, начиная приблизительно с широт 65° , при широтах же, больших 80° , изменяются и способы обработки наблюдений. В высоких широтах для определения места следует применять только способ линий положения, так как определение широты по наибольшей высоте требует дополнительной поправки.

Особенности выполнения наблюдений. Летом в основной период навигации в этих широтах бывает полярный день или белые ночи, и звезды не видны, поэтому в это время наблюдать постоянно можно только Солнце и временами Солнце и Луну или Солнце и Венеру. Наблюдения этих светил дают хорошую обсервацию, но чтобы знать условия их видимости, надо регулярно наносить их на звездный глобус. Венеру совместно с Солнцем и Луной здесь можно наблюдать реже, чем в малых широтах, из-за меньшей ΔA .

Измерение малых высот Солнца секстаном может быть затруднено попаданием прямых лучей в его трубу; в этих случаях надо над малым зеркалом прикрепить темный экран, например из черной бумаги. Разность азимутов Солнца здесь берется порядка $30-35^\circ$, что требует интервала между наблюдениями приблизительно в $2,5-3^h$.

Определение i по Солнцу при $h < 17^\circ$ следует делать при горизонтальном по-

ложении секстана, тогда будет правилен обычный контроль по разности $oi_2 - oi_1 = 4R_\odot$. В высоких широтах особенно часты отклонения величины d от табличной, поэтому наклонение лучше измерять наклономером.

При плавании на чистой воде (без льда) наблюдения высот производятся секстаном, как обычно. Если льды покрывают горизонт, то измерение высот производят над льдом, а при исправлении при входе в таблицы высота e глаза наблюдателя уменьшается на возвышение льда над поверхностью моря. При плавании во льдах, когда есть возможность видеть горизонт, высоты также измеряют секстаном и исправляют, как показано выше. Если же горизонт не виден (крупные льды, дымка, ночь или полярная ночь), то измерение высот можно выполнить в искусственный горизонт. Однако в настоящее время такие наблюдения следует выполнять теодолитом. Измерения теодолитом производят при установке штатива на палубе (если застопорены машины) или на льду. Теодолиты применяются на полярных станциях (СП), в экспедициях и на ледоколах.

Для наблюдения светил в этих случаях применяют небольшие оптические теодолиты ОТ-02 или ThB , в которых искусственный горизонт дается установкой инструмента по уровням. Правила установки и работа с теодолитом описа-

ны в инструкции к нему, с которой следует ознакомиться заранее и провести тренировку в измерении и отсчете.

При измерении зенитных расстояний Солнца и Луны нить наводят на край светила, а при измерении z звезд или планет — на центр изображения, причем производят три наведения при круге право и три — при круге лево и замечают моменты хронометра.

Исправление полученных высот производится по формулам (172) § 53 с точностью до $0,1'$ или, если есть специальные таблицы, до $1''$.

Теодолитом можно наблюдать яркие звезды даже при Солнце или в ранние сумерки. Для этого высота и азимут звезды должны быть получены по звездному глобусу до $0,5^\circ$ (теодолит установлен по этим данным; труба его — на увеличение $40-48\times$, и звезда отыскивается в поле зрения). Вследствие того что поле зрения всего 1° , ошибки в установке приводят к потере звезды, и чтобы ее обнаружить, нужна сноровка.

Особенности обработки наблюдений в высоких широтах. Вычисление высоты и азимута в широтах, больших 80° , должно производиться по ЭКВМ или по таблицам ТВА—57; таблиц ВАС—58 на эти широты нет.

В широтах до 89° вычисления по МАЕ и ЭКВМ (или ТВА—57) выполняются, как обычно, но расчет обсервованных координат после прокладки изменяется.

В широтах же, больших 89° , за перемещенное место принимается полюс, а счет азимутов ведется от гринвичского меридиана; тогда

$$h_c = \delta; A_c = t_{\text{ГР}} \text{ и } n = h - h_c = h - \delta. \quad (299)$$

Эти данные прокладываются из полюса на карте в стереографической проекции, причем n откладывают по меридиану к светилу при $+n$ и от светила при $-n$.

Особенности прокладки ВЛП в высоких широтах. Прокладку в высоких широтах надо производить не на карте, а на плане (бланке). План строится на бумаге в масштабе $1 \text{ см} = 1'$, но в координатах x и y (рис. 164). На нем произ-

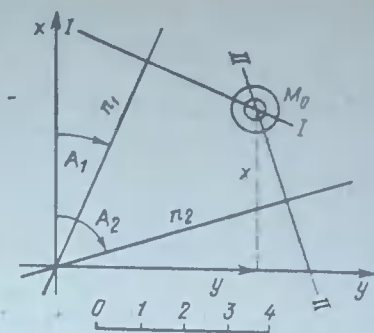


Рис. 164

водится обычная прокладка и снимаются полученные x и y , по которым рассчитывают φ_0 , λ_0 , и обсервованное место наносят на карту в любой проекции.

В широтах, меньших 82° , в обычных условиях, т. е. при $n < 15'$, координаты φ_0 и λ_0 можно рассчитывать по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \varphi_c + x; \\ \lambda_0 &= \lambda_c + \Delta\lambda; \\ \Delta\lambda &= y \sec \varphi_0. \end{aligned} \right\} \quad (300)$$

где $\Delta\lambda$ — рассчитывается с обсервованной широтой, а не со средней или промежуточной.

Следовательно, в высоких широтах до 82° прокладка отличается только тем, что производится всегда на бланке, берется линейный масштаб, а величина $\Delta\lambda$ получается не по таблицам, а умножением y на $\sec \varphi_0$, выбранный из табл. 6 МТ—75.

В широтах, больших 82° , для расчета φ_0 и λ_0 следует применять формулы, предложенные К. А. Емцом:

$$\left. \begin{aligned} \varphi'_0 &= \varphi_c + x; \quad \text{tg } \varphi'_0 = \frac{\text{tg } \varphi'_0}{\sec \Delta\lambda}; \\ \lambda_0 &= \lambda_c + \Delta\lambda; \quad \text{tg } \Delta\lambda = \text{tg } y \sec \varphi'_0. \end{aligned} \right\} \quad (301)$$

Для расчета можно применять ЭКВМ.

Расчет по этой системе формул можно производить и с табл. ТВА—57 по схеме:

$$T(y) + S(\varphi'_0) = T(\Delta\lambda); \quad T(\varphi'_0) - S(\Delta\lambda) = T(\varphi_0).$$

§ 89. ПОНЯТИЕ О МОРСКИХ АСТРОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
И НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АСТРОНАВИГАЦИИ

Методы астрономического определения места с помощью «ручных» наблюдений и вычислений после второй мировой войны не отвечали возросшим требованиям к скорости и постоянству получения информации со стороны авиации и флотов. В связи с этим в 50-е и особенно 70-е годы в ряде государств разрабатываются и внедряются в навигационную практику флотов автоматические и полуавтоматические астронавигационные системы. Эти системы можно разделить: на радиоастрономические системы, т. е. разработанные на основе радиосекстана; оптические астронавигационные системы (на основе перископического секстана или других оптических систем); космические (спутниковые) навигационные системы, использующие излучение искусственных спутников Земли.

В этих системах приборы, воспринимающие излучение и дающие необходимую информацию (высоту, азимуты, расстояние и др.), работают обязательно в сочетании с ЭВМ, вычисляющими координаты места и управляющими самими приборами. Поэтому здесь мы имеем дело не с отдельным прибором, а с автоматизированной системой приборов, которая и называется астронавигационной системой. Судя по данным печати, эти системы еще очень сложны, громоздки и требуют специального обслуживания, вследствие чего на транспортных судах они пока практически не применяются.

Понятие о решении астрономических задач в навигационных комплексах. Навигационный комплекс представляет систему датчиков информации, устройств автоматического ввода ее в ЭВМ (навигационная и управляющая) и устройств вывода результатов решения на индикаторы (печать) и на управляющие устройства.

На отдельных судах установлены комплексы «Data Bridge», «Digiplot» и отечественные комплексы. В них с пуль-

та управления могут вводиться также и астрономические данные.

Отечественные комплексы имеют свои датчики информации: гирокомпас, лаг, радиолокатор и др. Почти вся навигационная информация имеет автоматический ввод, включая КП и время, только высоты вводятся вручную. Полученная по обсервации информация выводится на печать и может использоваться для управляющих сигналов. В программах ЭВМ этого комплекса есть решение и астрономических задач. В 1975 г. фирма «Мицубиси» (Япония) начала выпуск комплекса TONAC, в котором предусмотрено решение всех перечисленных задач и выдача импульсов для управления судном. В ближайшем будущем навигационные комплексы получат распространение на крупных судах. Перспективы также малые клавишные ЭВМ со сменными или постоянными программами и, возможно, с частично автоматизированными вводами. Порядок работы и вводимые данные рассматриваются в инструкции к данной ЭВМ.

Перспективы развития и применения астронавигации. Изучение астронавигации в ближайшем будущем является обязательным по Международной конвенции о подготовке, дипломировании моряков, несении вахты. 1978 г., что отражает ее объективную необходимость на море в качестве дублирующего, дополнительного и аварийного методов обсервации. В ближайшем будущем появится единая судовая служба времени (до 0,5"), появятся секстаны с дистанционной передачей отсчетов и моментов на ЭВМ. Такими разработками занято несколько фирм. Уже имеются кварцевые хронометры, секстаны с цифровым отсчетным устройством («Марк-3»); разрабатываются секстаны с трубами для ночных наблюдений, с электронными отсчетными устройствами и др.

Если использовать все достижения современной науки, то наблюдения сек-

стином, в том числе и ночью, подключенным к ЭВМ, а также КП светил и точное время могут быть включены в навигационные комплексы и систему автоматизированного судовождения. Перспективен также секстан с малой вычислительной приставкой на раме, включающей кварцевые часы и автоматический ввод измеренных высот в ЭВМ. При этом за штурманом останется только получение поправок, набор навигационной информации и измерение высот; с вычислителя же секстана снимаются координаты места. Секстан при этом ос-

танется автономным переносным прибором, дающим независимый контроль счисления по светилам.

В будущем астронавигация, по-видимому, сохранит свое значение как независимый способ контроля счисления, дублирующий наблюдения по любым системам и дающий поправки приборов направления. Общеобразовательный же аспект мореходной астрономии для штурмана в ориентировке и понимании окружающей среды, службе времени и т. п. продолжает сохранять важное значение.

§ 90. КРАТКИЙ ОЧЕРК ИСТОРИИ МОРЕХОДНОЙ АСТРОНОМИИ

Мореходная астрономия, как и все прикладные науки, развивалась из потребностей общественного производства. Значение мореходной астрономии росло по мере развития производства и океанских плаваний, а совершенствование ее находилось в тесной связи с ростом науки и техники. В большинстве стран в XV—XIX вв. развитие практической, а отчасти и теоретической астрономии, открытие обсерваторий и создание инструментов вызывались именно потребностями мореплавания, вследствие чего история мореходной астрономии в это время теснейшим образом связана с историей астрономии вообще.

С древнейших времен при плавании в море всеми народами применялась ориентировка — ночью по звездам (по Полярной и по местам восхода, захода известных созвездий), днем по Солнцу. Отдельные научные сведения сохранялись как частные секреты.

Возникновение мореходной астрономии как науки со своими методами и инструментами относится к XV в. Моряки и купцы Португалии и Испании в поисках путей в Индию все дальше проникали на юг вдоль побережья Африки. Во время этих плаваний все больше ощущается потребность в астрономическом определении места, в основном широты его. Первое упоминание об определении широты по Полярной с помощью угломерного инструмента — квадранта — встречается в 1462 г. в описании плавания Диего-Гомеца. Определение широты по высоте Солнца и

формуле $\varphi = Z - \delta$ упоминается в 1484 г. Необходимые для этого эфемериды помещались в применявшемся моряками альманахе «*Ephemerides sive Almagest perpetuum*», выпущенном около 1473 г. португальским астрономом А. Закуто, а затем в более точных таблицах Региомонтана — в 1475 г. Так, у Закуто наибольшее склонение Солнца было $23^{\circ} 33'$, а у Региомонтана точнее — $23^{\circ} 30'$. Одним из первых пособий по мореходной астрономии являлось «Руководство к астролэбии и квадранту», выпущенное в Лиссабоне около 1509 г. и включавшее также другие сведения по мореплаванию.

В XVI в. широкой известностью пользовались учебник навигации Педро Медина «*Arte de Nauigar*», выпущенный в Севилье в 1545 г., и английское руководство Дж. Девиса «Секреты мореплавания», вышедшее в 1594 г., также содержавшие сведения о всех морских науках.

Мореплаватели XV в. применяли несколько подправленные береговые угломерные инструменты: квадрант и астролэбию, несколько позже — градшток — древний инструмент, применявшийся еще в Вавилоне и Египте.

Квадрант представлял собой сектор в $1/4$ окружности, разделенный на градусы. Дюптры на его грани направлялись на светило, а около отвеса, читались градусы.

Астролэбия (рис. 165) представляла более совершенный инструмент в виде диска диаметром от 16 до 60 см, разде-

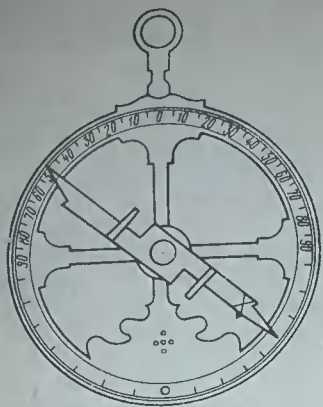


Рис. 165

ленного до долей градуса, с алидадой, направляемой на светило с помощью диоптров. Наблюдения этими инструментами требовали двух-трех человек.

Градшток — первый инструмент для наблюдения над видимым горизонтом — представлял собой деревянный брусок (флеш), разделенный на градусы, с набором поперечных брусков (марто), определявших угол между горизонтом и светилом (рис. 166). Дальнейшее развитие инструментов (Девисов квадрат и др.) постепенно приближало их к отражательной схеме, реализованной позже в секстане. Для измерения промежутков времени в XV—XVIII вв. применялись песочные часы от больших четырехчасовых до полуминутных. Местное время получалось относительно полдня, а ночью — по положению звезд относительно Полярной.

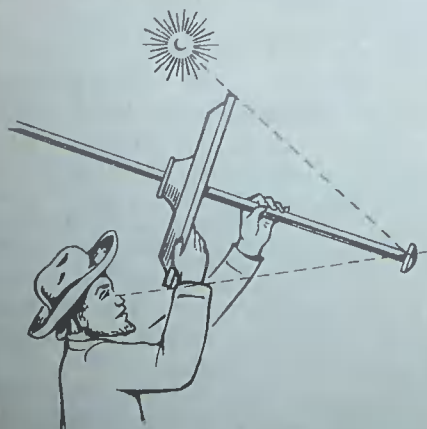


Рис. 166

Широта места в XVI в. определялась в море по Полярной и полуденной высоте Солнца с точностью порядка 0,5. Долгота в море определялась только по счислению, а береговых пунктов — по времени предвычисленного затмения Луны, приводившегося в альманахах для основного меридиана (Кадикса, Канарских островов и др.); в океане ошибки в долготе достигали 3—10°, что приводило к авариям и гибели судов.

Поэтому определение долготы в море — важнейшая проблема практической астрономии и навигации в XVI—XVIII вв. Правительства морских стран назначали крупные премии, открывали обсерватории (например, в 1676 г. Гринвичскую), были созданы «Бюро долгот». Это привело к развитию теоретических наук — теории движения Луны, теории колебаний маятника и связанных с ними разделов математики.

Русские мореплаватели до Петра I пользовались в основном иностранными пособиями и инструментами. Первое русское пособие по навигации и астрономии «Арифметика» Л. Ф. Магницкого, изданное в 1703 г. — предназначалось слушателям «Школы математических и навигацких наук», открытой в 1701 г. в Москве. В 1715 г. в Петербурге основывается «Морская академия», в 1725 г. — астрономическая обсерватория. С этих пор навигация в России развивается самостоятельно. В 1739 г. выходит книга Соймонова по навигации, в 1748 г. — труд С. И. Мордвинова «Книга полного собрания о навигации» (третья часть книги — астрономия).

В 1730 г. одновременно двумя мастерами — Т. Годфреем из Филадельфии и англичанином Д. Гадлеем был изобретен секстан, первоначально называвшийся «Гадлеев» или «английский октан» — дуга его лимба равнялась 45°.

Несколько позже разрешается и проблема долготы. С 1767 г. в изданном в Англии «Морском астрономическом ежегоднике» публикуются таблицы для способа лунных расстояний, составленные Майером на основе новой теории движения Луны, разработанной Эйлером (1755 г.). В таблицах приводились по $T_{гр}$ отнесенные к центру Земли, истинные угловые расстояния между Луной и рядом звезд и Луной и Солнцем. Эти рас-

стояния одинаковы для всех наблюдателей Земли в данный момент, поэтому, измерив на судне видимое угловое расстояние Луна — звезда и пересчитав его по формулам в истинное, из ежегодника путем сложной интерполяции получалось $T_{гр}$ в этот момент, а по нему выбирали $t_{гр}^*$. Одновременно с расстоянием измерялась высота звезды и по формуле $\sin^2 \frac{t}{2}$ вычислялся t_m^* , после чего

$$\lambda_0 = t_m^* - t_{гр}^* \quad (*)$$

Способ лунных расстояний являлся наиболее распространенным методом определения λ до второй половины XIX в., а в ежегоднике публиковался до 1907 г.

В 1735 г. английским мастером Гаррисоном был изобретен первый образец хронометра, а к 1764 г. он был усовершенствован и испытан. С этого времени стало возможным хранить время начального меридиана ($T_{гр}$) на кораблях и, вычислив t_m^* по наблюдаемой высоте светила, получать долготу по формуле (*). Однако хронометры вследствие своей дороговизны распространялись медленно.

Большой вклад в развитие морских наук внес великий русский ученый М. В. Ломоносов. В его труде «Рассуждение о большей точности морского пути» рассмотрены усовершенствования «Гадлеева октана», хронометра, предложены методы определения долготы и т. п.

К концу XVIII в. пособия и методы астрономии значительно совершенствуются. Регулярный выпуск морских ежегодников производился в Англии с 1767 г., в России — с 1814 г., в Германии — с 1851 г., в США — с 1855 г. В первом русском «Морском месяцеслове» (ежегоднике), составленном акад. Ф. М. Шубертом, помещались координаты звезд, Солнца и Луны, лунные расстояния и другие сведения. Во время Крымской войны выпуск его был прерван и возобновился только в 1930 г.

В конце XVIII — начале XIX вв. появляется много новых аналитических способов расчета φ и λ места, например способ близмеридиональных высот, соответствующих высот, общие аналитические решения задач двух высот Гаусса, Шуберта и других, однако в море

применялось только несколько простейших способов. Точность определения координат значительно возросла.

Эпоху в навигации составило открытие способа высотных линий положения, сделанное в 1837 г. американским капитаном Томасом Сомнером (1807—1851) при переходе через океан.

В 1849 г. штурман Черноморского флота М. А. Акимов опубликовал теоретическое обоснование и пример другого способа нанесения высотной линии на карту, ошибочно названного позже способом Джонсона, издавшего для него в 1862 г. таблицы. Позже появилось еще несколько аналогичных способов: Ф. Палудана, Лаланда и др. Метод, близкий к современному, был предложен в 1875 г. французским моряком Марком Сент-Илером. Этот универсальный метод быстро распространился: в России он введен в программы училищ с 1890 г.; применительно к нему было создано много таблиц. Одни из первых специальных таблиц для вычисления h_c и A_c были составлены кронштадтским астрономом В. Е. Фусом в 1901 г. В России были созданы также первые морские обсерватории в Николаеве и Кронштадте в 1857 г., где проверялись секстансы и хронометры. Установка для проверки секстансов, применявшаяся с 1852 г., называлась «прибором Фуса». Секстансы в России изготавливались с 1904 г., отдельные экземпляры — с 1813 г., а морские хронометры — только с 1930 г. В 1883 г. изобретен наклонмер Пульфриха. К началу XX в. хронометр и секстанс обязательны для каждого судна, а точность определения места приблизительно равноценна с современной.

С изобретением А. С. Поповым радио была решена проблема точного времени на судах. По радиосигналам времени (в СССР передаются с 1921 г.) можно очень просто определить поправку хронометра в любое время, тогда как раньше u_{xp} определялась в портах по сигналам обсерваторий или наблюдением высот.

После Великой Октябрьской социалистической революции навигация и астрономия в СССР начинают быстро развиваться. С 1924 г. возобновляется производство секстансов, часов, глобусов и других приборов. Советским уче-

ным В. В. Каврайским произведена разработка общего метода линий положения, изложенная в трудах «Обобщенный способ линий положения» и завершенная трудами Н. Г. Келля и А. П. Ющенко. В 1947 г. Каврайский разработал пеленгатор и наклономер. С 1949 г. выпускаются секстаны типа ИМС, а с 1974 г. — секстаны СНО-Т. Советскими учеными и моряками создано много учебников и выпущено большое количество таблиц и пособий по мореходной астрономии. Вследствие этого, а также

хорошей подготовки морских кадров русские и советские штурманы всегда отличались высоким уровнем знаний и профессиональным мастерством.

С 50-х годов нашего века методы навигации и астронавигации начинают изменяться в сторону внедрения радиотехнических средств и ЭВМ. Однако старое искусство астронавигации с «ручными» наблюдениями и вычислениями остается нужным морякам транспортного флота из-за своей надежности, независимости и дешевизны приборов.

1. СВЕДЕНИЯ ИЗ СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И ТРИГОНОМЕТРИИ

1.1. Соотношение между дугами больших и малых кругов

Радиус малого круга r связан с радиусом R большого круга AA' соотношением, вытекающим из треугольника $OO'B'$ (рис. 167), т. е.

$$r = R \cos \psi.$$

После умножения на 2π получим $2\pi r = 2\pi R \cos \psi$, или

$$2\pi r/n = 2\pi R \cos \psi/n, \quad (1)$$

т. е. длина дуги малого круга или ее части меньше длины дуги большого круга или ее части в $\cos \psi$ раз.

1.2. Основные формулы сферической тригонометрии

Формула косинуса стороны. В сферическом треугольнике косинус любой стороны равен произведению косинусов двух других сторон плюс произведение синусов тех же сторон, умноженное на косинус угла между ними. Из рис. 167 имеем

$$\cos a = \cos m \cos c + \sin m \sin c \cos A. \quad (2)$$

Таких формул можно записать три — по числу сторон.

Формула косинуса угла. В сферическом треугольнике косинус любого угла равен отрицательному произведению косинусов двух других углов плюс произведение синусов тех же углов на косинус стороны между ними. Из рис. 167 имеем

$$\cos M = -\cos A \cos C + \sin A \sin C \cos m. \quad (3)$$

Таких формул можно записать три — по числу углов.

Формула синусов. В сферическом треугольнике синусы сторон пропорциональны синусам противолежащих им углов. Из рис. 167 имеем:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin m}{\sin M}. \quad (4)$$

Можно написать три таких соотношения.

Формула котангенсов (или для четырех рядом лежащих элементов). В сферическом

треугольнике при четырех элементах, лежащих рядом, котангенс крайнего угла, умноженный на синус среднего угла, равен произведению котангенса крайней стороны на синус средней стороны минус произведение косинусов средних элементов. Из рис. 167 от A в сторону стрелки имеем:

$$\operatorname{ctg} A \sin C = \operatorname{ctg} a \sin m - \cos m \cos C. \quad (5)$$

Можно записать шесть таких соотношений

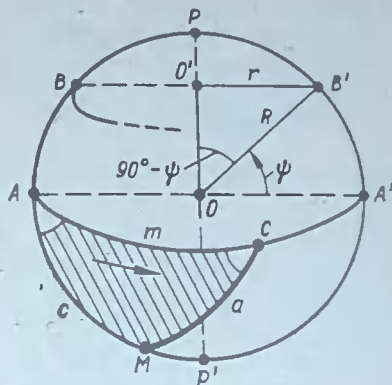


Рис. 167

Промежуточная формула «пяти элементов». Косинус угла, умноженный на синус прилежащей стороны, равен синусу второй стороны угла на косинус третьей стороны минус произведение их наоборот и на косинус угла между ними. Из рис. 167 для угла A и (C) имеем

$$\sin c \cos A = \sin m \cos a - \sin a \cos m \cos C. \quad (6)$$

1.3. Формула для элементарного сферического треугольника

Разность между гипотенузой a и катетом c :

$$(a-c)' = \frac{(B')^2}{4} \sin 2a \operatorname{arc} l' = \frac{(B')^2}{4} \sin 2c \operatorname{arc} l'. \quad (7)$$

2. АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВИДИМЫХ КООРДИНАТ ЗВЕЗД И СОЛНЦА

2.1. Исходные данные из АЕ на эпоху (0^h00.01.85 г.)

Долгота восходящего узла Луны $\Omega_0 = 55,1990^\circ$.
 Средний наклон эклиптики $\epsilon_0 = 23,4412$.
 Средняя долгота Солнца $L_0 = 279,6034$.
 Среднее гринвичское звездное время $S_0 = 99,6056$.
 Средняя аномалия Солнца $M_0 = 356,9286$.
 Первый коэффициент уравнения центра $K_0 = 1,9154^\circ$.

2.2. Расчет промежутка времени от начальной эпохи

Число юлианских дней (d) от начальной эпохи:

$$d = \text{ent} \{365,25 \Gamma\} + \text{ent} \{30,6 (M + 1)\} + M - C, \quad (1)$$

где ent — целая часть произведения;

Γ — две последние цифры номера года, причем $\Gamma = \Gamma' - 1$, если $M' \leq 2$; $\Gamma = \Gamma'$, если $M' > 2$;

M' — текущий месяц, причем $M = M' + 12$, если $M' \leq 2$; и $M = M'$, если $M' > 2$;

M — номер дня в месяце;

$C = 31109$ — константа для эпохи 0^h01.01.85 г.

Промежуток времени τ в юлианских столетиях выражается формулой

$$\tau = d/36525. \quad (2)$$

Гринвичское время переводится в доли суток ($T_{\text{гр}}^{\text{д}}$):

$$T_{\text{гр}}^{\text{д}} = T_{\text{гр}}^{\text{ч}}/24, \quad (3)$$

где $T_{\text{гр}}^{\text{ч}}$ — время наблюдений ($T_{\text{гр}}^{\text{ч. м. с.}}$), выраженное в часах.

2.3. Вычисление видимых экваториальных координат звезд

Производится по формулам (65), где α_0 и δ_0 данных звезд выбираются из АЕ на начальную эпоху (например, 0^h00.01.85 г.). Алгоритмы для δ , α , t^* обеспечивают точность 0,1' в промежутке $\pm 7,5$ лет от начальной эпохи.

Поправки за прецессию. Применяются формулы (63) в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{п}} &= (1,2808^\circ + 0,5566^\circ \text{tg } \delta_0 \sin \alpha_0) \tau; \\ \Delta\delta_{\text{п}} &= 0,5566^\circ \cos \alpha_0 \tau, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где τ — промежуток времени в юлианских столетиях.

¹ В это число включена аберрация.

Поправки за нутацию

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{н}} &= \Delta\psi \cos \epsilon + \sin \epsilon \sin \alpha_0 \text{tg } \delta_0 - \\ &\quad - \Delta\epsilon \text{tg } \delta_0 \cos \alpha_0; \\ \Delta\delta_{\text{н}} &= \Delta\psi \sin \epsilon \cos \alpha_0 + \Delta\epsilon \sin \alpha_0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\Delta\psi = -0,00479 \sin \Omega$ — нутация в долготу эклиптики;

$\Delta\epsilon = 0,00266 \cos \Omega$ — нутация в наклоне эклиптики;

$\Omega = \Omega_0 - 1934,14 \tau$ — долгота восходящего узла Луны. (7)

Поправки за аберрацию

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{а}} &= -0,0057^\circ \sec \delta (\sin L \sin \alpha_0 + \\ &\quad + \cos L \cos \alpha_0 \cos \epsilon); \\ \Delta\delta_{\text{а}} &= -0,0057^\circ [\sin L \cos \alpha_0 \sin \delta_0 + \\ &\quad + \cos L (\sin \epsilon \cos \delta_0 + \\ &\quad + \cos \epsilon \sin \alpha_0 \sin \delta_0)], \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $L = L_0 + \Delta L$ — средняя долгота Солнца;

(9) $\Delta L = \Delta S = 36000 \tau + 0,768925 \tau$ — приращение долготы или S ;

$\epsilon = \epsilon_0 - 0,013012 \tau + \Delta\epsilon$ — истинный наклон эклиптики. (11)

Истинное звездное время на начало суток

$$S_{\text{гр}} = S_0 + \Delta S + \Delta\psi \cos \epsilon, \quad (12)$$

где ΔS — приращение S по формуле (10); $\Delta\psi \cos \epsilon$ — учет нутации в долготу.

Расчет часового угла звезды. После получения $\alpha_{\text{в}}$, $\delta_{\text{в}}$ [по формуле (65)] и $S_{\text{гр}}$ получаем $t_{\text{в}}^*$

$$t_{\text{в}}^* = (S_{\text{гр}} + 360,985657 T_{\text{гр}}^{\text{д}} - \alpha_{\text{в}}^* + \lambda_{\text{в}}^E), \quad (13)$$

где знак $+$ приписывается W часовому углу.

2.4. Вычисление видимых экваториальных координат Солнца

Этот алгоритм обеспечивает точность $\pm 0,2'$; предельная ошибка в $t = \pm 0,5'$.

Средняя долгота Солнца

$L = [L_0 + \Delta L] + \Delta L'$ — средняя долгота на момент наблюдений. (14)

где ΔL — приращение долготы на начало суток [формула (10)]; $\Delta L' = 0,985647 T_{\text{гр}}^{\text{д}}$ — приращение долготы за $T_{\text{гр}}^{\text{д}}$.

Средняя аномалия:

$M = [M_0 + \Delta M] + \Delta M'$ — средняя аномалия на момент наблюдений. (15)

где $\Delta M = 35999,05 \tau$ — приращение аномалии на начало суток. (16)

$\Delta M' = 0,985647 T_{\text{гр}}^{\text{д}}$ — приращение аномалии за $T_{\text{гр}}$. (17)

Уравнение центра:

$K = K_0 - 0,004881 \tau$ — первый коэффициент уравнения центра; (18)

$\eta_1 = K \sin M + 0,02 \sin 2M$ — уравнение центра, (19)

где M — средняя аномалия.

Расчет величин Ω , $\Delta\psi$, $\Delta\epsilon$, ϵ производится по формулам (7), (6), (11).

Видимая эклиптическая долгота Солнца:

$$\lambda = L + \eta_1 + \Delta\psi, \quad (20)$$

где $\Delta\psi$ — поправка за нутацию в долготе по формуле (6).

Видимое склонение и прямое восхождение определяются по формулам (58) с λ и ϵ в виде:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\text{в}} &= \arcsin (\sin \lambda \sin \epsilon); \\ \alpha' &= \arcsin (\cos \lambda / \cos \delta_{\text{в}}), \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где при $\delta > 0$ $\alpha_{\text{в}} = \alpha'$; при $\delta_{\text{в}} < 0$ $\alpha_{\text{в}} = 360^\circ - \alpha'$.

Расчет истинного звездного времени на начало суток производится по формуле (12) для $S'_{\text{гр}}$.

Часовой угол Солнца на момент наблюдений:

$$t_{\text{м}}^{\odot} = -(S'_{\text{гр}} + 360,98565 T_{\text{гр}}^{\text{д}} - \alpha_{\text{в}}^{\odot} \pm i_{\text{в}}^{\odot}), \quad (22)$$

где знак «—» приписан W часовому углу.

Примечание. В таком виде алгоритмы для Солнца и звезд разработаны инж. В. П. Брусенцовым (ЛВИМУ).

3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ (АВАРИЙНЫЕ) СПОСОБЫ АСТРООРИЕНТИРОВКИ

3.1. Приближенные способы измерения углов

Естественными приближенными единицами могут служить Луна, диаметр которой около $0,5^\circ$, Большая Медведица, расстояние между отдельными звездами которой показано на рис. 58. Если держать кулак на расстоянии вытянутой руки, то угловое расстояние между крайними суставами будет около 8° , а между соседними — около 3° , между расставленными пальцами вытянутой руки примерно 20° .

3.2. Определение направлений

Днем приближенное направление на юг можно установить по Солнцу и часам. Для этого, держа часы приблизительно в плоскости экватора, следует направить часовую стрелку на Солнце. Разделив пополам угол между этой стрелкой и цифрой «12», если часы идут по поясному времени (цифрой «1», если часы идут по декретному времени или «2» — по летнему, получим приближенное направление на S . Ночью направление на N устанавливается по Полярной звезде.

По созвездию Орiona можно определять направления и время. «Пояс» Ориона восходит на E , а заходит на W , причем при восходе $S_M \approx 0^\circ$, при заходе — $S_M \approx 12^\circ$. В кульминации, когда Орион «стоит» (см. рис. 63, 64), он находится на S (в φ_N) или на N (в φ_S), при этом $S^\circ \approx 6^\circ$. Легко определить промежуточные направления и время.

В южных широтах направление на S укажет созвездие Южного Креста, которое будет на S в момент верхней кульминации («Крест» стоит вертикально, а звезды Центавра — слева); в этот момент $S_M \approx 12^\circ$. В нижней кульминации Южный Крест (Центавр — справа, а время $S_M \approx 0^\circ$) также укажет направление на S .

3.3. Определение широты

Днем приближенное определение φ можно произвести в полдень по Солнцу на основании формулы $\varphi = 90^\circ - H_\odot \pm \delta_\odot$, где $H_\odot$ должно быть хотя бы приближенно измерено, а $\delta_\odot$ — приближенно рассчитано. Ночью широта определяется приближенно по высоте Полярной звезды: $\varphi \approx h_{\text{пол}}$.

3.4. Определение времени

Днем время приближенно определяется по часовому углу Солнца, для чего необходимо знать направление на юг, тогда $T_M = t_M^\odot + 12^\circ$.

Ночью время определяется по положению Большой Медведицы относительно меридиана. Описав мысленно около Полярной звезды круг, превращаем его в циферблат звездных часов (рис. 168), часовой стрелкой которых служит направление от Полярной

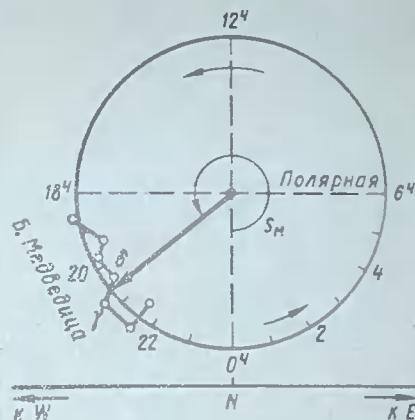


Рис. 168

на звезды $\gamma - \delta$ Большой Медведицы (внутренняя часть ковш). Эта мысленно проведенная стрелка укажет число часов звездного местного времени S_M . Расстояние в $15^\circ = 1^\circ$ приблизительно равно (как сказано выше) двум кулакам на расстоянии вытянутой руки. T_M и T_C получают по формулам (76) и (88).

Например, 22 сентября (см. рис. 168) $S_M = 20,5^\circ$. Рассчитываем приближенно $\alpha_\odot$. Считая от 23 сентября, получим $\alpha_\odot = 12^\circ - 32,4 \cdot 4/д = 9,9^\circ$; $t_\odot = S_M - \alpha_\odot = 10,6^\circ$ и $T_M = 12^\circ + t_\odot = 22,6^\circ$. Вводя поправку на долготу и номер пояса, получим T_C . Если, например, $\lambda_E = 36^\circ$ ($M = 4E$), то $T_C = 22,6 - 2,4 + 4 = 0,2^\circ$.

В тропиках и в южном полушарии время определяется по Ориону или Южному Кресту.

41 ЕЖЕДНЕВНЫЕ ТАБЛИЦЫ МАЕ (левая страница)

1986 г.

Май 10, 11, 12 130 131 132

Т _{гв}	т. Овна	Солнце	Венера - 42	Марс - 18	Юпитер - 19	Сатурн - 23	Т _{зд}
10 ^а	0 ^ч	1 ^{гг} 227°44'2"	1 ^{гг} 180°54'4"	1 ^{гг} 218°47'7"	1 ^{гг} 160°06'7"	1 ^{гг} 289°11'1"	1 ^{гг} 354°13'8"
	1	242 46.6	195 54.4 N 33.6	233 48.9 N 21.4	175 07.3 N 29.7	264 13.4 S 35.6	5 16.2 S 46.9
	2	257 49.1	210 54.4 34.3	248 50.1 21.5	190 07.9 30.0	299 15.7 35.4	24 18.5 46.8
	3	272 51.6	225 54.4 35.0	263 51.2 21.5	205 08.6 30.3	314 17.9 35.5	39 21.5 46.8
	4	287 54.0	240 54.5 35.6	278 52.4 21.7	220 09.2 30.6	329 20.2 35.5	54 24.2 46.8
	5	302 56.5	255 54.5 36.3	293 53.6 21.8	235 09.8 30.9	344 22.5 35.4	69 26.5 46.7
	6	317 59.0	270 54.5 S 37.6	308 54.7 4 21.9	250 10.5 32 31.1	359 24.7 36 34.4	84 29.2 46.7
	7	333 01.4	285 54.5 37.6	323 55.9 22.1	265 11.1 31.4	374 27.0 35.3	99 32.2 46.7
	8	348 03.9	300 54.6 38.2	338 57.1 22.2	280 11.7 31.7	389 29.2 35.3	114 34.8 46.5
	9	3 06.4	315 54.6 38.9	353 58.2 22.3	295 12.4 32.0	404 31.5 35.2	129 37.5 46.5
	10	18 08.8	330 54.6 39.5	8 59.4 22.4	310 13.0 32.2	59 33.8 35.2	144 40.1 46.5
	11	33 11.3	345 54.6 40.2	24 00.5 22.5	325 13.6 32.5	74 36.1 35.1	159 42.8 46.5
	12	48 13.7	0 54.7 17 40.8	39 01.7 4 22.7	340 14.3 22 32.8	89 38.3 36 35.1	174 45.4 46 48.4
	13	63 16.2	15 51.7 41 5	54 02.9 22.8	355 14.9 33.1	104 40.6 35.0	189 48.1 46.4
	14	78 18.7	30 54.7 42.1	69 04.0 22.9	10 15.5 33.3	119 42.9 35.0	204 50.7 46.3
	15	93 21.1	45 54.7 42.8	84 05.2 23.0	25 16.2 33.6	134 45.1 34.9	219 53.4 46.3
	16	108 23.6	60 54.7 43.4	99 06.3 23.2	40 16.8 33.9	149 47.4 34.8	234 56.0 46.2
	17	123 26.1	75 54.8 44.1	114 07.4 23.3	55 17.4 34.2	164 49.7 34.6	249 58.7 46.2
	18	138 28.5	90 54.8 17 44.4	129 08.6 4 23.4	70 18.1 22 34.4	179 51.9 34.6	265 01.3 46 48.2
	19	153 31.0	105 54.8 45.4	144 09.7 23.5	85 18.7 34.7	194 54.2 34.7	280 04.0 46.1
	20	168 33.5	120 54.8 46.0	159 10.9 23.7	100 19.3 35.0	209 56.5 34.7	295 06.6 46.1
	21	183 35.9	135 54.9 46.7	174 12.0 23.8	115 19.9 35.3	224 58.7 34.6	310 09.3 46.0
	22	198 38.4	150 54.9 47.3	189 13.1 24.0	130 20.6 35.5	240 01.0 34.6	325 11.9 46.0
	23	213 40.9	165 54.9 48.0	204 14.3 24.1	145 21.2 35.8	255 03.3 34.5	340 14.6 45.9
	0	228 43.3	180 54.0 17 48.6	219 15.4 4 24.2	160 21.8 22 36.1	270 05.6 34 5	355 17.3 16 45.9
	1	243 45.8	195 54.9 N 49.3	234 16.5 N 24.4	175 22.5 N 36.3	285 07.8 S 34.4	10 19.9 S 45.9
	2	258 48.2	210 55.0 49.9	249 17.6 24.5	190 23.1 36.6	300 10.1 34.4	25 22.6 45.8
	3	273 50.7	225 55.0 50.6	264 18.8 24.7	205 23.7 36.9	315 12.4 34.3	40 25.2 45.6
	4	288 53.2	240 55.0 51.2	279 19.9 24.8	220 24.4 37.2	330 14.6 34.3	55 27.9 45.7
	5	303 55.6	255 55.0 51.8	294 21.0 24.9	235 25.0 37.4	345 16.9 34.2	70 30.5 45.7
	6	318 58.1	270 55.0 17 52.5	309 22.1 4 25.1	250 25.6 22 37.7	0 18.2 16 34.2	85 33.2 16 45.6
	7	334 00.6	285 55.9 53.1	324 23.2 25.2	265 26.3 38.0	15 21.5 34.1	100 35.8 45.6
	8	349 03.0	300 55.1 53.8	339 24.1 25.4	280 26.9 38.2	30 23.7 34.1	115 38.5 45.6
	9	4 05.5	315 55.1 54.4	354 25.0 25.5	295 27.5 38.5	45 25.0 34.1	130 41.1 45.5
	10	19 08.0	330 55.1 55.0	9 26.0 25.7	310 28.2 38.8	60 28.3 34.0	145 43.8 45.5
	11	34 10.4	345 55.1 55.7	24 27.7 25.9	325 28.8 39.0	75 30.6 34.0	160 46.4 45.4
	12	49 12.9	0 55.1 17 58.3	39 28.8 4 26.0	340 29.4 22 39.3	90 32.8 16 33.9	175 49.1 16 45.4
	13	64 15.4	15 55.2 57.0	54 29.9 26.2	355 30.0 39.6	105 35.1 33.9	190 51.7 45.3
	14	79 17.8	30 55.2 57.6	69 31.0 26.3	10 30.7 39.8	120 37.4 33.8	205 54.4 45.2
	15	94 20.3	45 55.2 58.2	84 32.2 26.5	25 31.3 40.1	35 39.7 33.8	220 57.1 45.2
	16	109 22.7	60 55.2 58.9	99 33.3 26.6	40 31.9 40.4	50 41.9 33.7	235 59.7 45.2
	17	124 25.2	75 55.2 17 59.5	114 34.4 26.8	55 32.6 40.5	65 44.2 32.7	250 62.4 45.2
	18	139 27.7	90 55.2 18 00.1	129 35.5 27.0	70 33.2 40.9	80 46.5 16 33.6	265 05.0 16 45.1
	19	154 30.1	105 55.2 60.8	144 36.4 27.1	85 33.8 41.2	95 48.8 33.6	280 07.7 45.1
	20	169 32.5	120 55.3 61.4	159 37.6 27.1	100 34.5 41.4	110 51.0 33.5	295 10.3 45.0
	21	184 35.1	135 55.3 62.1	174 38.6 27.5	115 35.1 41.7	125 53.2 33.5	310 13.0 45.0
	22	199 37.5	150 55.3 62.7	189 39.7 27.8	130 35.7 42.0	140 55.6 33.4	325 15.6 44.9
	23	214 40.0	165 55.3 63.3	204 40.8 27.8	145 36.4 42.2	155 57.9 33.4	340 18.3 44.9
	0	229 42.5	180 55.3 18 04.0	219 41.6 4 28.0	160 37.0 22 42.5	271 00.2 16 33.3	355 20.9 16 44.9
	1	244 44.9	195 55.3 N 04.6	234 42.9 N 28.2	175 37.6 N 42.7	286 02.4 S 33.3	11 23.6 S 44.8
	2	259 47.4	210 55.3 05.2	249 44.0 28.3	190 38.2 43.0	301 04.7 33.3	26 26.2 44.8
	3	274 49.9	225 55.4 05.9	264 45.1 28.5	205 38.9 43.3	316 07.0 33.2	41 28.9 44.7
	4	289 52.3	240 55.4 06.5	279 46.1 28.7	220 39.5 43.5	331 09.3 33.2	56 31.5 44.7
	5	304 54.8	255 55.4 07.1	294 47.2 28.9	235 40.1 43.8	346 11.6 33.1	71 34.2 44.6
	6	319 57.2	270 55.4 18 07.7	309 48.3 4 29.1	250 40.8 22 44.0	1 13.8 16 33.1	86 36.9 16 44.6
	7	334 59.7	285 55.4 08.4	324 49.3 29.2	265 41.4 44.3	16 16.1 33.0	101 39.5 44.6
	8	350 02.2	200 55.4 09.0	339 50.4 29.4	280 42.0 44.6	31 18.4 33.0	116 42.2 44.5
	9	5 04.6	315 55.4 09.6	354 51.5 29.6	295 42.7 44.8	46 20.7 32.9	131 44.8 44.5
	10	20 07.1	330 55.4 10.3	9 52.5 29.8	310 43.3 45.1	61 23.0 32.9	146 47.5 44.4
	11	35 09.6	345 55.4 10.9	24 53.6 30.0	325 43.9 45.3	76 25.2 32.8	161 50.1 44.4
	12	50 12.0	0 55.5 18 11.5	38 54.6 4 30.2	340 44.5 22 45.6	91 27.5 16 32.8	176 52.8 16 44.3
	13	65 14.5	15 55.5 12.1	54 55.7 30.4	355 45.2 45.9	106 29.8 32.8	191 55.4 44.3
	14	80 17.0	30 55.5 12.8	69 56.7 30.5	10 45.8 46.1	121 32.1 32.7	206 58.1 44.3
	15	95 19.4	45 55.5 13.4	84 57.8 30.7	25 46.4 46.4	136 34.4 32.7	222 00.7 44.2
	16	110 21.9	60 55.5 14.0	99 58.8 30.9	40 47.1 46.6	151 36.6 32.6	237 03.4 44.2
	17	125 24.3	75 55.5 14.6	114 59.9 31.1	55 47.7 46.9	166 38.9 32.6	252 06.0 44.1
	18	140 26.8	90 55.5 18 15.3	130 00.9 4 31.3	70 48.3 22 47.1	181 41.2 16 32.5	267 08.7 16 44.1
	19	155 29.3	105 55.5 15.9	145 01.9 31.5	85 48.9 47.4	196 43.5 32.5	282 11.4 44.0
	20	170 31.7	120 55.5 16.5	160 03.0 31.7	100 49.6 47.7	211 45.8 32.4	297 14.0 44.0
	21	185 34.2	135 55.6 17.1	175 04.0 31.9	115 50.2 47.9	226 48.1 32.4	312 16.7 44.0
	22	200 36.7	150 55.6 17.7	190 05.1 32.1	130 50.8 48.2	241 50.4 32.4	327 19.3 43.9
	23	215 39.1	165 55.6 N 18.4	205 06.1 N 32.3	145 51.5 N 48.4	256 52.6 S 32.3	342 22.0 S 43.9
		$\Delta +1.0$	$\Delta +0.6$	$\Delta +2.1$	$\Delta +0.2$	$\Delta +1.6$	$\Delta +0.3$
		$\Delta +3.3$	$\Delta 0.0$	$\Delta +3.7$	$\Delta 0.0$		
		Т _{к.}	α	$\rho_0...$	9°22'N 9°5'0.3	13°18'N 68°4'0.1	5°50'N 318°6'0.0
						0°19'N 233°4'0.0	

4.2. ЕЖЕДНЕВНЫЕ ТАБЛИЦЫ МАЕ (правая страница)
1985 г. Май 10, 11, 12 (130, 131, 132)

7.10		Л у н а			Ч	11		10		12	
						Нач сум. навиг. гражд.		Восход ☉ Сут. изм.		Восход ☉ Сут. изм.	
10.40		Δ			°	Ч М Ч М		Ч М Ч М		Ч М Ч М	
1	285° 57' 17.5	S	28° 20' 1"	-6° 0'	74	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
2	300 23.6		25 14.1	-6.2	75	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
3	314 50.2		25 07.9	-6.3	76	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
4	329 16.9		25 01.6	-6.4	77	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
5	343 43.7		24 55.2	-6.6	78	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
6	358 10.6		24 48.6	-6.6	79	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
7	12 37.8		24 42.0	-6.9	80	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
8	27 04.8		24 35.1	-6.9	81	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
9	41 32.0		24 28.2	-7.1	82	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
10	55 59.4		24 21.1	-7.2	83	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
11	70 26.9		24 13.9	-7.3	84	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
12	84 54.5		24 06.6	-7.5	85	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
13	99 22.2		23 59.1	-7.5	86	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
14	113 50.0		23 51.6	-7.7	87	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
15	128 17.9		23 43.9	-7.7	88	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
16	142 46.0		23 36.1	-7.9	89	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
17	157 14.2		23 28.2	-8.1	90	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
18	171 42.4		23 20.1	-8.1	91	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
19	186 10.8		23 12.0	-8.2	92	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
20	200 39.3		23 03.8	-8.4	93	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
21	215 08.0		22 55.4	-8.5	94	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
22	229 36.7		22 46.9	-8.6	95	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
23	244 05.6		22 38.3	-8.6	96	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
24	258 34.5	S	22 29.7	-8.8	97	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
11	0	273 03.8	S	22 20.9	-8.9	98	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
1	287 32.8		22 12.0	-9.0	99	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
2	302 02.1		22 03.0	-9.1	100	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
3	316 31.5		21 53.9	-9.2	101	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
4	331 01.0		21 44.7	-9.3	102	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
5	345 30.7		21 35.4	-9.4	103	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
6	0 00.4		21 26.0	-9.4	104	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
7	14 30.3		21 16.6	-9.6	105	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
8	29 00.0		21 07.0	-9.7	106	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
9	43 30.3		20 57.3	-9.7	107	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
10	58 00.5		20 47.6	-9.8	108	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
11	72 30.8		20 37.8	-10.0	109	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
12	87 01.2		20 27.8	-10.0	110	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
13	101 31.7		20 17.8	-10.0	111	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
14	116 02.3		20 07.7	-10.2	112	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
15	130 33.0		19 57.5	-10.2	113	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
16	145 03.8		19 47.3	-10.4	114	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
17	159 34.8		19 36.9	-10.4	115	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
18	174 08.8		19 26.8	-10.5	116	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
19	188 36.9		19 16.0	-10.6	117	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
20	203 08.1		19 05.4	-10.6	118	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
21	217 39.5		18 54.8	-10.7	119	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
22	232 10.9		18 44.1	-10.8	120	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
23	246 42.4	S	18 33.3	-10.9	121	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
12	0	281 14.1	S	18 22.4	-11.0	122	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
1	275 45.8		18 11.4	-11.0	123	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
2	290 17.6		18 00.4	-11.1	124	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
3	304 49.5		17 49.3	-11.1	125	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
4	319 21.5		17 38.2	-11.2	126	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
5	333 53.7		17 27.0	-11.3	127	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
6	348 28.9		17 15.7	-11.3	128	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
7	2 58.1		17 04.4	-11.5	129	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
8	17 30.5		16 52.9	-11.4	130	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
9	32 03.0		16 41.9	-11.5	131	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
10	46 35.6		16 29.9	-11.6	132	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
11	61 08.2		16 18.4	-11.7	133	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
12	75 40.9		16 06.7	-11.7	134	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
13	90 13.8		15 55.0	-11.8	135	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
14	104 46.7		15 43.2	-11.8	136	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
15	119 19.7		15 31.4	-11.8	137	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
16	133 52.7		15 19.5	-11.9	138	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
17	148 25.9		15 07.5	-11.9	139	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
18	162 59.1		14 56.8	-12.0	140	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
19	177 32.4		14 43.6	-12.1	141	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
20	192 05.3		14 31.5	-12.1	142	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
21	206 39.8		14 19.4	-12.2	143	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
22	221 12.9		14 07.2	-12.2	144	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
23	235 46.5	S	13 55.0	-12.3	145	Ч М	Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М	Ч М Ч М
						Солнце		Луна			
Дата						η		T _н		R	
10						12 03.6		11 56.5		15.9	
11						12 03.7		11 56.5		15.9	
12						12 03.7		11 56.5		15.9	

4.3. ТАБЛИЦА «ЗВЕЗДЫ. ВИДИМЫЕ МЕСТА» МАЕ НА 1985 Г. (левая страница)

α	№ по порядку	Название звезды	Звездное дополнение $\tau^* = 360^\circ - \alpha$									
				Янв. 1	Февр. 1	...	Апр. 1	Май 1	Июнь 1	...	Дек. 1	Дек. 22
1° 9	1	α Андромеды	358°	06,2'	06,3'		06,3'	06,2'	05,9'		05,2'	05,4'
78,9	28	α Возничего	281	06,2	06,2		06,5	06,7	06,7		05,1	05,0
101,1	46	α Большого Пса	258	52,6	52,5		52,8	52,9	52,9		52,0	51,8
113,4	54	α Близнецов	246	35,2	35,1		35,3	35,4	35,5	...	34,4	34,2
151,9	67	α Льва	208	06,4	06,2	...	06,2	06,2	06,3		05,8	05,5
165,7	72	α Б. Медведицы	194	17,7	17,3		17,1	17,2	17,5		17,1	16,6
213,7	99	α Волопаса	146	15,7	15,4		15,0	15,0	15,0		15,1	15,0
346	159	α Пегаса	13	60,2	60,2		60,2	60,0	59,8		59,3	59,4

4.4. ТАБЛИЦА «ЗВЕЗДЫ. ВИДИМЫЕ МЕСТА» МАЕ НА 1985 Г. (правая страница)

[illegible]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брусенцов В. П. О методе определения места судна по звездам на ЭВМ с ограниченным объемом памяти.— В кн.: Судовождение на морском флоте. М.: Транспорт, 1982.
2. Кожухов В. П., Григорьев В. В., Лукин С. М. Математические основы судовождения. М.: Транспорт, 1980. 231 с.
3. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. М.: Транспорт, 1981. 206 с.
4. Кондрашихин В. Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения. М.: Транспорт, 1969. 256 с.
5. Красавцев Б. И. Мореходная астрономия. М.: Транспорт, 1978. 304 с.
6. Мальцев Б. А. Использование разновременных линий положения в судовождении. М.: Морской транспорт, 1962. 140 с.
7. Матусевич Н. Н. Основы мореходной астрономии. Л.: УГС ВМФ, 1956. 548 с.
8. Наставление по организации штурманской службы на судах ММФ СССР (НШС-82). М.: ЦРИА «Морфлот», 1983. 100 с.
9. Скородумов П. П. Мореходная астрономия. Курс кораблевождения. Т. 2. Л.: УГС ВМФ, 1963. 528 с.
10. Смирнов А. И., Каманин В. И., Груздев Н. М. Практика кораблевождения. М.: Воениздат, 1978. 399 с.
11. Скубко Р. А. Морская астронавигация. М.: Воениздат, 1979. 478 с.
12. Титов Р. Б., Файн Г. И. Мореходная астрономия. М.: Транспорт, 1984. 312 с.
13. Сборник задач по мореходной астрономии/Под ред. Л. Ф. Черникова. М.: Транспорт, 1984. 248 с.
14. Халхунов В. З. Сферическая астрономия. М.: Недра, 1972. 303 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Аберрация годичная 49
 — —, поправка 242
 — суточная 49
 Азимут 7
 — восхода 146
 — круговой 8
 — полукруговой 7
 — Полярной 148
 — светила 138
 — счислимый 139, 160
 Алгоритм видимых координат 242
 — операций 220, 221
 Алидада секстана 100, 103
 Альмукантарат 7
 Анализ обсервации 177, 180, 184, 209
 Аномалия средняя 35, 242
 — эксцентрическая 35
 Антимедиана 173
 Апогей 43, 51
 Апсид линия 44, 151
 Астрографик 155
 Астролябия 237
 Астрометрия 3
 Астронавигация 3, 138
 Астрономия 3
 — авнационная 3
 — геодезическая 3
 — история 237
 — мореходная 3
 Астрономическая биссектриса 147
 — бригада 117, 217
 — обсервация 150
 Астроориентировка аварийная 244
 Астроплот 217
 Атомная секунда — см. *Секунда атомная*
 Атомное время — см. *Время атомное*
 Афелий 35, 37

Б

Блеск светила 90
 Бюллетень штурманский 88
 Бюро долгот 238

В

Вариация Луны 44
 — хода 83
 Величина звездная 89
 Вертикал 7
 — наблюдателя 7
 — первый 7
 Вес высотной линии положения 169
 — точки пересечения 170
 Весов прием 172
 Возраст Луны 46
 Восход видимый 74
 — истинный 5

— Луны 75
 — Солнца 74
 Восхождение прямое 9
 Времена года 38
 Время атомное 64
 — всемирное 59
 — гринвичское 59
 — декретное 61
 — звездное 54
 — координированное 64
 — кульминации 72, 73
 — летнее 61
 — местное 58
 — московское 62
 — поясное 59
 — прихода в заданное положение 73, 99
 —, сигналы 80
 — солнечное среднее 57
 — стандартное 62
 — судовое 57
 —, уравнение 57
 — эфемеридное 64
 Выверка большого зеркала 110
 — малого зеркала 110
 — пеленгатора 141
 — секстана 109
 — трубы 109
 Высота видимая 119
 — геоцентрическая 119
 — глаза наблюдателя 123
 — измеренная 123
 — истинная 119
 — меридиональная 8
 — наибольшая 222
 — обсервованная 119
 — светила 7
 — соответствующая 227
 — счислимая 160
 — топоцентрическая 119
 Высотная линия положения 156
 — —, уравнение 157
 Выгодные условия определений координат 159
 — — — — по двум линиям 177
 — — — — по трем линиям 178
 — — — — по Солнцу 197
 Вычисление азимута по табл. 15, 144, 145
 — — по ЭКВМ 145
 — — высоты по табл. 15, 25, 19
 — — по ЭКВМ 219

Г

Географическая долгота см. *Долгота географическая*
 — широта — см. *Широта географическая*
 Географическое место светила 153
 Геозенит 51
 Глобус звездный 93
 Год календарный 65

— тропический 37
Горизонт видимый 73
— истинный 5
Горизонтная система координат — см. *Координаты горизонтные*
Градшток 238
Графический прием весов 172

Д

Движение видимое суточное 28
— Луны месячное 44
— Солнца годовое 36
Диоптры 109, 237
Долгота географическая 5, 149
— Солнца 37, 242
— эклиптическая 10
Дополнение звездное — см. *Звездное дополнение*

Е

Ежегодник астрономический СССР 66
— — — авиационный 67
— — — морской 67, 245

З

Задача двух высот 151
Закон всемирного тяготения 33
Законы Кеплера 34
Заход видимый 74
— истинный 28
Звездное дополнение 9
Звездные карты 90
Звезды, классификация 89
— навигационные 90
—, опознавание 90
Зенит 5
Зенитное расстояние 8
Зенитные установки 151
Зодиак 36
Зубчатая рейка 103, 104

И

Изменение азимута 32
— высоты 31
— координат Луны 44
— — планет 42
— — Солида 37
Измерение высоты 113
— — края 115
— — над береговой чертой 116
— — через зенит 115
— — наклона 127
— — пеленга 141
Изоазимута 152
Изогона сферическая 152
Изолинии 152
— высот 153
— навигационные 150
Изоскора азимутальная 152
— высотная 152
Индекс градусный 104
— минутный 104
—, поправка 111
— секстанта 100
Инструментальная поправка секстанта 105
Интегратор 107, 108
Исправление высот звезд 128
— — Луны 129
— — над береговой чертой 131
— — светил 119
— — Солида 128

— — через зенит 130
Исследование формул 14
Итерация 151

К

Календарный год — см. *Год календарный*
— месяц 65
Календарь 65
— лунный 65
— солнечный 65
Карты бортовые 96
— иеба 90
Каталог звездный 67
Квадрант 237
Квадратура 41, 47
Квазиразность 70
Коллиматор 105, 108
Комбинирование линий положения 201
Контроль измерений 117
— на промахи 118
Координаты географические 5
— горизонтные 7
— полярные 8
— сферические 7
— экваториальные 8
— эклиптические 9
Координированное время — см. *Время координированное*
—, поправка 65
Корреляции коэффициент 181
Космическая скорость вторая 52
— — первая 51
— — третья 52
Кривая циклическая — см. *Циклические кривые*
Круг равных высот 153
Кульминация верхняя 28, 72
— нижняя 28

Л

Лимб 46, 103
Линия демаркационная (смены дат) 63
— положения высотная 156
— — разностно-высотная 174
Лунное число 47
Лунный месяц 46
Лунных расстояний способ 238

М

Масштаб линейный 165
— угловой 165
Меридиан географический 58
— гринвичский 59
— местный 58
— наблюдателя 5
— небесный 7
— светила 8
Меридиональная высота 8, 30, 221
Мертвый ход 106
Место обозначенное 165
— перемещенное 165
— светила видимое 6
Месяц сидерический 44
— синодический 45
Метод биссектрис 174
— градиентов 156
— наименьших квадратов 171
— — — обобщенный 181
— обработки аналитический 151, 157
— — графический 150, 155
— — графоаналитический 150, 156

Система Солнечная 41
 — формул 15
 Систематические ошибки высотной линии 167, 174
 Склонение светила 8
 СКО высот 135, 167
 — высотной линии положения 168
 — поправки индекса 134
 — — компаса 142
 Сличение часов 85
 Служба времени 87
 Соединение Венеры 187
 — верхнее 41
 — нижнее 41
 Созвездия 89
 Солнцестояние зимнее 36
 — летнее 36
 Способ Акимова 157
 — Сент-Илера 157, 159
 — Сомнера 157
 Спутники искусственные Земли 50
 Средняя квадратическая ошибка (СКО) 133
 Сумерки астрономические 73
 — гражданские 73
 — навигационные 73
 Сутки звездные 54
 — солнечные истинные 56
 — средние 56
 Суточное движение 28
 Суточный ход 83
 Сфера небесная вспомогательная 5, 11

Т

Таблицы азимутов 143
 — безынтерполяционные 124
 — ВАС—58
 — исправления высот 128
 — МТ — 75 15, 129, 146
 — НО-214 26
 — НО-249 213
 — опознавания звезд 96
 — специальные 17
 — ТВА—57 18
 —, точность 27
 Терминатор 46
 Точки горизонта 6
 — суточной параллели 28
 Треугольник ошибок 175
 — параллактический 13
 — сферический 241
 Тропик Козерога 37
 — Рака 37
 Тропический год — см. Год тропический
 — пояс — см. Пояс климатический тропический

У

Угол часовой гринвичский 11
 — — местный 11
 Уравнение времени 57
 — высотной линии 157
 — круга равных высот 154
 — ошибок 158
 — полосы положения 234
 — центра 56, 243
 Уравнения изолиний 152
 Уравнивание линий положения 170

Ф

Фазы Венеры 188
 — Луны 45

—, поправка 190
 Формула косинуса стороны 241
 — — угла 241
 — котангенсов 241
 — пяти элементов 241
 — синусов 241
 Формулы тангенсов 17
 Формуляр технический 106
 Фиксатор 108

Х

Ход суточный 83
 Хронометр кварцевый 79
 — морской механический 77
 Хранение времени 77, 87

Ц

Центрографический прием (метод) 172
 Циклические кривые 134

Ч

Час звездный 54
 — средний 57
 Часовая мера 10
 Часовой угол светила 8
 Часы палубные 79
 —, перестановка 62
 — судовые (морские) 79

Ш

Широта астрономическая 149
 — географическая 5, 149
 — геодезическая 149

Э

Эвекция 44
 Экватор небесный 5
 Экваториальные координаты — см. Координаты экваториальные
 Эклиптика 36
 Эклиптическая долгота Солнца 37
 Эклиптические координаты — см. Координаты эклиптические
 Эксцентриситет алидады 105
 — орбиты 34, 35
 — орбиты Луны 44
 Элементы высотной линии 160
 — орбиты 34, 35
 — треугольника 13
 Элонгация Венеры 188
 — планеты 41
 — светила 28
 Эпоха 214, 242
 Эра 66
 — новая 66
 Эфемеридная секунда — см. Секунда эфемеридная
 Эфемеридное время — см. Время эфемеридное
 Эфемериды светил 66
 — спутников 53

Ю

Юлианский год 242
 — день 66
 — период 66

Я

Яркость Венеры 187
 — звезды 89, 90
 — планет 43

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3	§ 14. Изменение экваториальных координат Солнца в течение года	37
Часть I			
ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ И ОБЩЕЙ АСТРОНОМИИ			
Глава 1. Небесная сфера и сферические координаты светил	5	Глава 5. Орбитальное и видимое движение планет, Луны и искусственных спутников. Изменение координат звезд.	40
§ 1. Небесная сфера	5	§ 16. Орбитальное и видимое движение планет	40
§ 2. Системы сферических координат	7	§ 17. Орбитальное и видимое месячное движение Луны	43
§ 3. Графическое решение задач на небесной сфере	10	§ 18. Фазы и возраст Луны	45
Глава 2. Параллактический треугольник светила и его решение	13	§ 19. Прецессия, нутация и годичная абберация. Изменение экваториальных координат звезд	47
§ 4. Параллактический треугольник и его решение относительно высоты и азимута	13	§ 20. Понятие об орбитальном движении искусственных спутников Земли	50
§ 5. Определение высоты и азимута по системам формул	15	Глава 6. Измерение времени	53
§ 6. Специальные таблицы для вычисления высоты и азимута. Устройство и пользование таблицами ТВА-57.	17	§ 21. Основы измерения времени	53
§ 7. Разложение высоты и азимута в ряд Тейлора. Теория таблиц численного типа	20	§ 22. Звездные сутки, звездное время. Основная формула времени	54
§ 8. Устройство и пользование таблицами ВАС—58. Иностраные численные таблицы	22	§ 23. Истинные солнечные сутки. Средние сутки, среднее время. Связь среднего времени с истинным и звездным	56
Глава 3. Видимое суточное движение светил	27	§ 24. Местные и гринвичские системы счета времени. Соотношение между временами на различных меридианах	58
§ 9. Характеристика суточного движения Земли и светил	27	§ 25. Поясное, декретное, летнее, московское и стандартное время, их связь с местной системой	59
§ 10. Явления, связанные с суточным движением светил	29	§ 26. Судовое время, перестановка часов, смена дат. Расчеты, связанные с судовым временем	62
§ 11. Изменение координат светил вследствие видимого суточного движения	31	§ 27. Понятие о эталонных системах счета времени. Понятие о календаре и зрах	64
Глава 4. Обращение Земли вокруг Солнца. Видимое годовое движение Солнца	33		
§ 12. Понятие о закономерностях движения светил Солнечной системы	33		
§ 13. Обращение Земли по орбите и видимое годовое движение Солнца	35		

Глава 7. Определение видимых координат светил. Морской астрономический ежегодник. 66

- § 28. Способы определения эфемерид. Понятие об астрономических ежегодниках 66
- § 29. Устройство таблиц МАЕ для расчета часовых углов и склонений светил 67
- § 30. Определение времени кульминации светил 71
- § 31. Обоснование расчета времени видимого восхода (захода) Солнца, Луны и времени сумерек 73
- § 32. Определение времени восхода (захода) Солнца и Луны по МАЕ. Расчет времени сумерек и времени начала наблюдений звезд 74

Часть II

МОРСКИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И РАБОТА С НИМИ

Глава 8. Измерители времени. Судовая служба времени 77

- § 33. Хронометр и другие измерители времени на судне 77
- § 34. Поправка хронометра и часов. Определение поправки хронометра 80
- § 35. Ход хронометра и его изменения. Журнал поправок хронометра 82
- § 36. Работа с хронометром и часами. Обращение с ними 84
- § 37. Организация службы времени на судне 87

Глава 9. Звездное небо. Звездный глобус 89

- § 38. Классификация звезд, созвездия. Опознавание навигационных созвездий и звезд 89
- § 39. Устройство звездного глобуса, его установка. Понятие о других пособиях 93
- § 40. Решение задач с помощью звездного глобуса 96

Глава 10. Секстан 99

- § 41. Основы теории навигационного секстана 99
- § 42. Устройство навигационных секстанов 103
- § 43. Понятие об инструментальных погрешностях секстана и их учете 104
- § 44. Понятие о секстанах с искусственным горизонтом 106

Глава 11. Наблюдения с навигационным секстаном 109

- § 45. Выверка навигационного секстана на судне 109
- § 46. Определение поправки индекса секстана и ее уменьшение 111

- § 47. Приемы измерения высот светил над видимым горизонтом. Особые приемы измерения 113

- § 48. Практическое выполнение наблюдений высот. Число наблюдений, их контроль и осреднение 115

Глава 12. Исправление высот светил. Определение точности измерения высот и поправок 118

- § 49. Необходимость исправления высот. Поправки высот за астрономическую рефракцию, параллакс и полудиаметр 118

- § 50. Наклонение видимого горизонта. Наклонение зрительного луча 122

- § 51. Устройство наклономеров и работа с ними 125

- § 52. Общий случай исправления высот светил, измеренных над видимым горизонтом 127

- § 53. Частные случаи исправления высот светил 130

- § 54. Приведение высот светил к одному зениту (месту) и одному моменту 131

- § 55. Определение средних квадратических ошибок поправок и измерения углов 133

- § 56. Определение средней квадратической ошибки измерения высот светил в море 135

Часть III

АСТРОНАВИГАЦИЯ

Глава 13. Определение поправки компаса астрономическими методами 136

- § 57. Основы астрономического определения поправки компаса 138

- § 58. Влияние ошибок в φ_c и λ_c на вычисляемый азимут светила. Выгодные условия наблюдений 139

- § 59. Пеленгование светил. Точность поправки компаса 140

- § 60. Общий случай определения поправки компаса 142

- § 61. Частные случаи определения поправки компаса по азимуту восхода (захода) Солнца и по Полярной звезде 146

Глава 14. Теоретические основы определения места судна по светилам 149

- § 62. Общие принципы астрономического определения места 149

- § 63. Применение изолиний в астрономии. Круг равных высот 152

- § 64. Метод линий положения. Высотная линия положения 156

§ 65. Уравнение ошибок. Условия, выгодные для определения места, широты и долготы	158
---	-----

Глава 15. Расчет элементов, прокладка и погрешности высотных линий положения.	159
---	-----

§ 66. Способ Сент-Илера. Счислимый параллактический треугольник. Погрешности метода ВЛП.	159
--	-----

§ 67. Свойства высотных линий. Прокладка линий на карте и плане	163
---	-----

§ 68. Источники ошибок в высотной линии. Точность и вес линии	166
---	-----

Глава 16. Методы отыскания места судна и оценки его точности при наличии ошибок в высотных линиях	169
---	-----

§ 69. Отыскание вероятнейшего места судна при наличии в ВЛП только случайных ошибок (МНК). Оценка точности места	169
--	-----

§ 70. Отыскание места при повторяющихся ошибках. Метод астрономических биссектрис	174
---	-----

§ 71. Отыскание места судна и оценка его точности при совместном действии ошибок. Анализ обсервации	177
---	-----

Глава 17. Определение места по одновременным наблюдениям светил	182
---	-----

§ 72. Особенности одновременных наблюдений	182
--	-----

§ 73. Общий случай определения места по звездам. Практическое выполнение	183
--	-----

§ 74. Определение места днем по одновременным наблюдениям Венеры и Солнца	187
---	-----

§ 75. Определение места днем по одновременным наблюдениям Луны и Солнца; Венеры, Луны и Солнца	192
--	-----

Глава 18. Определение места по разновременным наблюдениям Солнца	193
--	-----

§ 76. Особенности определения места по разновременным наблюдениям	193
---	-----

§ 77. Влияние ошибок счисления и выгодные условия определения места по Солнцу	196
---	-----

§ 78. Общий случай определения места по Солнцу. Практическое выполнение	199
---	-----

§ 79. Определение места комбинацией астрономических и навигационных линий положения. Применение одной высотной линии.	201
---	-----

Глава 19. Ускоренные способы астрономического определения места	203
---	-----

§ 80. Приемы ускорения обработки наблюдений. Перемещение счислимого места. Предварительная обработка (предвычисление)	203
---	-----

§ 81. Рациональные приемы определения места по звездам и Солнцу с обработкой по таблицам ВАС—58	208
---	-----

§ 82. Определение места по звездам со специальными таблицами «подобранных звезд» (типа НО-249)	213
--	-----

§ 83. Применение вычислительных приборов и машин для решения задач мореходной астрономии	217
--	-----

Глава 20. Частные способы определения координат места судна	221
---	-----

§ 84. Определение широты места по меридиональной и наибольшей высотам Солнца	221
--	-----

§ 85. Определение широты места по высотам Полярной звезды	225
---	-----

§ 86. Особенности определения места по Солнцу в малых широтах и тропиках. Определение координат по способу соответствующих высот и наибольшей высоте	226
--	-----

§ 87. Графический способ определения места при высотах Солнца, больших 88°	229
---	-----

§ 88. Особенности астрономических определений в высоких широтах	234
---	-----

Глава 21. Перспективы развития астронавигации. Краткий исторический очерк	236
---	-----

§ 89. Понятие о морских астронавигационных системах и навигационных комплексах. Перспективы развития и применения астронавигации	236
--	-----

§ 90. Краткий очерк истории мореходной астрономии	237
---	-----

Приложение 1. Сведения из сферической геометрии и тригонометрии	241
---	-----

Приложение 2. Алгоритмы для вычисления видимых координат звезд и Солнца	242
---	-----

Приложение 3. Приближенные (лаврийные) способы астроориентировки	244
--	-----

Приложение 4.	245
-----------------------	-----

Список литературы	248
Предметный указатель	249

Учебник

БОРИС ИВАНОВИЧ КРАСАВЦЕВ

МОРЕХОДНАЯ АСТРОНОМИЯ

Предметный указатель составлен Б. И. Красавцевым

Переплет художника В. К. Бисенгазиева

Технические редакторы О. Н. Крайнова, Н. Б. Усанова

Корректор-вычитчик Е. И. Белухова

Корректор Н. А. Хасанова

ИБ № 2891

Сдано в набор 26.08.85.	Подписано в печать 20.03.86.	Т-05677.
Формат 70×100 ¹ / ₁₆ .	Бум. офс. № 2.	Гарнитура литературная.
Усл. печ. л. 20,8.	Усл. кр.-отт. 20,8.	Уч.-изд. л. 23,68.
		Тираж 14 500 экз.
	Цена 1 р. 10 к.	Изд. № 1-1-1/11 № 2505
Ордена «Знак Почета» издательство «ТРАНСПОРТ»		
103064, Москва, Басманный туп., 6а		

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46